



Dissertation

**Diana Walter**

**Systematische Einflüsse digitaler Höhenmodelle  
auf die Qualität radarinterferometrischer  
Bodenbewegungsmessungen**



TU Clausthal

---

Dissertation

Systematische Einflüsse digitaler Höhenmodelle  
auf die Qualität radarinterferometrischer  
Bodenbewegungsmessungen

Von der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften  
der Technischen Universität Clausthal  
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Diana Walter

aus Meißen

---

Clausthal-Zellerfeld 2012

ISBN 978-3-86948-224-8

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

**Erklärung.** Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation eigenständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Vorsitzender der Promotionskommission:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Meyer
Hauptberichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Busch
Mitberichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Sörgel

Tag der mündlichen Prüfung: 28. September 2011

Die Dissertation wurde am 3. August 2011 bei der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Clausthal eingereicht und angenommen.

© PAPIERFLIEGER VERLAG GmbH, Clausthal-Zellerfeld, 2012  
Telemannstraße 1 · 38678 Clausthal-Zellerfeld  
[www.papierflieger.eu](http://www.papierflieger.eu)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2012

**ISBN 978-3-86948-224-8**

---

# Zusammenfassung

---

Auf dem Gebiet der Bodenbewegungsüberwachung ist das Interesse an der Radarinterferometrie als Messmethode, insbesondere durch die neuen hochauflösenden SAR-Satelliten, stark gestiegen. Die Qualität der Interferogramme hat sich erheblich verbessert, was vor allem auf die höheren Wiederholraten, aber auch geringeren Schwankungen der Satellitenorbitpfade zurückzuführen ist. Durch die höheren Bodenauflösungen wurde auch das Anwendungsspektrum speziell im Bereich der Einzelobjektüberwachung erweitert. Anhand verschiedener Anwendungsbeispiele konnte mehrfach nachgewiesen werden, dass Messgenauigkeiten von wenigen Millimetern erzielbar sind. Die Anerkennung der Radarinterferometrie als Messmethode im klassisch geodätisch-markscheiderischen Sinne und die damit verbundene Überführung in die nachhaltige Praxis macht eine genaue und umfassende Beschreibung und Quantifizierung der Messfehler erforderlich. Die Messfehler resultieren überwiegend aus räumlichen und zeitlichen Einflussfaktoren. Systematische Fehler werden durch die Aufnahmegeometrie hervorgerufen, hauptsächlich durch den Abstand zwischen den Satellitenaufnahmepositionen. Die Erfassung von Bodenbewegungen der Erdoberfläche mittels Radarsensoren setzt wiederholte Aufnahmen voraus. Aus den gemessenen Phasen der zurückgestreuten Signale werden Interferogramme generiert und im Allgemeinen unter Verwendung von vorhandenen Höhenmodellen topographiebedingte Einflüsse korrigiert. Fehler in den Höhenmodellen werden dabei direkt, aber auch indirekt, in die Bewegungsmessung übertragen und führen zu Messfehlern. Der Einfluss wird in der praktischen Anwendung häufig unterschätzt. Speziell in bergbaulich beeinflussten Gebieten oder auch dicht bebauten städtischen Bereichen treten verstärkt topographiebedingte Messfehler auf.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der systematische Einfluss von Höhenmodellfehlern innerhalb des interferometrischen Auswerteprozesses ausführlich untersucht sowie die Auswirkungen auf die Genauigkeit der abgeleiteten Bodenbewegungen quantifiziert. Neben der funktionalen Beschreibung der Zusammenhänge erfolgt exemplarisch an einem bergbaulich beeinflussten Gebiet die Analyse der vertikalen Messfehler in Abhängigkeit unterschiedlicher Höhendaten und Satellitensensoren (TerraSAR-X, Envisat ASAR, ALOS

PALSAR) sowie unterschiedlicher Aufnahmegeometrien. Dabei wird differenziert auf Auswirkungen von Höhenfehlern in Bereichen mit stetigen topographischen Veränderungen sowie in Stadt- und Vegetationsgebieten eingegangen. Spezielle Untersuchungen erfolgen hinsichtlich der Genauigkeit bei der Überführung von Höhenmodelldaten ins Range-Doppler-Koordinatensystem (Geokodierung), die Voraussetzung für die topographische Korrektur ist.

Die Validierung mittels terrestrischer Daten zeigt, dass die realen Messfehler häufig kleiner sind als die theoretisch berechneten Werte. Bei X-Band Sensoren bewirken bereits kleine Höhenfehler große Phasenfehler, die jedoch im Vergleich zu L-Band Ergebnissen deutlich kleinere Messfehler verursachen.

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen werden in der Arbeit Empfehlungen gegeben, mit deren Hilfe eine Reduktion von topographiebedingten Messfehlern in Interferogrammen unter Einhaltung sensorspezifischer Aufnahmeparameter sowie Verwendung geeigneter Höhenmodelle möglich ist. Vertiefende Kenntnisse zur Identifikation von Höhenfehlern in Interferogrammen sollen Anwendern als Interpretations- und Bewertungshilfe zur quantitativen Einschätzung möglicher Messfehler dienen.

---

# Abstract

---

In the field of surface deformation monitoring, the interest in radar interferometric measurement techniques increased considerable, particularly regarding the availability of new high resolution SAR satellites. The quality of interferograms has been improved significantly, mainly due to higher repetition rates, and less variations of orbit paths. Furthermore, the range of application was extended by monitoring of single objects for the higher ground resolution of new SAR data. Many examples in publications demonstrate the ability to achievement accuracies in the range of a few millimeters. In order to obtain acceptance in using radar interferometry as a measurement technique in terms of accuracy demands in geodesy and mine surveying, a precise and extensive description and quantification of measurement errors is necessary. Measuring errors are mainly caused by spatial and temporal factors. Systematic errors are caused by imaging geometry, especially by the distance between satellite orbit paths. Precondition for the measurement of ground movements is the use of repeat-pass SAR acquisitions. Interferograms are generated using phase values of the backscattered signals and utilizing an external elevation model for correcting topographic influences. Height errors of an elevation model directly and indirectly lead to inaccuracies in the measured deformations. In practice the impact is commonly underestimated. Especially in areas influenced by mining and in densely built-up urban areas, there is an increase in topography related measurement errors.

Within the scope of this thesis, systematic influences of elevation model errors in interferometric processing and on accuracy of measured surface movements are analysed and quantified. Besides functional description of relationships, analyses of vertical displacement errors in an area influenced by mining are presented using different elevation models, SAR sensors (TerraSAR-X, Envisat ASAR, ALOS PALSAR) and imaging geometries. Study results are shown for areas with continuous topographic changes, urbanized and vegetated areas. The assessment of the geocoding accuracy of elevation models, in relation to height errors are analysed separately.

Validation with terrestrial data shows that real measurement errors are commonly smaller than theoretical errors. Small height errors can cause large phase errors, especially when using X-band sensors in comparison to L-band sensors.

Recommendations for the reduction of topography-related measurement errors are given in this thesis, in accordance with sensor specific acquisition parameters and using suitable elevation models. Enhanced knowledge of height errors occurring in interferograms can be used as an interpretation aid for the estimation of potential errors.

---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1. Motivation und Relevanz</b>	<b>1</b>
<b>2. Anwendungsorientierte Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1. Radar mit synthetischer Apertur . . . . .	5
2.1.1. Geometrische Effekte . . . . .	10
2.1.2. Radiometrische Eigenschaften . . . . .	14
2.1.3. Satellitengestützte SAR-Systeme . . . . .	18
2.2. Radarinterferometrie . . . . .	19
2.2.1. Die interferometrische Phase . . . . .	19
2.2.2. Differentielle SAR-Interferometrie . . . . .	26
2.2.3. Kohärenz . . . . .	28
2.2.4. Multi-Basislinien-Verfahren zur Bodenbewegungsüberwachung . . .	32
2.3. Geokodierung von SAR-Bildern . . . . .	34
2.3.1. Distanz-Doppler-Ansatz . . . . .	36
2.3.2. Simulation von Radarbildern . . . . .	38
2.3.3. Geokodierung von InSAR-DHMs . . . . .	41
2.4. Digitale Höhenmodelle . . . . .	41
2.4.1. Erfassungsmethoden . . . . .	42
2.4.2. Qualitätskriterien . . . . .	46
<b>3. Funktionale Zusammenhänge</b>	<b>49</b>
3.1. Topographische Phasenkorrektur . . . . .	49
3.1.1. Der Einfluss des Höhenfehlers auf die Genauigkeit der Höhenänderungen . . . . .	51
3.1.2. Der Einfluss des Höhenfehlers auf die Schrägdistanzen und die Basislinie . . . . .	55
3.1.3. Auswirkungen des Höhenfehlers bei der Umrechnung von LOS . . .	59

3.2.	Geokodierung . . . . .	60
3.2.1.	Rängeverschiebungen in Abhängigkeit vom Höhenfehler . . . . .	61
3.2.2.	Azimutverschiebungen in Abhängigkeit vom Höhenfehler . . . . .	62
3.2.3.	Auswirkung von Höhenfehlern bei der Feinregistrierung . . . . .	65
3.3.	Schlussfolgerungen . . . . .	65
<b>4.</b>	<b>Beispielhafte Untersuchungen mit realen Daten</b>	<b>67</b>
4.1.	Beschreibung der Datensätze . . . . .	68
4.1.1.	Testgebiet . . . . .	68
4.1.2.	Satellitendaten . . . . .	70
4.1.3.	Höhenmodelle . . . . .	72
4.2.	Detektion von höhenfehlerbedingten Phasendifferenzen in Interferogrammen	76
4.3.	Geokodierungsanalysen . . . . .	79
4.3.1.	Initiale Geokodierungsfehler . . . . .	79
4.3.2.	Feinregistrierung . . . . .	87
4.4.	Einflüsse von DHM-Qualitätsparametern auf die topographische Phasen-	
	korrektur . . . . .	90
4.4.1.	Zeitliche Höhenänderungen der Geländeoberfläche . . . . .	90
4.4.2.	Vegetationsbedingte Höhenfehler . . . . .	96
4.4.3.	Auswirkungen von Höhenfehlern in bebauten Gebieten . . . . .	99
<b>5.</b>	<b>Validierung mit terrestrischen Daten</b>	<b>105</b>
5.1.	TerraSAR-X Ergebnisse . . . . .	107
5.2.	Envisat ASAR Ergebnisse . . . . .	115
5.3.	ALOS PALSAR Ergebnisse . . . . .	119
<b>6.</b>	<b>Ergebnisse und Ausblick</b>	<b>125</b>
6.1.	Empfehlungen zur Reduktion DHM-bedingter Messfehler . . . . .	126
6.1.1.	Wahl eines geeigneten Höhenmodells . . . . .	127
6.1.2.	Beschränkung der räumlichen Basislinie . . . . .	130
6.2.	Ausblick . . . . .	132
	<b>Anhang</b>	<b>133</b>
<b>A.</b>	<b>Aufnahmewinkel</b>	<b>133</b>
A.1.	Blickwinkel und -richtung . . . . .	133
A.2.	Depressionswinkel . . . . .	134
A.3.	Einfallswinkel . . . . .	134
A.4.	Zielachswinkel . . . . .	137
<b>B.</b>	<b>SAR-Signaleigenschaften</b>	<b>139</b>
B.1.	Radargleichung . . . . .	139
B.2.	Speckle-Effekt . . . . .	140
B.3.	Speckle-Reduzierung . . . . .	142

<b>C. Geometrische Zusammenhänge</b>	<b>143</b>
C.1. Fehlpositionierung aufgrund von Höhenfehlern . . . . .	143
C.2. Berechnung des geozentrischen Radius . . . . .	145
<b>D. DHMs aus optischen Satellitendaten</b>	<b>147</b>
<b>E. Weitere Messergebnisse</b>	<b>149</b>
<b>F. Sensorparameter</b>	<b>153</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>157</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>161</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>165</b>



## Motivation und Relevanz

---

Mit den neuen hochauflösenden satellitengetragenen SAR-Sensoren ist das Interesse an der radarinterferometrischen Bodenbewegungsüberwachung stark gestiegen. Speziell die X-Band Sensoren TerraSAR-X und COSMO-SkyMed mit ihren unterschiedlichen Aufnahmemodi, aber auch der langwelligere ALOS PALSAR Sensor haben das Anwendungsspektrum diesbezüglich stark erweitert. Darüber hinaus leistet Radarsat-2 mit seinen vielen hochauflösenden Modi einen wichtigen Beitrag zur aktuellen Entwicklung. Die Qualität der Interferogramme hat sich erheblich verbessert, was vor allem auf die höheren Wiederholraten, aber auch geringeren Schwankungen der Satellitenorbitpfade zurückzuführen ist. Durch die stetig verbesserte Hochfrequenztechnik weisen die Daten deutlich höhere Bodenauflösungen auf. Gleichzeitig konnte anhand verschiedener Anwendungsbeispiele sehr anschaulich nachgewiesen werden, dass Messgenauigkeiten von wenigen Millimetern erzielbar sind.

Die Anerkennung der Radarinterferometrie als Messmethode zur Überwachung von Bodenbewegungen im klassisch geodätisch-markscheiderischen Sinne und die damit verbundene Überführung in die eigentliche Praxis macht eine genaue und umfassende Beschreibung und Quantifizierung der Messfehler erforderlich. Die Messfehler resultieren überwiegend aus räumlichen und zeitlichen Einflussfaktoren. Bedingt durch die festen Orbitbahnen und Aufnahmezeitpunkte der Satelliten sind die Messfehler durch den Nutzer nicht steuerbar und somit wie bei anderen Messverfahren nicht von vornherein minimierbar. Systematische Fehler werden hervorgerufen durch die Aufnahmegeometrie, hauptsächlich durch den Abstand zwischen den Sensoraufnahmepositionen senkrecht zur Flugrichtung, wohingegen atmosphärenbedingte Fehler zufällig sind und räumlich korrelieren.

Bodenbewegungen der Erdoberfläche setzen wiederholte Aufnahmen (Phasenmessungen) eines Gebietes voraus, aus denen Interferogramme generiert werden. Voraussetzung für die genaue Ableitung von Bodenbewegungen aus Interferogrammen ist die Eliminierung aller aufnahmebedingten Einflüsse sowie möglicher atmosphärischer Störeinflüsse. Bei der aufnahmebedingten Korrektur muss die Topographie des abgebildeten Gebietes mit berücksichtigt werden. Die topographische Korrektur ist meistens nur unter Einbringung eines bereits existierenden Höhenmodells in die Auswertung möglich. Fehler in dem verwendeten Höhenmodell werden dabei direkt, aber auch indirekt, in die Bewegungsmessung übertragen und können zu großen Messfehlern führen. Der Einfluss wird in der praktischen Anwendung häufig unzureichend beachtet, vor allem in relativ flachen Gebieten. Ursache dafür ist zum einen die falsche Vorstellung, dass topographische Fehler nur geländebedingt sind, zum anderen die Schwierigkeit bei manchen Sensoren topographiebedingte Phasenfehler visuell zu detektieren bzw. richtig zu interpretieren. Der Einfluss großer Basislinien wird oftmals unterschätzt, da Sensoreigenschaften nicht berücksichtigt werden. Zusätzlich kommt es in dicht bebauten oder auch bergbaulich beeinflussten Gebieten meist zu kontinuierlichen Veränderungen an der Tagesoberfläche (Neubebauung, Senkungen, Aufschüttung von Halden, Veränderung von Böschungen), was die Notwendigkeit eines aktuellen Höhenmodells begründet. Im Hinblick auf die neueren hochauflösenden Sensoren stellt sich Frage, inwieweit schlechter aufgelöste Höhenmodelle für die topographische Phasenkorrektur geeignet sind.

Da externe Höhenmodelle niemals exakt die Rückstreuoberfläche der SAR-Aufnahmen wiedergeben, treten unabhängig von der Genauigkeit des Höhenmodells topographiebedingte Messfehler auf, deren Größe durch die Länge der Basislinie bestimmt wird. Speziell in Vegetationsbereichen zeigt sich die Fähigkeit der Mikrowellen tief in Objekte einzudringen. Dies erfordert je nach Sensor differenzierte Höheninformationen vom Gelände oder einem bestimmten Höhenniveau bei unterschiedlicher Topographie. In bebauten Gebieten treten zudem starke geometriebedingte Effekte auf, die zu starken Phasenfehlern führen können.

Voraussetzung für die topographische Phasenkorrektur mittels externen Höhenmodellen ist deren genaue Überführung ins Radarsystem (Geokodierung). Höhenfehler verursachen dabei Geokodierungsfehler, d.h. Verschiebungen und Verzerrungen, die zu einer zusätzlichen Verfälschung der Höhendaten führen und damit indirekt Messfehler bewirken.

Es besteht die Möglichkeit, die Höhenfehler aufgrund ihres systematischen Einflusses auf Interferogramme und der Abhängigkeit von der räumlichen Basislinie zusätzlich zur Bodenbewegungsmessung zu schätzen. Dies wird bei Multi-Basislinien-Verfahren, wie z. B. der Persistent Scatterer Technik (PSI), angewendet. Vorteil aller Multi-Basislinien-Verfahren ist die Ableitung durchgehender Bewegungszeitreihen für einzelne Punkte, die bei entsprechender hoher räumlicher Dichte auch flächenhafte Aussagen ermöglichen. Nachteil der PSI-Methode ist der langwierige Aufbau der erforderlichen Mindest-Datenstapel (> 20-30 Szenen), der sich zwar aufgrund der hohen Wiederholraten neuerer Sensoren deutlich verkürzt hat, jedoch bei Kurzzeitereignissen und anschließendem Monitoring ungeeignet sein kann. Dies trifft insbesondere zu, wenn noch kein adäquater retrospektiver Datensta-

pel in Archiven verfügbar ist. Durch die verstärkte Kommerzialisierung von SAR-Daten, größerer Datenmengen und Auswahl verschiedener Aufnahmemodi bei neueren Sensoren, erfolgt keine kontinuierliche Aufnahme von Gebieten, wie dies in der Vergangenheit bei ERS-1/-2 und Envisat der Fall war. Ein weiterer Nachteil aller Multi-Basislinien-Verfahren ist der Informationsverlust in Gebieten, die nicht über lange Zeit stabile Rückstreusignale liefern oder in denen Bodenbewegungen auftreten, deren zeitliches Verhalten zu stark von Modellvorgaben abweicht. Der Informationsgehalt, der in Interferogrammen steckt, wird dabei nicht immer ausreichend ausgeschöpft, kann jedoch bei objektspezifischen Aufgabenstellungen (z.B. Bodenbewegungen bei Halden und Böschungen) sehr wertvoll sein. Aus Kostengründen ist es außerdem nicht immer möglich lange geschlossene Datenreihen zu erwerben.

Grundsätzlich können bei der Auswertung von einzelnen Interferogrammen topographiebedingte Phasenfehler weder bestimmt noch korrigiert werden, um entsprechende Messfehler bei den abgeleiteten Bodenbewegungen zu verhindern. Eine Bewertung und Abschätzung möglicher höhenbedingter Messfehler ist bei bestimmten Kenntnissen zum Überwachungsgebiet sowie zu den funktionalen Zusammenhängen möglich. Des Weiteren ist eine gezielte Reduktion der Messfehler bei Einhaltung gewisser Bedingungen realisierbar.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die genaue Untersuchung und Quantifizierung des Einflusses von Höhenmodellfehlern innerhalb des radarinterferometrischen Auswerteprozesses und deren Auswirkungen auf die Genauigkeit der gemessenen Bodenbewegungen.

Zunächst werden relevante Grundlagen zu SAR-Systemen sowie der Radarinterferometrie und Geokodierung von SAR-Bildern im Kapitel 2 vorgestellt, die speziell für Anwender im Bereich der Bodenbewegungsüberwachung von Nutzen sein sollten und zum größten Teil Voraussetzung zum Verständnis des Kapitel 3 sind. Im Kapitel 2 wird zusätzlich auf Digitale Höhenmodelle näher eingegangen, um zum einen potenzielle Quellen zur Beschaffung eines für die topographische Korrektur von Interferogrammen geeigneten Höhenmodells aufzuzeigen, zum anderen mögliche Ursachen für Höhenmodellfehler darzulegen. Da sich Höhenfehler sowohl direkt als auch indirekt auf die Genauigkeit der topographischen Phasensimulation und damit die interferometrischen Phasen sowie die Messgenauigkeiten auswirken, erfolgt eine ausführliche Betrachtung der funktionalen Zusammenhänge im Kapitel 3. Ausgehend von den theoretischen Zusammenhängen erfolgt in Kapitel 4 exemplarisch für ein bergbaulich beeinflusstes Gebiet die Analyse der tatsächlichen Fehler in Abhängigkeit unterschiedlicher Höhenmodelle und SAR-Daten. Zum einen wird auf die Auswirkungen von Höhenfehlern in Gebieten mit stetigen topographischen Veränderungen sowie in Stadt- und Vegetationsgebieten eingegangen, zum anderen darauf wie sich Höhenfehler auf die Genauigkeit der Geokodierung von Radardaten auswirken und welche Folgen dies für die Messgenauigkeit der Bodenbewegungen hat. Darüber hinaus soll das Kapitel 4 eine Interpretationshilfe zur Identifikation von Höhenfehlern in Interferogrammen liefern. Anschließend folgt in Kapitel 5 die Validierung und Genauigkeitsbewertung mit terrestrischen Daten. Im abschließenden Kapitel 6 werden die wichtigsten Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel zusammengefasst sowie Empfehlungen zur Reduktion der DHM-bedingten Messfehler gegeben. Ferner wird in einem kurzen Ausblick auf aktuelle Möglichkeiten und Entwicklungen der Höhenfehlerschätzung eingegangen.



---

# Anwendungsorientierte Grundlagen

---

In diesem Kapitel werden zunächst themenrelevante Grundlagen, die speziell für Anwender des radarinterferometrischen Messverfahrens zur Bodenbewegungsüberwachung von Bedeutung sind, dargelegt. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Radarinterferometrie, wobei nur auf aktive monostatische Radarsysteme mit synthetischer Apertur (*Synthetic Aperture Radar*, kurz: SAR) eingegangen wird, die sich auf Satellitenplattformen befinden. Da die Georeferenzierung von Radardaten insbesondere unter Nutzung von Digitalen Höhenmodellen einen wesentlichen Einfluss auf die radarinterferometrische Bodenbewegungsmessung hat, wird in den weiteren Abschnitten dieses Kapitels auf die Georeferenzierung, Digitale Höhenmodelle und Bodenbewegungen näher eingegangen.

## 2.1. Radar mit synthetischer Apertur

Der Begriff Radar steht für *Radio detection and ranging* und bezieht sich sowohl auf eine Technik als auch ein Gerät zur Zielerfassung und Entfernungsmessung mittels Hochfrequenztechnik. Aktive Radarinstrumente senden Mikrowellenimpulse mit der Trägerfrequenz  $f_c$  im Bereich 0.3-300 GHz<sup>1</sup> und einer Pulswiederholrate (*Pulse repetition fre-*

---

<sup>1</sup>Der Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums wird nach *IEEE Standard 521-2002* unterteilt in verschiedene Frequenzbänder (W, V, Ka, K, Ku, X, C, S, L, UHF, VHF, HF). Die gebräuchlichsten Bänder in der Radarfernerkundung sind das X-Band ( $f=8-12$  GHz,  $\lambda=3.75-2.5$  cm), das C-Band ( $f=4-8$  GHz,  $\lambda=7.5-3.75$  cm) und das L-Band ( $f=1-2$  GHz,  $\lambda=30-15$  cm). Die Bezeichnung P-Band („P“ für *previous*) für den Frequenzbereich  $f=250-500$  MHz ( $\lambda=120-60$  cm) ist entsprechend *IEEE Standard 521* nicht mehr gültig, wird aber noch sehr häufig in der Praxis und somit auch in dieser Arbeit verwendet.

quency, PRF)  $f_a$  zur Erdoberfläche aus und empfangen zwischendurch, zur sogenannten *Sampling Window Start Time* (SWST), die zurückgestreuten Signale (Abb. 2.1). Da das Radarsignal aufgrund der Beugung an der Strahlungsquelle sich kugelförmig ausbreitet, das Winkelauflösungsvermögen eines Radarinstruments jedoch sehr schlecht ist, schauen Radarsensoren zur Unterscheidung von Objekten schräg nach unten, senkrecht zur Flugrichtung (Woodhouse, 2006). Die Systeme werden deswegen als Seitensichtradare (*Side looking aperture radar*, SLAR) bezeichnet. Durch den Weiterflug wird seitlich der Flugbahn kontinuierlich ein schmaler Streifen der Erdoberfläche mit der Breite (*swath width*), in Abhängigkeit des vertikalen Öffnungswinkels des Radarstrahls, beleuchtet. Die am Sensor empfangene Leistung als Funktion der Laufzeit ergibt die Dimension des Radarbildes senkrecht zur Flugrichtung in Ausbreitungsrichtung der Radarstrahlung, d.h. in *Range*-Richtung (oder auch *fast time*-Richtung). Die Signale nah entfernter (*near range*) Objekte der Beleuchtungsfläche (*antenna footprint*) erreichen den Sensor eher als weit entfernte (*far range*). Die Abtastfrequenz der Echos (*range sampling frequency*, RSF)  $f_d$  definiert zusammen mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  ( $=299792458$  m/s) die Pixelgröße (*pixel spacing*) in Schrägentfernungsrichtung (*slant range*)  $p_d$  und wird abhängig vom Sensor und dem Aufnahmemodus (z.B. bei Radarsat-2 Fine oder Standard Mode etc., siehe Tab. F.1.) angepasst:

$$p_d = \frac{c}{2 \cdot f_d} \quad (2.1)$$

Der Faktor 2 ergibt sich aus der zweifach zurückgelegten Strecke des Signals zwischen Sensor und Objekt. Zwei in Entfernungsrichtung hintereinander angeordnete Objekte können voneinander getrennt werden, sofern man ihre Echos unterscheiden kann. Die geometrische Auflösung in Slant-Range  $\rho_r$  ist daher abhängig von der Sendeimpulsdauer  $\tau_p$ :

$$\rho_r = \frac{c \cdot \tau_p}{2} \quad (2.2)$$

Für eine hohe geometrische Auflösung müssen sehr kurze energiereiche Impulse ausgesendet werden, was jedoch technisch begrenzt ist. Eine Verbesserung wird mittels Impulskompression anhand eines Optimalfilters realisiert, z.B. durch Anwendung einer linearen Frequenzmodulation, bei der das Signal zeitgedehnt frequenzmoduliert wird (*Chirp*). Bei der Signalverarbeitung erfolgt eine Faltung des empfangenen Signals mit dem Chirp (Matched-Filter-Prinzip) (Sörgel, 2003). Durch die Frequenzmodulation erhöht sich die Bandbreite  $B_p$ , die der Bandbreite eines sehr kurzen Signals entspricht. Die Auflösung in Slant-Range  $\rho_r$  für Radarsysteme mit Chirp-Pulsformen ergibt sich über die *effektive Impulslänge*  $\tau_e$ :

$$\rho_r = \frac{c \cdot \tau_e}{2} = \frac{c}{2 \cdot B_p} \quad (2.3)$$

Beispielsweise beträgt die theoretische geometrische Auflösung von TerraSAR-X 0.89 m in Slant-Range Richtung bei einer Bandbreite von 150 MHz (Stripmap Mode). Bei hochauflösenden Satelliten wie TerraSAR-X wird die Auflösung bewusst durch Gewichtung des Range- und Azimut-Spektrums reduziert, um Nebenkeulen zu unterdrücken und Mehrdeutigkeiten in Azimut zu vermeiden. Durch die Verschlechterung beträgt die Auflösung in Slant-Range 1.2 m (Eineder et al., 2010).

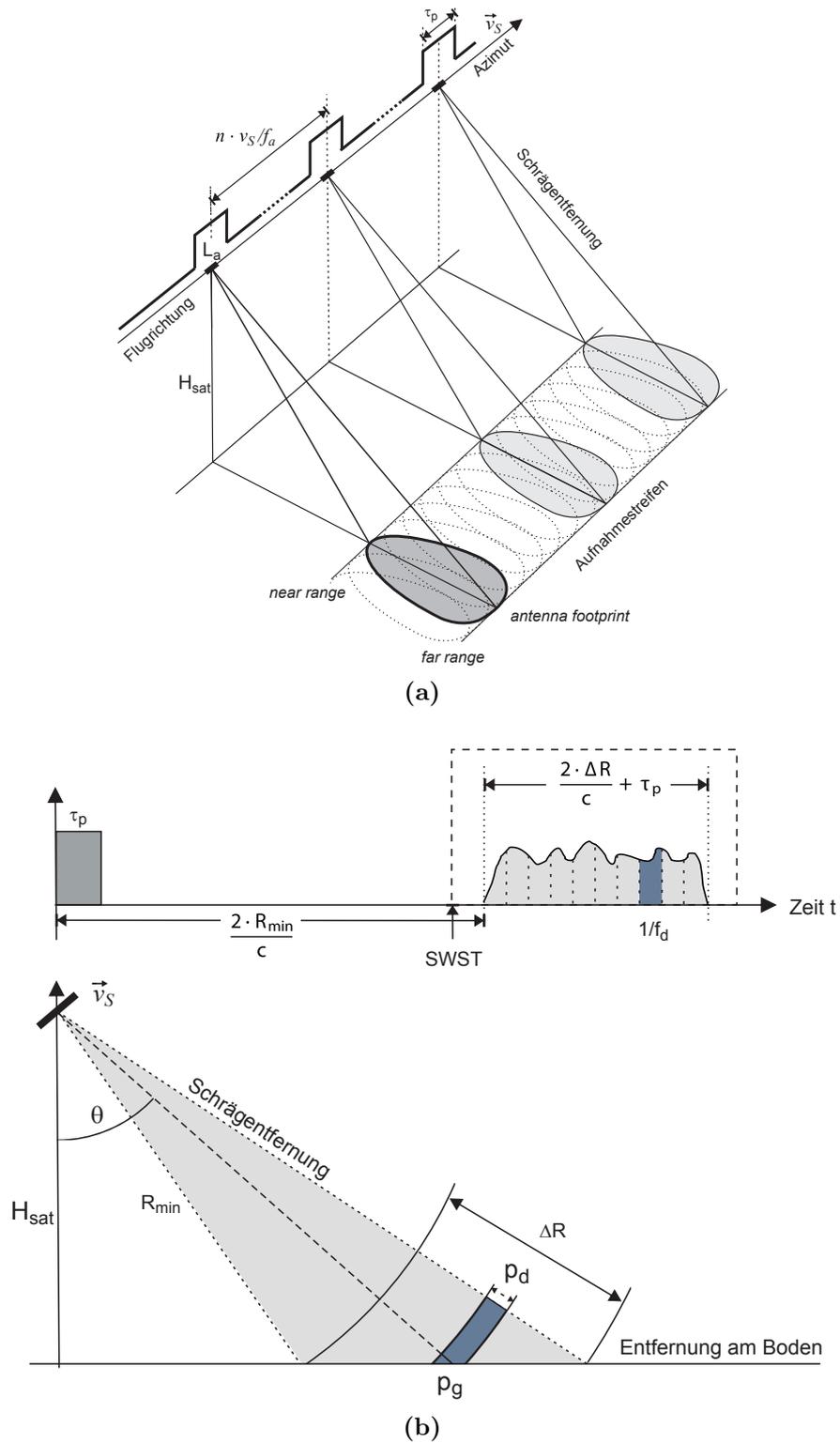


Abbildung 2.1.: SAR-Aufnahmeprinzip nach Massonnet & Souyris (2008): (a) Aufnahme mehrerer Bildzeilen in Azimut mit der Puls wiederholrate  $f_a$  beim Weiterflug des Satelliten mit der Geschwindigkeit  $v_s$ , (b) Erzeugung einer Bildzeile

Bei Überwachungen der Erdoberfläche interessiert jedoch weniger die Schrägentfernungsauflösung eines Radarsensors als vielmehr die Auflösung am Boden (*ground range*). Unter der Bodenauflösung  $\rho_g$  versteht man die Projektion auf eine horizontale Bildebene. Die lokale Bodenauflösung  $\rho_{g\alpha}$ , d.h. unprojizierte, gibt den minimalen Abstand zwischen Objekten auf einer um den Winkel  $\alpha$  geneigten Fläche wieder, damit diese noch unterschieden werden können. Die mögliche Bodenauflösung in Range  $\rho_g$ , d.h. die Projektion auf eine Referenzfläche, kann abgeleitet werden nach Schreier (1993) unter Berücksichtigung des Einfallswinkels  $\theta_i$  und des lokalen Geländeanstiegs  $\alpha$  (Anhang A, Abb. A.1):

$$\rho_g = \frac{\rho_r \cdot \cos \alpha}{\sin(\theta_i - \alpha)} \quad (2.4)$$

Bei gekrümmten Referenzflächen ist die projizierte Entfernung am Boden nicht linear zur Slant-Range Entfernung. Mit Zunahme der Geländeneigung  $\alpha$  verschlechtert sich die Bodenauflösung in Range-Richtung. Benutzt man als Referenzfläche eine horizontale Ebene ( $\alpha=0^\circ$ ), kann der Sinus des Blickwinkels  $\theta$  verwendet werden, da dieser dann dem Einfallswinkel  $\theta_i$  entspricht. Mit zunehmendem Blickwinkel  $\theta$ , je nach Wahl des Aufnahmemodus, verbessert sich die Bodenauflösung entsprechend.

Im Gegensatz zur Range-Auflösung ist die Auflösung in Flugrichtung des Sensors, d.h. in Azimut-Richtung (*slow time*), abhängig vom Sende- und Empfangsverhalten der Antenne sowie der Entfernung  $R$  zwischen Sensor und Objekt. Satellitengetragene Radarsysteme mit sogenannter Realer Apertur (RAR) haben aufgrund der großen Flughöhe und der technisch begrenzten Länge der Antenne eine sehr schlechte Bodenauflösung in Azimut. Sie entspricht in etwa der Breite der Beleuchtungsfläche, die sich aufgrund des Öffnungswinkel  $\beta_a$  in Flugrichtung ergibt, welcher wiederum definiert ist als die 3-dB-Breite der Antennenhauptkeule (Moreira, 2000). Eine Antenne mit einer Länge  $L_a$  hat eine Azimutauflösung von

$$\rho_a^{RAR} = R \cdot \beta_a \approx \frac{R \cdot \lambda}{L_a} \quad (2.5)$$

Da eine Verbesserung der Azimutauflösung technisch nur begrenzt möglich ist, wird die Pulswiederholrate der während des Weiterflugs stetig ausgesandten kohärenten Impulse erhöht. Damit wird die Phasenhistorie eines jeden Punktstreuers quasi kontinuierlich innerhalb eines bestimmten Aufnahmebereichs aufgezeichnet. Diese Eigenschaft der Radaraufnahme wird genutzt, um eine lange synthetische Antenne in Azimutrichtung zu generieren und damit künstlich die Bodenauflösung in Azimut zu erhöhen. Man spricht dann von einem *Synthetic Aperture Radar* (SAR). Die Länge der synthetischen Antenne  $L_{sa}$  ergibt sich aus der Flugstrecke des Sensors, welche der Breite der Antennenkeule am Boden entspricht  $L_{sa} = \rho_a^{RAR}$ . Die Winkelauflösung bei einem SAR ist doppelt so hoch wie beim RAR unter Berücksichtigung der synthetischen Antennenlänge (Moreira, 2000). Damit ergibt sich eine maximale Auflösung in Azimut für SAR-Systeme  $\rho_a^{SAR}$  von:

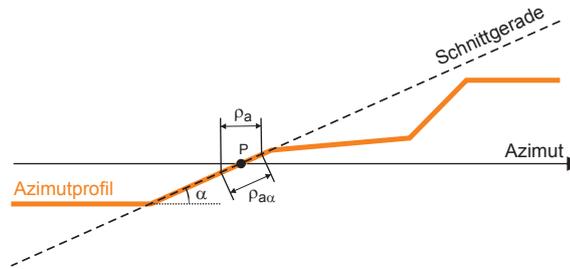
$$\rho_a^{SAR} = \frac{L_a}{2} \quad (2.6)$$

Die Auflösung in Azimut ist abhängig von der Antennenlänge, jedoch unabhängig von der Entfernung  $R$ . Beispielsweise beträgt die Azimutauflösung von TerraSAR-X im Stripmap

Mode theoretisch 2.4 m bei einer Antennenlänge von 4.8 m. Zur Vermeidung von Mehrdeutigkeiten in Azimutrichtung bei der SAR-Prozessierung (siehe Kapitel 2.1.1.4) wird die Auflösung jedoch reduziert und beträgt konstant 3.3 m für alle Stripmap-Daten mit Single Polarisation (Eineder et al., 2010).

Die Herstellung von SAR-Aufnahmen basiert auf Distanz- und Dopplermessungen und setzt Relativgeschwindigkeiten zwischen dem Sensor und den abbildenden Objektpunkten voraus (Meier, 1989). Die Geschwindigkeiten von orbitgestützten SAR-Systemen setzen sich dabei aus der Satellitenbewegung selbst, inklusive der Nick- und Gierbewegungen (*pitch & yaw angle*) der Sensorplattform, und der Bewegung der Rückstreupunkte auf der rotierenden Erdoberfläche zusammen.

Die lokale Azimutauflösung  $\rho_{a\alpha}$  ist definiert anhand der nominalen Azimutauflösung  $\rho_a^{SAR}$  und der Richtung der Schnittgeraden zwischen der durch das Rückstreuelement definierten Ebene und einer parallel zur Flugbahn verlaufenden Ebene, siehe Abb. 2.2 (Holecz et al., 1993). Die lokale Auflösung kann Aufschluss darüber geben, von welcher Fläche die empfangenen Signalanteile stammen.



**Abbildung 2.2.:** Geometrische Definition der lokalen Azimutauflösung  $\rho_{a\alpha}$  nach Holecz et al. (1993)

Die Pixelgröße in Azimut  $p_a$  wird definiert über die Pulswiederholrate  $f_a$  unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit der Satellitenplattform  $v_S$ :

$$p_a = \frac{v_S}{f_a} \quad (2.7)$$

Die Pulswiederholrate legt die untere Grenze zur Erfüllung des Nyquist'schen Abtasttheorems fest, das besagt, dass ein Spektrum nur dann eindeutig abgetastet werden kann, wenn die Abtastfrequenz mindestens so groß ist wie die höchste Signalfrequenz. Entsprechend ist die Pixelgröße kleiner als die Bodenauflösung. Die Abtastfrequenz darf jedoch nicht zu hoch gewählt werden, so dass zwei oder mehr Pulse gleichzeitig betrachtet werden. Beispielsweise hat der SAR-Sensor auf den Satelliten ERS-1/-2 nach Formel 2.4 und 2.6 mit  $\alpha=0^\circ$  und  $\theta_i=23^\circ$  eine Bodenauflösung von  $23\text{ m} \times 5\text{ m}$  und entsprechend Formel 2.1 und 2.7 eine Pixelgröße von  $20\text{ m} \times 4\text{ m}$ .

Für eine detaillierte Beschreibung der SAR-Technologie und der SAR-Bildprozessierung sei auf Publikationen von Meier (1989), Schreier (1993), Moreira (2000), Klausing & Holpp (2000), Hanssen (2001), Woodhouse (2006) und Massonnet & Souyris (2008) verwiesen.

### 2.1.1. Geometrische Effekte

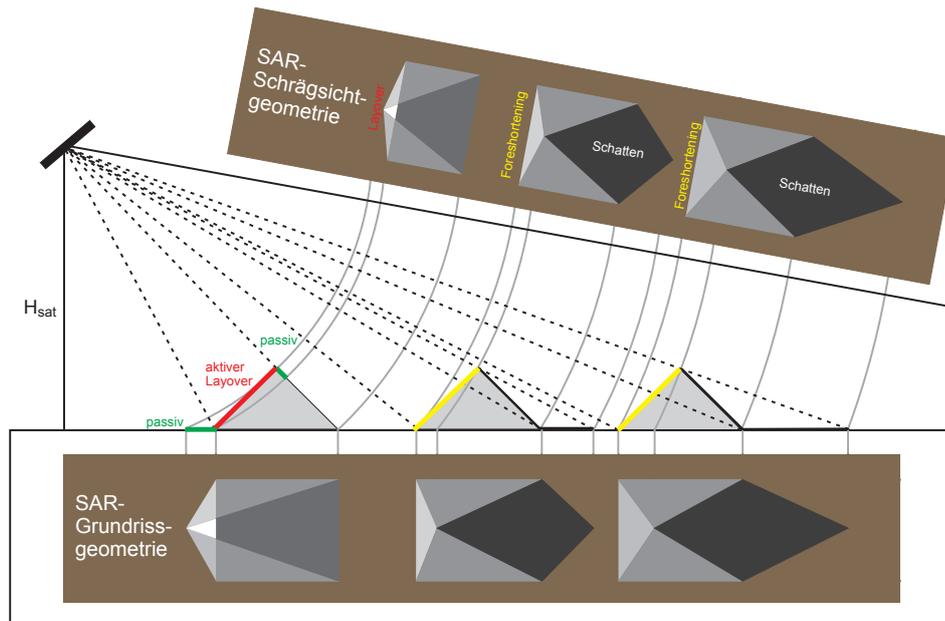
Aufgrund der Schrägsichtgeometrie der SAR-Sensoren werden durch die Topographie Verzerrungen im Radarbild verursacht, die mit der Gelände- bzw. Objekthöhe korrelieren. Die Projektion der Objektpunkte auf die Radarbildebene (Slant-Range Geometrie) ist proportional zum Sensorabstand, was zu einer nichtlinearen Kompression der Bildflächeninformationen führt und somit gegebenenfalls zu Informationslücken. Für eine exakte Transformation eines Bildpunktes vom Radarbild auf die Erdoberfläche, also die Entzerrung, müssen die Höhen berücksichtigt werden, um Lagefehler zu vermeiden (Kapitel 2.3).

Die größeren in einem Radarbild sichtbaren Verzerrungen, auf die in den folgenden Abschnitten näher eingegangen wird, treten aufgrund der Aufnahmegeometrie in Range-Richtung auf. Sie sind sehr stark von der Geländetopographie und der sich darauf befindlichen Objekte abhängig. Die betragsmäßig kleineren Verzerrungen in Azimutrichtung resultieren aus Relativgeschwindigkeiten zwischen dem Sensor und den Objektpunkten, und zwar hauptsächlich infolge unberücksichtigter topographischer Höhendifferenzen in der Azimut-Referenzfunktion (Schreier, 1993). Solche Effekte treten bei höheren Frequenzen (z.B. bei X-Band Aufnahmen) stärker auf (Meier, 1989). Verzerrungen in Azimutrichtung infolge der Erdrotation, der Verkippung des Sensors, längerer Rücklaufzeiten bei near- und far-range Signalen etc. werden ebenfalls in der Azimut-Referenzfunktion berücksichtigt und sind bei satellitengestützten Sensoren weniger problematisch als bei flugzeuggetragenen.

#### 2.1.1.1. Layover und Foreshortening

Verzerrungen werden bei größeren Höhendifferenzen bezogen auf eine Referenzfläche, auf welche die Slant-Range Bilder projiziert werden, am stärksten sichtbar. Entscheidender Einflussfaktor ist der Geländeanstieg (*slope*) bzw. die Objektneigung, d.h. die Variation der Höhen und nicht die absolute Höhe. Dem Sensor zugewandte Flächen (z.B. Berghänge, Hausfassaden) werden komprimiert dargestellt (*Foreshortening*), während weggeneigte Flächen im Radarbild verlängert abgebildet werden. Verkürzungen werden mit zunehmender Entfernung vom Nadir umso kleiner, d.h. bei größeren Blickwinkeln bzw. auch im far-range Bereich. Da Satelliten in großer Höhe fliegen, ist der Unterschied zwischen near- und far-range innerhalb des *antenna footprints* sehr klein, so dass die Verzerrungen bei gleichbleibender Topographie weitestgehend konstant bleiben.

Ein Extremfall vom Foreshortening ist der *Layover*-Effekt. Layover bedeutet, dass unterschiedliche Objektpunkte die gleiche Entfernung zum Sensor haben und in einem Punkt abgebildet werden (Kropatsch & Strobl, 1990). Aktive Layover-Bereiche (oder auch *true layover*) sind Rückstreuerelemente, die Layover verursachen, während passive Layover-Bereiche nur Teil des Layovers sind, in denen sich aktive Bereiche überlagern (Abb. 2.3). Layover tritt nur in Range-Richtung auf, wenn die Gelände- oder Objektneigung größer ist als der lokale Einfallswinkel  $\theta_{li}$  (vgl. A.3). Dies ist u.a. immer der Fall bei Gebäuden. Dabei kommt es zum Umklappen von Flächen, da sich höher gelegene Objektpunkte näher



**Abbildung 2.3.:** Aufnahmebedingte und reliefabhängige Verzerrungen (aktiver/passiver Layover, Foreshortening und Schatten) in der Schrägsicht- und Grundrissgeometrie von SAR-Bildern nach Woodhouse (2006)

zum Sensor befinden, z.B. Dachpunkte im Vergleich zu Gebäudefußpunkten. Ein weiteres Beispiel ist, dass im Gebirge der Eindruck einer Versteilung von Hangflächen und eines Überkippens hoher Berge in Richtung des Sensors in der Radarabbildung entsteht. Je kleiner der Blickwinkel bzw. Einfallswinkel ist, umso stärker tritt Layover auf (vgl. Abb. 2.4 a und b). Layover-Gebiete erscheinen heller als andere Bereiche, aufgrund der Überlagerung von mehreren Signalen von verschiedenen Positionen. Wenn die Neigung  $\alpha$  einer weggegeneigten Fläche relativ flach ist, d.h. größer ist als  $(90^\circ - \theta_i)$  kommt es beispielsweise zu einer Überlagerung mit den Radarechos der dem Sensor zugeneigten (verkippten) Fläche. Wenn die Hangneigung der zugeneigten Fläche größer als der lokale Einfallswinkel ist und die weggegeneigte Fläche sehr steil ist ( $> (90^\circ - \theta_i)$ ), dann kommt es zu einer Überlagerung von Layover und Schatten. Einen Sonderfall stellt beispielsweise der „Inseleffekt“ dar, wo durch Layover Bergspitzen erzeugt werden, die von Pixeln ohne Informationen umgeben sind, oder auch die sogenannten „black holes“ bei steilen Bergen am near-range Bildrand (Schreier, 1993).

Mit nur einer SAR-Aufnahme ist Layover grundsätzlich nicht korrigierbar, auch nicht mit Hilfe eines Höhenmodells (Meier, 1989), da die Informationsüberlagerung keine eindeutige räumliche Zuordnung der Signale mehr zulässt. Abb. 2.3 verdeutlicht dies beispielhaft. Die Form der Pyramiden bleibt nach der Projektion in die Ground-Range Geometrie erhalten und Verkürzungen werden reduziert, während sich Layover-Effekte verstärken. Die Methode der sogenannten *SAR-Tomographie* (kurz: TomoSAR) erlaubt es, anhand von *multi-pass* SAR-Aufnahmen, solche Überlagerungen von Rückstreuungen in SAR-Bildern aufzulösen und somit Fehlinterpretationen zu verhindern (siehe Kapitel 2.2.4). Da die Anwendung der SAR-Tomographie mit satellitengetragenen Systemen nach aktuellem

Forschungsstand begrenzt ist, ist es empfehlenswert bei SAR-Bildauswertungen Layover-Bereiche bei der Georeferenzierung auszumaskieren.

Eine sehr wichtige Größe zur Rekonstruktion der Beleuchtungsverhältnisse während einer Aufnahme und Berechnung von Layover-Karten unter Nutzung eines DHMs ist der lokale Einfallswinkel  $\theta_{li}$  des Radarstrahls, der sich normalerweise auf die Flächennormale eines Rückstreuerelements bezieht (vgl. Anhang A.3). Kropatsch & Strobl (1990) zeigen jedoch auch, dass die Erstellung von Layover- und Schatten-Karten auch ohne Berechnung des Einfallswinkel, d.h. durch Vernachlässigung der realen SAR-Aufnahmeprozesses und Bestimmung der Sichtbarkeit anhand eines Höhenmodells erfolgen kann. Meier (1989) verdeutlicht dies durch kontinuierliche Abtastung eines Höhenmodells in Range-Richtung und Berechnung der Entfernungen, die als Entscheidungskriterium für die Bestimmung der Layover- und Schattenbereiche dienen.

### 2.1.1.2. Radarschatten

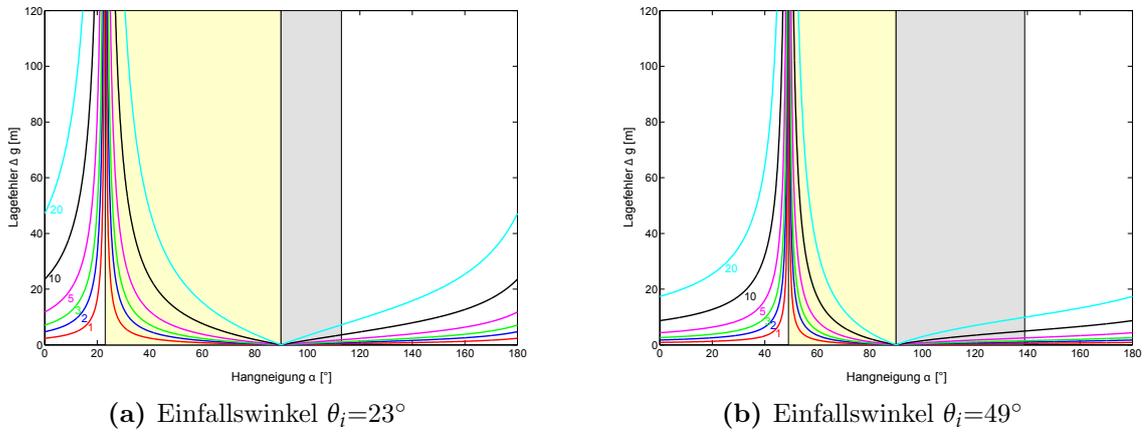
Radarschatten (*Shadow*) tritt in verdeckten Bereichen auf, d.h. wenn Objektpunkte vom Radarstrahl nicht erreicht werden (Abb. 2.3). Dies ist der Fall, wenn die Neigung  $\alpha$  der von dem Sensor weggeneigten Flächen größer als der lokale Einfallswinkel  $\theta_{li}$  ist. Schattenbereiche treten stärker in Aufnahmen mit großem Blickwinkel auf (vgl. Abb. 2.4 a und b), unter anderem somit auch, wenn sich Objekte weiter weg vom Nadir befinden. Anders als bei optischen Bildern wo Schattenbereiche nur schwächer beleuchtete Bereiche sind, tritt beim Radarschatten keine Interaktion zwischen der Radarstrahlung und der Objektoberfläche auf. In der Praxis sind Radarschatten aber nicht komplett schwarz, sondern sie enthalten auch Hintergrundrauschen des Sensors. Die Berechnung des Radarschattens ist insbesondere hinsichtlich der Identifizierung von Bereichen sinnvoll, in denen keine radarinterferometrischen Ergebnisse abgeleitet werden können. Anhand von Layover und Schatten ist es außerdem möglich, die Höhen von Objekten (z.B. Gebäuden) zu bestimmen, wie im folgenden Abschnitt 2.1.1.3 mit erläutert wird.

### 2.1.1.3. Lageverschiebungen in Range

Die aufnahme- und topographiebedingten Verschiebungen von Objektpunkten im Radarbild, die unter anderem auch für den Layover-Effekt verantwortlich sind, müssen bei der Georeferenzierung, z.B. unter Verwendung von Höheninformationen, korrigiert werden. Erfolgt dies nicht, entstehen horizontale Lagefehler, die abhängig sind von der Objekt- oder Geländehöhe  $h$ , vom Einfallswinkel  $\theta_i$  und von der Neigung  $\alpha$  des Flächenelements. Die Auswirkungen unberücksichtigter oder fehlerhafter Höheninformationen auf die Lage eines Objektes sind hauptsächlich horizontale Fehlpositionierungen  $\Delta g$  in Aufnahme-Richtung und können nach Meier (1989) unter Berücksichtigung der Geländeneigung  $\alpha$  wie folgt berechnet werden (Formelherleitung siehe Anhang C.1):

$$\Delta g = \frac{\Delta h \cdot \cos \theta_i \cdot \cos \alpha}{\sin(\theta_i - \alpha)} \quad (2.8)$$

Je größer der gewählte Blickwinkel  $\theta$  bzw. Einfallswinkel  $\theta_i$  ist, umso geringer wirken sich Höhenfehler auf die Lage von Objekten im Radarbild aus (Abb. 2.4).



**Abbildung 2.4.:** Positionierungsfehler in Abhängigkeit von der Hangneigung  $\alpha$  ( $x$ -Achse) und dem Höhenfehler  $\Delta h$  (farbige Linien; 1, 2, 3, 5, 10, 20 m). Layover (hellgelb) tritt auf, wenn die Hangneigung  $\alpha$  größer als der Einfallswinkel  $\theta_i$  ist. Schatten (grau) tritt dagegen bei den vom Sensor abgewandten Flächen auf.

Beispielsweise bei einer TerraSAR-X Aufnahme mit einem Einfallswinkel  $\theta_i=30^\circ$  und einer Geländeneigung von  $\alpha=0^\circ$  ergibt sich bei einem Höhenfehler von 20 m ein Lagefehler von 35 m, was bei einer Bodenauflösung  $<3$  m relativ beträchtlich ist. Bei Wahl eines größeren Blickwinkels und damit Einfallswinkels ( $\theta_i=45^\circ$ ) beträgt der Lagefehler nur 20 m. Insbesondere bei objektspezifischen Deformationsmessungen können solche Lagefehler zu deutlichen Fehlinterpretation führen. Dies zeigt zum einen die Notwendigkeit von hochgenauen Höheninformationen bei der radarinterferometrischen Auswertung, zum anderen die Bedeutung der Auswahl eines geeigneten Blickwinkels. Letzteres ist dabei nicht nur vom Geländetyp abhängig, sondern auch von den sich darauf befindlichen Objekten (hohe Gebäude) und der Aufgabenstellung (Erfassung vertikaler oder horizontaler Bewegungen).

Bei flachem Gelände eignen sich meist größere Blick- bzw. Einfallswinkel (z.B.  $\theta_i=49^\circ$ ), aufgrund der geringeren Lagefehler sowie geringeren Layover- und Foreshortening-Effekte (vgl. Kapitel 2.1.1.1), jedoch mit dem Nachteil längerer Schatten. Anhand von Layover und Schatten lässt sich durch Umstellung der Formel 2.8 auch die Höhe von Objekten bestimmen (Sörgel, 2003).

Die kritische Höhendifferenz für Objekte (z.B. Gebäude) bei denen noch kein Layover auftritt, lässt sich durch Umstellen von Formel 2.8 nach  $\Delta h$  und Berücksichtigung der Bodenauflösung  $\rho_r$  berechnen. Beispielsweise treten bei ERS-1/-2 Daten ( $\theta_i=23^\circ$ ,  $\alpha=0^\circ$ ,  $\rho_r \approx 11$  m) Layover-Effekte bei Gebäudehöhen von größer 5 m auf, aufgrund des steilen Blickwinkels. Bei TerraSAR-X Aufnahmen mit  $\theta_i=42^\circ$  (und  $\alpha=0^\circ$ ,  $\rho_r \approx 1.1$  m) verursachen bereits Objekte höher als 1 m Layover-Effekte.

#### 2.1.1.4. Spezielle Effekte

Neben den bisher genannten geometrischen Verzerrungen gibt es noch weitere aufnahmebedingte Effekte, von denen einige kurz erläutert werden. Dabei soll nicht auf Auswirkungen eingegangen werden, die nur bei flugzeuggetragenen Systemen auftreten (Klausing & Holpp, 2000).

**Mehrfachreflexionen** an Objekten treten auf, wenn die Radarstrahlen nicht direkt zum Sensor reflektiert werden und es zu einem Entfernungsverzögerungseffekt (*range delay effect*) kommt (Schreier, 1993). Entsprechend werden die Objekte weiter weg versetzt in Range-Richtung dargestellt, was zu Signalüberlagerungen führt. Mehrfachreflexionen treten insbesondere in Bereichen mit eng stehenden Objekten mit guten Rückstreuungseigenschaften auf, z.B. in dicht bebauten Städten und bei Verkehrswegen mit Brücken und weit über die Fahrbahn reichenden Verkehrsschildern (Wessel, 2006). Insbesondere in dicht bebauten Räumen ermöglicht die SAR-Tomographie zukünftig die Trennung solcher unterschiedlicher Rückstreuemechanismen innerhalb einer Auflösungszelle. Bei aktuellen SAR-Auswerteverfahren sind solche Effekte nicht korrigierbar und führen zu Lagefehlern im geokodierten Bild, was insbesondere bei Deformationsmessungen in dicht bebauten Stadtbereichen problematisch ist. Unter Nutzung echter 3D-Höhenmodelle und Simulation des Signalweges können solche Bereiche ausmaskiert werden.

**Objektbewegungen** verursachen Dopplerverschiebungen und führen in Abhängigkeit der Objektgeschwindigkeiten zu Abbildungsfehlern in einem Radarbild z.B. bei sich bewegenden Fahrzeugen (Meyer & Hinz, 2004). Da bei der Betrachtung eines interferometrischen Datenstapels solche Objekte räumlich stark versetzt bzw. nicht mehr auffindbar sind, treten an einzelnen Pixeln Phasendekorrelationen auf. Hinsichtlich der radarinterferometrischen Auswertung, z.B. zur Überwachung von Bodenbewegungen, spielen diese Effekte an Einzelpixeln keine Rolle.

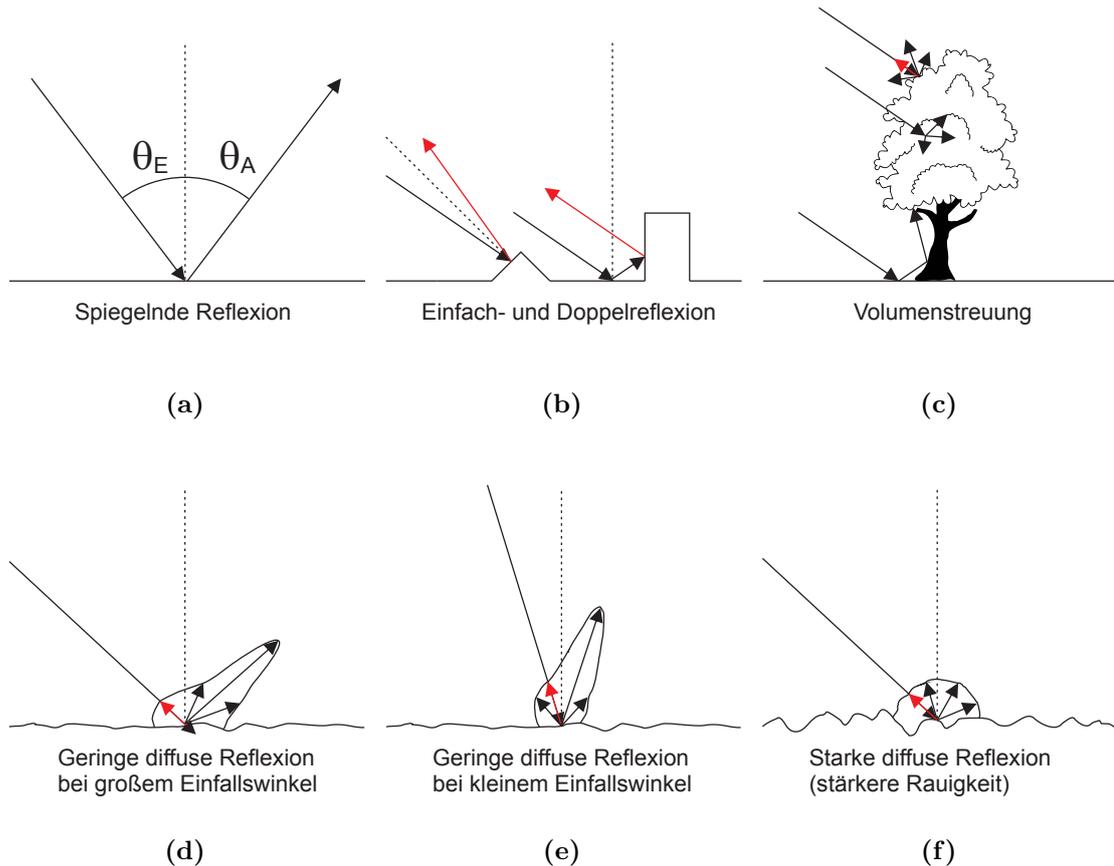
**Entfernungsmehrdeutigkeiten** treten auf, wenn die Laufzeit eines Impulses vom Sensor zum Objekt und zurück größer als die Pulswiederholrate ist und somit die Eindeutigkeit der Abstandsmessung zwischen zwei Impulsen nicht mehr gegeben ist. Hauptursache sind Nebenkeulen der Radarantenne mit geringen Leistungsanteilen, die zu falschen Positionierungen der Bildpunkte in Range- und Azimutrichtung, zu so genannten „Geisterbildern“, führen können (Massonnet & Souyris, 2008).

#### 2.1.2. Radiometrische Eigenschaften

In diesem Abschnitt wird kurz auf die radiometrischen und statistischen Eigenschaften von Radardaten eingegangen sowie einige Rückstreuemechanismen erläutert, die für die topographische Phasenkorrektur unter Berücksichtigung der tatsächlichen Rückstreuoberfläche relevant sind. Im Anhang B findet sich eine kurze Erläuterung der Radargleichung und dem Signal-Rausch-Verhältnis. Auf die statischen Eigenschaften eines SAR-Pixels und die Ursachen für den so genannten Speckle-Effekt wird in Anhang B.2 eingegangen.

## 2.1.2.1. Rückstreumechanismen an der Erdoberfläche

Reflexionen von elektromagnetischen Wellen an der Erdoberfläche sind laut [Klausing & Holpp \(2000\)](#) im Allgemeinen Streuungen, da die Fresnelschen Reflexionsformeln nur bedingt, z.B. bei großen Wellenlängen über glatten Wasserflächen, gelten. Sie sind sehr stark abhängig von der Oberflächenrauigkeit<sup>2</sup>. Es wird zwischen der Oberflächenstreuung (z.B. am Boden) und der Volumenstreuung (z.B. bei Vegetation) unterschieden (Abb. 2.5).



**Abbildung 2.5.:** Darstellung unterschiedlicher Rückstreumechanismen; (a-b) und (d-f): Oberflächenstreuung, (c): Volumenstreuung

Die *Spiegelnde Reflexion* (Totalreflexion), als Spezialfall der Oberflächenstreuung, tritt bei glatten Oberflächen auf, und führt nicht zwangsweise zu hohen Rückstreuwerten im Radarbild, da der einfallende Impuls vom Sensor wegreflektiert werden kann. Die Rückstreuung wird im Allgemeinen wesentlich beeinflusst durch die Topographie, da der Rückstreuoeffizient  $\sigma^0$  mit dem lokalen Einfallswinkel des Radarstrahls variiert (vgl. Kapitel A.3). Helle, radiometrisch gesättigte Bildbereiche können durch extremen Layover

<sup>2</sup>Eine Fläche kann unter Berücksichtigung des *Rayleighschen* Rauigkeitskriteriums ([Massonnet & Souyris, 2008](#)) als „eben“ betrachtet werden, wenn für die Höhenschwankung  $\Delta h$  folgendes gilt:  $\Delta h < \frac{\lambda}{8 \cdot \sin \gamma}$ . Die Rauigkeit ist abhängig vom Streifwinkel  $\gamma$ , unter dem die Welle bezogen auf die Geländeoberfläche einfällt. Raue Oberflächen ( $\gamma=45^\circ$ ):  $\Delta h > 0.5$  cm (X-Band,  $\lambda=3$  cm),  $\Delta h > 4.2$  cm (L-Band,  $\lambda=24$  cm). Je größer die Rauigkeit ist, umso stärker wird die Rückstreuung.

und Foreshortening verursacht werden, schwarze energiefreie Bereiche durch Abschattungen.

Die Magnitude der Rückstreuung und deren Veränderung als Funktion der Sensorparameter (Wellenlänge, Blickrichtung und Polarisation) ist des Weiteren abhängig von verschiedenen Objektparametern (Größe, Form, Struktur, Dichte, Rauigkeit, Orientierung, Objektlage zueinander, elektrische Eigenschaften<sup>3</sup>) und beeinflusst unter anderem auch die Eindringtiefe der Radarstrahlung. Die Höhe des Phasenrückstreucentrums (*scattering phase center*) ergibt sich durch die Eindringtiefe und repräsentiert die tatsächliche Rückstreu-“Oberfläche“. Sie ergibt sich durch das Zusammenspiel unterschiedlicher Rückstreumechanismen innerhalb einer Auflösungszelle und befindet sich beispielsweise bei Vegetation oberhalb der kahlen Erdoberfläche (=Geländeoberfläche), aber unterhalb der Baumkronenoberfläche (Kellndorfer et al., 2004). Struktur-, topographie- und feuchtigkeitsbedingte Unterschiede haben einen direkten Einfluss auf die Höhe des Phasenzentrums. Die Rückstreumechanismen an der Erdoberfläche sind entsprechend sehr komplex, vor allem in Vegetationsbereichen sowie in dicht bebauten Gebieten. Eine Unterscheidung der unterschiedlichen Rückstreumechanismen ist mit der sogenannten *Polarimetrischen SAR-Interferometrie* (PolInSAR) möglich. Die Polarimetrie macht sich die Änderung der Schwingungsrichtung (Polarisation<sup>4</sup>) der elektromagnetischen Strahlung bei der Reflexion an unterschiedlichen Objekten zu Nutze, um diese zu unterscheiden. Bei der SAR-Polarimetrie, d.h. bei der zusätzlichen Nutzung der Phaseninformation einer SAR-Aufnahme, kann zwischen den Echos aufgrund von Einfachreflexionen (*single-bounce*, gehören zu den *odd-bounce*), Zweifach- bzw. Doppelreflexionen (*double-bounce*, gehören zu den *even-bounce*) und der diffusen Volumenstreuung (z.B. an Blättern und Zweigen) unterschieden werden (vgl. Abb. 2.5 b-c) (Cloude & Papathanassiou, 1998). Eine zusätzliche Trennung der Rückstreusignale nach der Höhe ist wiederum in Verbindung mit der SAR-Tomographie möglich (siehe Kapitel 2.2.4), wie Reigber & Moreira (2000) erstmalig erfolgreich mit flugzeuggetragenen L-Band SAR-Daten in einem städtischen Bereich mit Vegetation zeigen konnten.

### Eindringtiefe

Die Eindringtiefe in Oberflächen und Oberflächenschichten ist neben den Objekteigenschaften abhängig von den Eigenschaften der ausgesendeten Radarstrahlung: Frequenz, Polarisation und Blickrichtung.

**Frequenzabhängigkeit.** Niedrige Frequenzen (L-Band) dringen tiefer z.B. in Böden, Gletscher, Vegetation ein als hohe Frequenzen (X-, C-Band) (JPL, 1986) und erreichen beispielsweise bei Vegetation auch die Geländeoberfläche. Aufgrund der stärkeren Rückstreuung vom Boden verschiebt sich die Höhe des Phasenzentrums entsprechend näher zum Boden und wird somit kleiner bei höheren Frequenzen (Sarabandi & Lin, 2000). Baumkronen sind quasi-transparent für L-Band Strahlung, während sie hingegen eher

---

<sup>3</sup>Objekte mit hoher dielektrischer Konstante wie z.B. metallische Gegenstände reflektieren sehr stark.

<sup>4</sup>Reflexionen an Objekten können aufgrund von geometrischen und physikalischen Eigenschaften zur Richtungsänderung der Schwingungsebene des E-Feldes (H- horizontal, V- vertikal) führen. HH = H gesendet, H empfangen; VV = V gesendet, V empfangen, HV = H gesendet, V empfangen.

undurchlässig gegenüber dem X-Band sind. Relevante Objekteigenschaften, die die Eindringtiefe aufgrund der starken Wechselwirkungen der Signale beeinflussen, sind zum einen die Homogenität der Oberflächenschichten (z.B. in Vegetationsbeständen: Baumkrone, Blätter und Zweige, Baumstamm, Bodenschicht), zum anderen die Oberflächenstruktur (z.B. Baumart), -höhe und -dichte (z.B. Lücken im Kronendach). Die Änderung der Wechselwirkungen der Signale ist bei Vegetationsbedeckung jahreszeitlich bedingt. Je dichter die Vegetation ist, umso geringer ist die Eindringtiefe. Je höher die Vegetation ist, umso größer ist die Eindringtiefe (Zunahme-Verhältnis ca. 1:0.8 m) (Kellndorfer et al., 2004). Typische Eindringtiefen für Bereiche mit dichter Vegetationsbedeckung, wie sie speziell bei Wäldern vorkommt, betragen 1 m im X-Band, 6 m im C-Band und bis zu 20 m im L-Band (Massonnet & Souyris, 2008). Verschiedene Untersuchungen an unterschiedlichen Waldbeständen weltweit zeigen jedoch, dass Radarstrahlung auch deutlich stärker in Vegetation eindringen kann. Je nach Frequenzband variiert die Eindringtiefe im Mittel zwischen 60 m beim P-Band, 40 m beim L-Band und 20 m beim C-Band laut Kugler et al. (2006) am Beispiel von forstwirtschaftlich genutzten homogenen Nadelwäldern in gemäßigten Breiten. Solberg et al. (2007) zeigen am Beispiel von SRTM-X Daten (Kapitel 2.4.1.3), dass das X-Band im Mittel etwa 6 m in Baumkronen (überwiegend Norwegische Fichten) eindringen kann, was auch mit Ergebnissen von Kellndorfer et al. (2004) am Beispiel von Kieferplantagen in Georgia (USA) sowie von Garestier et al. (2008) am Beispiel eines lichten Kiefernwaldes übereinstimmt. Dagegen erreicht das C-Band von SRTM Eindringtiefen von beispielsweise 8-10 m bei dichten Nadelwäldern (Weydahl et al., 2007). Beim X-Band finden hauptsächlich Interaktionen mit Blättern statt, während das Rückstreusignal beim C-Band dominiert wird durch Zweige und Äste und somit tiefer eindringt.

**Polarisationsabhängigkeit.** Simulationen von Sarabandi & Lin (2000) zeigen, dass die aus C-Band Daten abgeleiteten Höhen für Nadelwälder etwa 1-2 m niedriger sind für HH-polarisierte Daten im Vergleich zu VV-polarisierten Daten. Dies gilt grundsätzlich für die meisten Waldbestände, da die Rückstreuung „Boden-Baumstamm“ (*double-bounce*) für HH-polarisierte Daten dominanter ist als für VV-polarisierte. Bei Laubwäldern sind die Differenzen bzgl. der abgeleiteten Höhen klein bzw. nicht signifikant. Je geringer die Vegetationsdichte ist, umso größer sind die Höhendifferenzen der Phasenzentren bei unterschiedlich polarisierten Daten (Garestier et al., 2008). Die geringste Sensitivität gegenüber Änderungen der Vegetationsdichte zeigen HH-polarisierte L-Band Daten, da die Boden-Rückstreuung beim L-Band dominant bleibt (Sarabandi & Lin, 2000). Mit Zunahme der Bodenfeuchtigkeit (höhere dielektrische Konstante), erhöht sich wiederum die Reflexion am Boden für alle Polarisierungen geringfügig, so dass die Bodenrückstreusignale dominanter werden und die Höhe des Phasenrückstreuzentrums abnimmt (d.h. die Eindringtiefe erhöht sich) (Sarabandi & Lin, 2000).

**Blickwinkelabhängigkeit.** Blickwinkeländerungen führen nur zu geringen bis keinen Höhenänderungen des Rückstreuphasenzentrums bei Vegetation (1-2 m für  $\theta=30-60^\circ$  bei Nadelwäldern; keine signifikanten Änderungen bei Laubwäldern), wie Sarabandi & Lin (2000) zeigen. Vegetation, insbesondere mit geschlossenen Baumkronen, wird grundsätzlich von steiler einfallenden Radarstrahlen stärker durchdrungen (Kellndorfer et al., 2004).

### 2.1.3. Satellitengestützte SAR-Systeme

Mit dem Start des zivilen Erdbeobachtungssatelliten ERS-1 im Juli 1991 stand erstmalig ein SAR-Sensor zur Verfügung, der regelmäßig SAR-Aufnahmen von der Erdoberfläche lieferte und somit die Anwendbarkeit der Radarinterferometrie zur Bodenbewegungsüberwachung ermöglichte. Es folgte im April 1995 der baugleiche Satellit ERS-2 sowie weitere Satelliten mit ähnlicher Bodenauflösung: JERS-1 (1992-1998), Radarsat-1 (seit 1995) und Envisat ASAR (2002-2010). Mit dem Start von ALOS PALSAR (2006-2011), TerraSAR-X (seit 2007), Radarsat-2 (seit 2007), COSMO-SkyMed (seit 2007) und TanDEM-X (seit 2010) startete eine neue Generation hochauflösender Radarsatelliten, was zu einer erheblichen Steigerung der Qualität von radarinterferometrischen Messungen führte. Im Anhang, Tabelle F.1, sind einige Sensorparameter der aktuell verfügbaren sowie weltweit am häufigsten genutzten SAR-Sensoren zu finden. Um die Datenkontinuität auch zukünftig zu gewährleisten, sind aktuell verschiedene neue zivile Satelliten bzw. Satellitenkonstellationen mit mehreren baugleichen Satelliten durch die internationalen Raumfahrtgesellschaften geplant: HJ-1C (CNSA, S-Band, ab 2011), Sentinel-1A/-1B (ESA, C-Band, ab 2012/2013), ALOS-2 (JAXA, L-Band, ab 2012), SAOCOM (CONAE, L-Band, ab 2012), Radarsat Constellation Mission (CSA, C-Band, ab 2014), TanDEM-L (DLR, L-Band, ab 2015) und TerraSAR-X-2 (DLR, X-Band, ab 2015).

Die neuen Sensoren haben den Vorteil, dass in sehr unterschiedlichen Modi mit unterschiedlichen Blickwinkeln Daten aufgenommen werden können (vgl. Tab. F.1). Die hohe Bodenauflösung, die aus der Erhöhung der Signalbandbreite resultiert, erlaubt zum einen die Überwachung kleinräumiger Objekte, zum anderen aufgrund der zusätzlich hohen Wiederholrate die Erfassung hoher räumlicher und zeitlicher Bewegungsgradienten (vgl. Kapitel 2.2.2). Sensoren mit kürzeren Wellenlängen (X-/C-Band) sind außerdem empfindlicher gegenüber kleineren Bewegungsraten, leider jedoch auch bezüglich der Atmosphäre, Höhenfehlern (in Abhängigkeit der Basislinie) und vegetationsbedingten Änderungen. L-Band Sensoren bieten den Vorteil, dass Vegetation weitestgehend durchdrungen werden kann und somit in ländlichen Gebieten besser zur Bodenbewegungsüberwachung geeignet sind (vgl. Kapitel 2.1.2.1). Größere Wellenlängen haben außerdem den Vorteil, dass schnelle Bewegungen ohne Phasenabwicklungsfehler selbst bei zeitlich weit auseinander liegenden Aufnahmen erfassbar sind.

Für Nutzer von radarinterferometrischen Produkten zur Überwachung von Bodenbewegungen sind Faktoren wie die Größe des erfassbaren Gebietes, welche mit Zunahme der Bodenauflösung sinkt, sowie die Zuverlässigkeit und Qualität einer SAR-Aufnahme von großer Bedeutung. Durch die kommerzielle Bereitstellung von SAR-Daten ist die Zuverlässigkeit bezüglich der Datenlieferung deutlich gestiegen, auch wenn weiterhin Kundenkonflikte, Wartungsarbeiten oder plötzliche Instrumentenausfälle zu Szenenausfällen und im Extremfall bei einem Totalausfall zum Ende einer begonnenen Messreihe führen können. Die Qualität der Bodenbewegungsmessung konnte bei neueren Sensoren u.a. durch präzisere Orbitdaten sowie die Begrenzung der räumlichen Basislinie verbessert werden (vgl. Kapitel 3). Bezüglich der Detektion und Korrektur atmosphärischer Störeinflüsse besteht weiterhin großer Forschungsbedarf z.B. durch die Entwicklung von Atmosphärenmodellen (vgl. Kapitel 2.2.1).

## 2.2. Radarinterferometrie

Ein SAR-Bild liefert grundsätzlich nur eine 2D-Abbildung der Erdoberfläche. Die SAR-Interferometrie (InSAR) ist ein Messverfahren in der Fernerkundung, bei dem die Erdoberfläche aus zwei leicht unterschiedlichen Aufnahmepositionen betrachtet wird, was eine dreidimensionale Erfassung von Objekten ermöglicht. Der Abstand zwischen den beiden Aufnahmepositionen  $S_1$  und  $S_2$  bezeichnet man als Basislinie<sup>5</sup>  $B$  (siehe Abb. 2.6). Fundamentale Messgröße der SAR-Interferometrie ist die gemessene Phase (vgl. Kapitel B.2), genauer gesagt die Phasendifferenz, die aus zwei SAR-Bilder pixelweise berechnet werden kann. Die SAR-Interferometrie kann in zwei verschiedenen Modi betrieben werden (Moreira, 2000):

- **Across-Track-Interferometrie (XTI)**. Die Antennenanordnung wird so gewählt, dass sich quer zur Flugrichtung eine Basislinienkomponente ergibt und somit ein räumlicher Winkel quer zur Flugrichtung aufgespannt wird. Dies kann zur Bestimmung der Geländetopographie dienen.
- **Along-Track-Interferometrie (ATI)**. Die Antennen sind zueinander in Flugrichtung versetzt, so dass sich in Flugrichtung eine Basislinienkomponente ergibt. Dies dient beispielsweise zur Messung von Geschwindigkeiten von sich bewegenden Zielen z.B. Fahrzeugen.

Bei der *Single-Pass-Interferometrie* werden die zwei SAR-Aufnahmen zeitgleich gemacht, was durch die Anordnung zweier Empfangsantennen auf einer Plattform realisiert wird. Die wiederholte SAR-Aufnahme eines Gebietes mit der gleichen Empfangsantenne bezeichnet man als *Repeat-Pass-Interferometrie*. XTI und ATI kann mit beiden Anordnungen durchgeführt werden.

Im Fall von radarinterferometrischen Bodenbewegungsmessungen nutzt man die Basislinie quer zur Flugrichtung (Across-Track-Interferometrie), die sich durch den wiederholten Überflug im zeitlichen Abstand  $\Delta t$  (Wiederholzyklus), d. h. im Repeat-Pass-Modus, ergibt.

### 2.2.1. Die interferometrische Phase

Die Messgröße der SAR-Interferometrie ist die Phase, die den Schwingungszustand des am Empfänger eintreffenden Signals im Wertebereich zwischen  $[-\pi, +\pi]$  angibt. Sie stellt einen Bruchteil der genutzten Wellenlänge dar.

Die Phase eines jeden Pixels einer SAR-Aufnahme ist zum einen abhängig vom Signalweg  $R$  zwischen dem Sensor (bzw. genauer des Phasenzentrums) und den Rückstreueobjekten unter Berücksichtigung der Signalausbreitungsgeschwindigkeit und der doppelten Wegstrecke „Sensor - Objekt - Sensor“ ( $2R$ ). Andererseits kommt es aufgrund der Rückstreuung

<sup>5</sup>Die Basislinie  $B$  wird üblicherweise als Vektor zwischen den beiden Flugpfaden bestimmt, wenn der Satellit beim wiederholten Überflug den Dopplerkegel der Referenzaufnahme passiert. Damit gilt:  $\vec{B} \perp \vec{v}_S$ .

beliebig vieler Objekte innerhalb einer Auflösungszelle zu einer Streukomponente  $\phi_{\text{Streu}}$ , die zu einer Phasenverschiebung führt (vgl. Kapitel B.2). Die gemessene Phase wird außerdem überlagert durch das thermische Rauschen des Empfängers  $\phi_n$ . Erfolgt eine zweite Aufnahme zu einem anderen Zeitpunkt (Repeat-Pass Modus), können somit zwei Gleichungen aufgestellt werden (Scheiber, 2004):

$$\phi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot R_1 + \phi_{n,1} + \phi_{\text{Streu},1} \quad (2.9)$$

$$\phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot R_2 + \phi_{n,2} + \phi_{\text{Streu},2} \quad (2.10)$$

Die folgenden Formeln und Betrachtungen beziehen sich nur auf die Repeat-Pass-Interferometrie, die Voraussetzung für die Messung von Bodenbewegungen ist.

Durch die komplexe Multiplikation der beiden SAR-Signale  $c_{k1}$  und  $c_{k2}$  (vgl. Formel B.4) ergeben sich die Phasendifferenzen, d.h. die interferometrischen Phasen  $\phi_{\text{InSAR}}$ :

$$\phi_{\text{InSAR}} = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot (R_1 - R_2) = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta R \quad (2.11)$$

Das Phasendifferenzbild bezeichnet man als Interferogramm. Bei einem guten SNR-Wert können  $\phi_{n,1}$  und  $\phi_{n,2}$  vernachlässigt werden. Trotz der leicht unterschiedlichen Aufnahmegeometrie sind  $\phi_{\text{Streu},1}$  und  $\phi_{\text{Streu},2}$  etwa gleich, was jedoch nur bedingt für Flächenziele gilt (vgl. Anhang B.2), und zwar wenn die Satellitenpositionen ausreichend nah beieinander liegen und die physikalischen Charakteristiken konstant bleiben (Hanssen, 2001). Ansonsten entsteht ein zusätzliches Phasenrauschen in Abhängigkeit von der Basislinie (geometrische Dekorrelation). Bei Punktzielen ist die Phasenverschiebung aufgrund der Rückstreuung identisch  $\phi_{\text{Streu},1} = \phi_{\text{Streu},2}$ . Die interferometrische Phase  $\phi_{\text{InSAR}}$ , mit Werten im Bereich von  $[-\pi, +\pi]$  (1 Phasenzklus = 1 Fringe), ist proportional zum Wegunterschied der Signale  $\Delta R$  und hochgradig mehrdeutig, d.h. gleiche Phasendifferenzen entsprechen nicht gleichen absoluten Entfernungsdifferenzen  $\Delta R$ .

Die Änderung der Signalweglänge  $\Delta R$  zwischen den beiden Aufnahmepositionen und einem Objektpunkt an der Erdoberfläche führt zu Phasendifferenzen und ist abhängig von folgenden Faktoren:

1. **Aufnahmegeometrie.** Diese wird bestimmt durch den Abstand zwischen den Sensorpositionen  $S_1$  und  $S_2$  quer zur Flugrichtung (= geometrische Basislinie  $B$ ) sowie den Blickwinkel  $\theta$  und dem Basislinienwinkel  $\xi$  (Abb. 2.6). Der Wegunterschied der Signale  $\Delta R$  ergibt sich grundlegend in Abhängigkeit von der Basislinie aufgrund der Schrägsicht näherungsweise über:

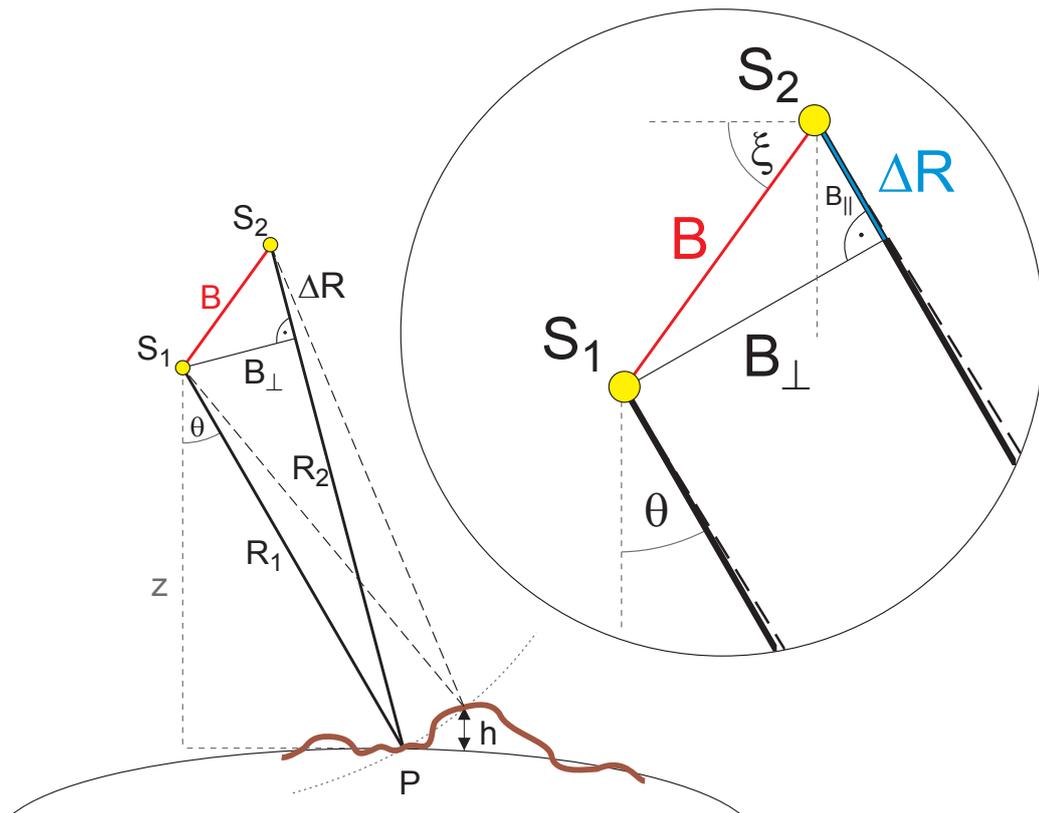
$$\Delta R = B \cdot \sin(\xi - \theta) \quad (2.12)$$

Die Näherung basiert auf der so genannten „far field“ oder „parallel-ray“ Approximation von Zebker & Goldstein (1986), da die Basislinie  $B$  sehr viel kleiner als die Entfernung  $R$  ist. Es kann von der vereinfachten Annahme ausgegangen werden, dass die Blickrichtungen näherungsweise parallel und die lokalen Blickwinkel  $\theta$  somit identisch sind (vgl. Abb. 2.6). Die resultierende Phasendifferenz bezeichnet man

als geometriebedingte Phasenkomponente  $\phi_{\text{geom}}$  oder auch „flat-earth“ Einfluss, da durch die Schrägsicht der SAR-Sensoren selbst bei Betrachtung einer flachen Erde Änderungen der Phasendifferenzen entstehen. Sie ist Teil der so genannten aufnahmebedingten interferometrischen Phase und ergibt sich durch Einsetzen von Formel 2.12 in Formel 2.11:

$$\phi_{\text{geom}} = -\frac{4\pi \cdot B}{\lambda} \cdot \sin(\xi - \theta) = -\frac{4\pi \cdot B_{\parallel}}{\lambda} \quad (2.13)$$

Der Einfluss der flachen Erde führt zu einer kontinuierlichen Änderung der Phase in Entfernungsrichtung und zu einem parallelen Streifenmuster im Interferogramm (Meyer, 2004) (vgl. Abb. 2.7 e). Die Korrektur der durch die Aufnahmegeometrie bedingten Phase erfolgt unter Nutzung einer Referenzfläche z.B. ein bestmöglich angepasstes Ellipsoid. Zur Rekonstruktion der Aufnahmegeometrie sind Informationen über die Orbits in Form von Satelliten-Ephemeriden oder Ortsvektoren zu diskreten Zeitpunkten notwendig (Meyer, 2004). Ungenauigkeiten in den Orbitdaten wirken sich auf die Basislinienbestimmung aus und führen zu Restphasenrampen im Interferogramm.



**Abbildung 2.6.:** Interferometrisches Messprinzip mit zwei SAR-Aufnahmen von den Satellitenpositionen  $S_1$  und  $S_2$ . Der Weglängenunterschied  $\Delta R$  ergibt sich aufgrund der Basislinie  $B$ , dem Basislinienwinkel  $\xi$  und dem Blickwinkel  $\theta$ . Da  $B \ll R$  und der Blickwinkelunterschied sehr klein ist, können die beiden Blickrichtungen näherungsweise parallel betrachtet werden. Mit sich ändernder Topographie ändert sich auch  $\Delta R$ .

Beispiel TerraSAR-X ( $H_{\text{sat}}=514 \text{ km}$ ,  $\theta=41^\circ$ ,  $\lambda=3.1 \text{ cm}$ ): Bei einer Basislinie von 500 m mit  $\xi=0^\circ$  ergibt auf einer Distanz von 100 m auf der flachen Erde ein Muster von 2.7 Phasenzyklen (Fringes). Mit zunehmender Entfernung vom Flugpfad und entsprechend größeren Blickwinkeln sinkt die Fringe-Rate. Je größer die Basislinie wird, umso größer wird die Fringe-Rate.

2. **Topographie.** Höhenunterschiede der Gelände- und Objektoberfläche verursachen einen weiteren aufnahmebedingten Phasenanteil, den topographiebedingten Phasenanteil. Der Wegunterschied  $\Delta R$  in Abhängigkeit von der ellipsoidischen Höhe  $h$  und der Vertikalkomponente  $z$  der Schrägdistanz  $R_1$  (vgl. Abb. 2.6) ergibt sich durch Einsetzen von

$$\cos \theta = \frac{z - h}{R_1} = \cos \theta_0 - \frac{h}{R_1} \quad (2.14)$$

mit  $z \neq H_{\text{sat}}$ , in Formel 2.12, anschließende Taylorentwicklung um  $h = 0$  und Abbruch nach dem quadratischen Term (Schwäbisch, 1995):

$$\Delta R_h = B \cdot \sin(\xi - \theta_0) + \frac{B \cdot \cos(\xi - \theta_0)}{R_1 \cdot \sin \theta_0} \cdot h + \frac{B \cdot \cos \xi}{2 \cdot R_1^2 \cdot \sin^3 \theta_0} \cdot h^2 \quad (2.15)$$

Der Blickwinkel  $\theta_0$  bezieht sich auf die Referenzfläche, z.B. das Ellipsoid, d.h.  $\theta_0 = \theta(h=0)$ . Der erste Term stellt den Wegunterschied aufgrund der „flachen Erde“ dar und wurde bereits in Formel 2.12 betrachtet. Da der quadratische Term sehr kleine Werte annimmt, kann er vernachlässigt werden (Schwäbisch, 1995).  $R_1$  beschreibt den Abstand zwischen dem Punkt P und der Orbitposition der Referenzszene. Der Zusammenhang zwischen  $R_1$  und der über der Referenzfläche bekannten Satellitenhöhe  $H_{\text{sat}}$  kann laut Hanssen (2001) näherungsweise mit

$$H_{\text{sat}} \approx R_1 \cdot \cos \theta \quad (2.16)$$

beschrieben werden, jedoch ohne Berücksichtigung der Erdkrümmung (vgl. Formel A.6).

Somit lässt sich der Wegunterschied verursacht durch die Topographie  $\Delta R_h$  wie folgt berechnen:

$$\Delta R_h \approx \frac{B \cdot \cos(\xi - \theta_0)}{R_1 \cdot \sin \theta_0} \cdot h \quad (2.17)$$

Da  $B \ll R$  und parallele Blickrichtungen angenommen werden können, gilt  $\Delta R = B_{\parallel}$  (vgl. Abb. 2.6). Die senkrechte Basislinie  $B_{\perp}$  (*perpendicular baseline*) entspricht:

$$B_{\perp} = B \cdot \cos(\xi - \theta) \quad (2.18)$$

Anhand Formel 2.11 ergibt sich damit der topographiebedingte Phasenanteil  $\phi_{\text{topo}}$ , wobei  $\theta_0 \approx \theta$ .

$$\phi_{\text{topo}} = -\frac{4\pi \cdot B_{\perp}}{\lambda \cdot R_1 \cdot \sin \theta_0} \cdot h \approx -\frac{4\pi \cdot B_{\perp}}{\lambda \cdot R_1 \cdot \sin \theta} \cdot h \quad (2.19)$$

Die topographiebedingte Phasenkomponente verformt die Phasenmuster, die sich aufgrund der flachen Erde ergeben (vgl. Abb. 2.7 b). Die durch die Topographie

verursachten interferometrischen Phasen (Abb. 2.7f) können als Höhenlinien gedeutet werden, wobei gleiche Phasendifferenzen unterschiedlichen absoluten Höhen entsprechen können. Durch die so genannte Phasenabwicklung (*Phase Unwrapping*) (vgl. Kapitel 2.2.4) werden diese Phasenmehrdeutigkeiten aufgelöst. Je größer die Basislinie ist, umso mehr Phasenzyklen ergeben sich pro Höhenunterschied, was die Genauigkeit der Höhenableitung erhöht, jedoch auch aufgrund der Kohärenzverluste zu größeren Ableitungsschwierigkeiten führt (vgl. Kapitel 2.2.3). Je kleiner die Basislinie ist, umso stärker wirken sich wiederum Basislinienfehler auf die Genauigkeit der Ableitung von Höhen aus Radardaten aus (Hanssen, 2001).

Beispiel TerraSAR-X ( $H_{\text{sat}}=514 \text{ km}$ ,  $\theta=41^\circ$ ,  $\lambda=3.1 \text{ cm}$ ): Bei einer Basislinie von 500 m mit  $\zeta=0^\circ$  werden Höhendifferenzen von etwa 18 m durch 1 Phasenzklus im Interferogramm wiedergegeben.

Die Eliminierung der aufnahmebedingten Phasenkomponenten aus einem Interferogramm ist Gegenstand der differentiellen SAR-Interferometrie (vgl. Kapitel 2.2.2) und erfolgt meist simultan.

3. **Deformation**<sup>6</sup>. Verschiebungen und Verformungen der Erdoberfläche und der sich darauf befindlichen Objekte, die zwischen den beiden SAR-Aufnahmezeitpunkten stattgefunden haben, wirken sich auf die Wegdifferenz  $\Delta R$  aus. Die interferometrische Phase ist sehr empfindlich gegenüber kleinsten Bewegungen, aufgrund der relativ kleinen Wellenlänge der Radarstrahlung (vgl. Formel 2.11). Die Bewegung  $\Delta r$  in Blickrichtung (*line-of-sight*, LOS) entspricht dem Wegunterschied  $\Delta R_{\text{displ}}$  und ist abhängig von der Verschiebungsgeschwindigkeit in LOS-Richtung  $v_{\text{displ}}$  zwischen den beiden Aufnahmen im Zeitabstand  $\Delta t$  (vgl. Abb. 2.9).

$$\Delta R_{\text{displ}} = v_{\text{displ}} \cdot \Delta t = \Delta r \quad (2.20)$$

Die deformationsbedingte Phase  $\phi_{\text{defo}}$  ergibt sich entsprechend Formel 2.11:

$$\phi_{\text{defo}} = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta r \quad (2.21)$$

Beispiel TerraSAR-X ( $\lambda=3.1 \text{ cm}$ ): Ein Phasenzklus entspricht einer Bodenbewegung von 1.55 cm in LOS-Richtung.

4. **Atmosphäre**. Unterschiedliche atmosphärische Bedingungen während der SAR-Aufnahmen führen zu Signalverzögerungen und entsprechend zu Wegdifferenzen  $\Delta R_{\text{atmo}}$ . Ursache dafür sind Refraktionen in der Ionosphäre (dispersiv) und Troposphäre (nicht-dispersiv).

Die ionosphärische Verschiebung  $\Delta R_{\text{iono}}$  ist abhängig vom Elektronengehalt (*total electronic content*, TEC) auf dem Weg, den das Radarsignal zwischen Antenne und Erdoberfläche in Abhängigkeit vom Blickwinkel  $\theta$  durchläuft, sowie der

<sup>6</sup>Der Begriff „Deformation“ findet in diesem Abschnitt teilweise Gebrauch, da er in der radarinterferometrischen Anwendung üblich ist, obwohl er in diesem Zusammenhang fälschlicherweise als Synonym für „Bewegungen“, d.h. horizontale und vertikale Verschiebungen, verwendet wird.

Trägerfrequenz  $f_c$  (Eineder et al., 2011):

$$\Delta R_{\text{iono}} = \frac{K}{f_c^2} \cdot \frac{VTEC}{\cos \theta} \quad (2.22)$$

Die Refraktionskonstante  $K$  beträgt  $40.28 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}$  (Eineder et al., 2011) und wurde von Wild (1994) ermittelt. Der Parameter  $VTEC$  gibt die Anzahl der Elektronen innerhalb eines vertikalen Zylinders an und wird zumeist in der Einheit  $1 \cdot 10^{-16}$  (genannt TECU) angegeben. Typische VTEC-Werte sind 5-10 TECU, wobei bei starken Sonnenaktivitäten Werte von bis 100 TECU erreicht werden können (Eineder et al., 2011). Beim X-Band sind die Ionosphären-Signalverzögerungen relativ klein und vernachlässigbar, während sie insbesondere im L-Band zu sehr starken Verschiebungen führen können. Beispielsweise verursacht ein mittlerer VTEC-Wert von 5 TECU Verschiebungen  $\Delta R_{\text{iono}}(\theta=0^\circ)$  von 2.16 cm im X-Band ( $f_c=9.65$  GHz, TerraSAR-X), 6.89 cm im C-Band ( $f_c=5.405$  GHz, Radarsat-2) und 124.87 cm beim L-Band ( $f_c=1.27$  GHz, ALOS PALSAR) unter der Voraussetzung, dass das SAR-Signal aufgrund der Flughöhe die gesamte Ionosphäre durchläuft. Aktuelle VTEC-Werte für jede Tageszeit werden beispielsweise über GNSS-Netze am Boden bestimmt und können Online abgerufen werden z.B. beim DLR für Europa (SWACI, 2011).

Unabhängig von der Sensorfrequenz bewirken troposphärische Einflüsse Pfadverzögerungen  $\Delta R_{\text{tropo}}$ , die im X-Band dominanter sind als ionosphärische Verschiebungen (Breit et al., 2010). Die Verzögerungen sind abhängig vom Zustand der Atmosphäre, d.h. dem Anteil trockener Gase (hydrostatischer Anteil) und dem Niederschlags- und Wasserdampfgehalt, sowie dem Blickwinkel  $\theta$  und der Geländehöhe  $h$  (Jehle et al., 2008). Unter Annahme eines einfachen Atmosphärenmodells kann die troposphärenbedingte Verschiebung entsprechend Breit et al. (2010) wie folgt berechnet werden:

$$\Delta R_{\text{tropo}} = \frac{ZPD}{\cos \theta} \cdot e^{\left(\frac{-h}{H_{\text{atmo}}}\right)} \quad (2.23)$$

Der ZPD-Wert (*zenit path delay*) setzt sich zusammen aus einem konstanten hydrostatischen Anteil von 2.3 m bezüglich dem Meeresspiegel (Breit et al., 2010) und einem variablen Feuchtigkeitsanteil von bis zu 40 cm (Hanssen, 2001). Damit ergibt sich beispielsweise bei einer Atmosphärendicke von  $H_{\text{atmo}}=6000$  m und  $\theta=41^\circ$  für ein Geländehöhe  $h=0$  m eine Verschiebung  $\Delta R_{\text{tropo}}$  von 3.6 m.

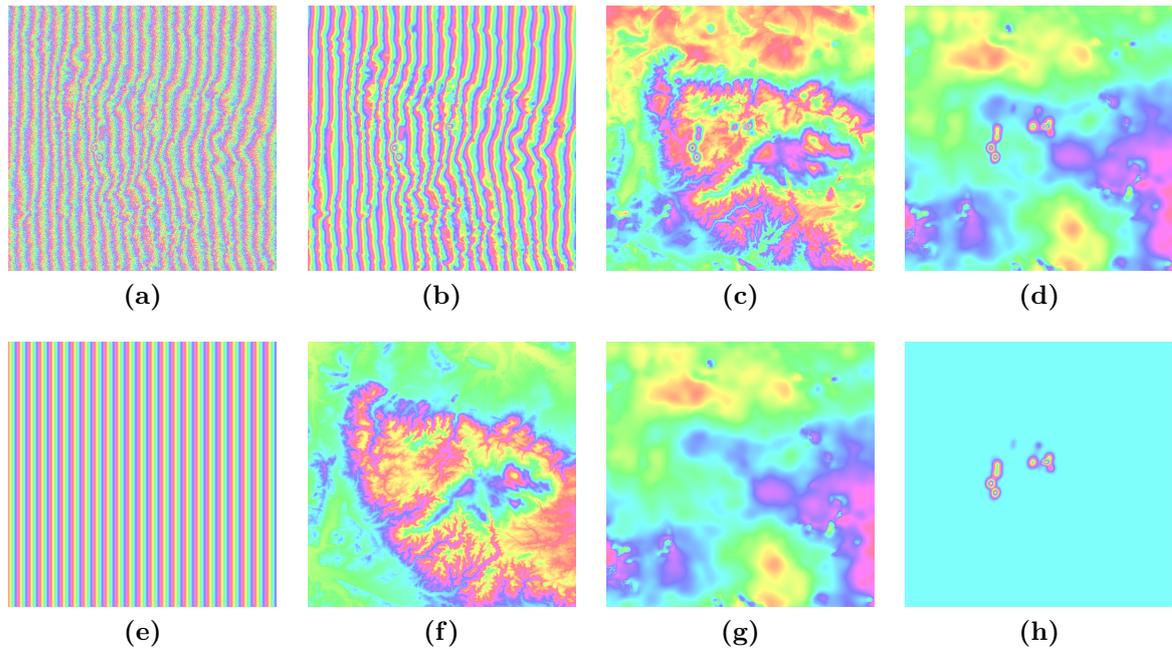
Liegen GNSS-Daten bzgl. der Signalverzögerungen aufgrund von Feuchtigkeit für die GPS-Höhen  $h_{\text{GPS}}$  vor, ergibt sich die troposphärenbedingte Signalverschiebung  $\Delta R_{\text{tropo}}$  nach Eineder et al. (2011) folgendermaßen:

$$\Delta R_{\text{tropo}} = \frac{\Delta R_{\text{tropo,GPS}}}{\cos \theta} \cdot e^{\left(\frac{h_{\text{SAR}}-h_{\text{GPS}}}{H_{\text{atmo}}}\right)} \quad (2.24)$$

Aus der Summe von  $\Delta R_{\text{iono}}$  und  $\Delta R_{\text{tropo}}$  resultiert  $\Delta R_{\text{atmo}}$ . Die atmosphärische Phase ergibt sich nach Formel 2.11 unter Berücksichtigung der Überlagerung zweier verschiedener Atmosphären im Interferogramm:

$$\phi_{\text{atmo}} = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot (\Delta R_{\text{atmo},1} - \Delta R_{\text{atmo},2}) \quad (2.25)$$

Atmosphärische Phasenanteile in Interferogrammen sind zeitlich dekorreliert und können räumlich lokal sehr stark variieren. Häufig sind die Einflüsse räumlich begrenzt und/oder zeigen sich als typische Atmosphärentrends über das gesamte Interferogramm. Da es sich bei atmosphärischen Phasenanteilen um unerwünschte Störeffekte handelt, sollte versucht werden diese Phasenanteile möglichst exakt aus den Interferogrammen zu eliminieren z.B. mittels Modellen, Filtern etc. Die Ableitung von Modellen zeigt [Hanssen \(2001\)](#).



**Abbildung 2.7.:** Zusammensetzung der interferometrischen Phase dargestellt an einem simulierten TerraSAR-X Interferogramm mit  $\theta=40^\circ$  und  $B=10\text{m}$  mit fortlaufender Eliminierung einzelner Phasenanteile (e)-(h) vom Interferogramm (a)-(d). (a) Interferogramm, (b) Interferogramm ohne  $\phi_{\text{noise}}$ , (c) Interferogramm ohne  $\phi_{\text{geom}}$ , (d) Interferogramm ohne  $\phi_{\text{topo}}$ , jedoch mit Deformations- und Atmosphärenanteilen, (e)  $\phi_{\text{geom}}$ , (f)  $\phi_{\text{topo}}$ , (g)  $\phi_{\text{atmo}}$ , (h)  $\phi_{\text{defo}}$ .

Letztendlich setzt sich die interferometrische Phase aus den beschriebenen entfernungsabhängigen geometrischen Phasenanteilen  $\phi_{\text{dist}}$  sowie einem Störungsanteil  $\phi_{\text{noise}}$  zusammen.

$$\phi_{\text{InSAR}} = \underbrace{\phi_{\text{geom}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{defo}} + \phi_{\text{atmo}}}_{\phi_{\text{dist}}} + \phi_{\text{noise}} \quad (2.26)$$

Der Störanteil  $\phi_{\text{noise}}$  basiert auf Signaldekorrelationen (vgl. Kapitel 2.2.3), die definiert werden können als „Rauschen“ (*noise*), welches durch verschiedene Fehlerquellen, die eine relativ kleine Korrelationslänge haben, verursacht wird ([Hanssen, 2001](#)). Das Rauschen in einem Radarbild kann durch Anwendung von Phasenfiltern teilweise reduziert werden. Geeignete Filterverfahren werden beispielsweise von [Schwäbisch \(1995\)](#) vorgestellt.

Unter den Annahmen, dass keine Deformationen zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten stattgefunden haben und ähnliche atmosphärische Bedingungen zu beiden Zeiten vorherrschen (z.B. aufgrund eines zeitlichen Abstandes von nur wenigen Minuten oder

Stunden), können anhand der topographischen Phasen absolute Höhen abgeleitet werden z.B. zur Erstellung eines Digitalen Höhenmodells. Die InSAR-Technik zur Erzeugung von Höhenmodellen wird ausführlich beschrieben bei z.B. Zebker & Goldstein (1986), Madsen et al. (1993), Schwäbisch (1995) und Rosen et al. (2000).

### 2.2.2. Differentielle SAR-Interferometrie

Zur hochgenauen Erfassung von Oberflächenbewegungen eignet sich die Differentielle SAR-Interferometrie (DInSAR), bei der eine Differenzbildung zwischen zwei Interferogrammen erfolgt, welche jeweils eine 2.5D-Abbildung der Erdoberfläche zu unterschiedlichen Zeitpunkten darstellen. Im Ergebnis erhält man ein differentielles Interferogramm. Aufgabe des DInSAR-Verfahrens ist die Eliminierung des topographiebedingten Phasenanteils ( $\phi_{\text{topo}}$ ). Dies kann entweder mit zwei unabhängigen SAR-Bildpaaren („*four-pass*“ Methode) oder drei SAR-Bildern („*three-pass*“ Methode) erfolgen, wobei eines der Bildpaare jeweils deformationsfrei sein muss. Unter der Annahme konstanter Bewegungsvektoren in Betrag und Orientierung sowie weiterer Annahmen bzgl. der Topographie kann mit zwei unabhängigen Interferogrammen  $\phi_{\text{topo}}$  eliminiert werden (Meyer, 2004). Im Fall ungeeigneter räumlicher und zeitlicher Basislinien oder ungleichmäßiger Bewegungen ist es jedoch möglich, dass kein geeignetes Interferogramm zur Ableitung des topographiebedingten Phasenanteils zu finden ist. Die maximale Zeitdifferenz  $\Delta t_{\text{max}}$  ist abhängig von der Deformationsgeschwindigkeit. Der bewegungsbedingte Phasenanteil  $\phi_{\text{defo}}$  darf nicht größer als das Phasenrauschen  $\phi_{\text{noise}}$  sein, um Höhen präzise ableiten zu können. Bei ERS-Daten beträgt  $\phi_{\text{noise}}$  beispielsweise etwa  $40^\circ$  (Hanssen, 2001). Durch Umstellung von Formel 2.20 nach  $\Delta t$ , Einsetzen von Formel 2.21 und Berücksichtigung des Einfallswinkels  $\theta_i$  bei der Umrechnung in vertikale Verschiebungsgeschwindigkeiten  $v_{\text{displ,z}}$  ergibt sich gemäß

$$\Delta t_{\text{max}} = \frac{\phi_{\text{noise}} \cdot \lambda}{4\pi \cdot \cos \theta_i \cdot v_{\text{displ,z}}} \quad (2.27)$$

ein maximaler zeitlicher Abstand von beispielsweise 3.4 Tagen für ERS-Aufnahmen bei einer z.B. im Bergbau typischen Senkungsgeschwindigkeit von 1 mm/Tag. Da der Wiederholzyklus der ERS-Satelliten 35 Tage beträgt, wären maximal ERS-1/-2 Tandem-Paare für die topographische Phasenkorrektur geeignet. Im Fall, dass die Bodenbewegungen in den Interferogrammen für die topographische Phasenkorrektur nicht mehr vernachlässigbar sind bzw. höhere Bewegungsgeschwindigkeiten nicht auszuschließen sind, empfiehlt sich die „*two-pass*“-Methode zur Korrektur des topographiebedingten Phasenanteils. Dabei wird ein externes Digitales Höhenmodell (DHM) genutzt, das mittels der Distanz-Doppler-Gleichungen in Radarkoordinaten konvertiert (Kapitel 2.3) und vom Interferogramm subtrahiert wird. Fehler im Höhenmodell (DHM-Error) wirken sich dabei direkt und indirekt auf die Genauigkeit der Bodenbewegungsmessung in Abhängigkeit von der Basislinie aus. Die Untersuchung dieses Einflusses ist Gegenstand dieser Arbeit ab Kapitel 3.

Die differentielle Phase  $\phi_{\text{DInSAR}}$  setzt sich nach Eliminierung der aufnahmebedingten Phasenanteile wie folgt zusammen:

$$\phi_{\text{DInSAR}} = \phi_{\text{defo}} + \phi_{\text{DHM-Error}} + (\phi_{\text{atmo}} + \phi_{\text{noise}}) \quad (2.28)$$

**Tabelle 2.1.:** Verschiebung pro Phasenzyklus in LOS-Richtung in Abhängigkeit von der Wellenlänge; dargestellt für verschiedene Sensoren mit einem unterschiedlichen Wiederholzyklus.

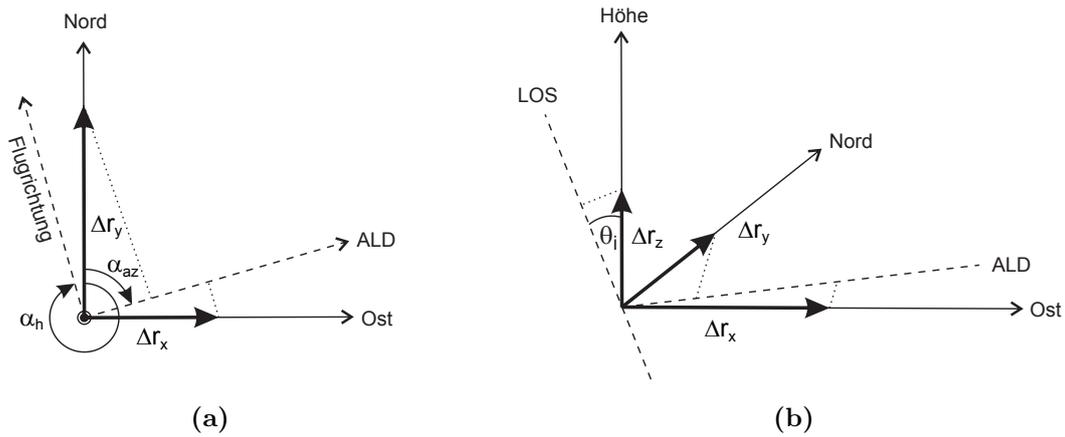
Sensor	Wellenlänge $\lambda$	Verschiebung pro Phasenzyklus in LOS	Wiederholzyklus $\Delta t$
	[cm]	[cm]	[Tage]
TerraSAR-X	3.11	1.55	11
COSMO-SkyMed	3.12	1.56	8
ERS-1/-2	5.66	2.83	35
Envisat ASAR	5.62	2.81	35
Radarsat-2	5.55	2.77	24
ALOS PALSAR	23.61	11.80	46

Für eine präzise Ableitung von Bewegungen aus differentiellen Interferogrammen ist eine möglichst exakte Eliminierung und Kompensation aller nicht-deformationsbedingten Phasenanteile eine wesentliche Voraussetzung (vgl. Kapitel 2.2.1). Unter der Annahme eines fehlerfreien DHMs ( $\phi_{\text{DHM-Error}}=0$ ), exakter Orbitpositionsdaten zur Korrektur der aufnahmebedingten Phase und eines gültigen Atmosphärenmodells für das Interferogramm ist es anhand Formel 2.21 möglich, aus den resultierenden Phasen  $\phi_{\text{defo}}$  über das Phasenabwicklungsverfahren (vgl. Kapitel 2.2.4) die Verschiebungsbeträge  $\Delta r$  in Blickrichtung (LOS) in der Größenordnung der Wellenlänge zu ermitteln. Die maximal Bewegung, die in einem Interferogramm gemessen werden kann, ergibt sich anhand des kritischen räumlichen Phasengradienten (Kapitel 2.2.3). Aufgrund der Phasenmehrdeutigkeiten können bei zeitlicher Betrachtung eines Pixels maximale Bewegungen von einem halben Phasenzyklus ( $\hat{=}$  Viertel der Wellenlänge  $\lambda$ ) pro Wiederholzyklus  $\Delta t$  erfasst werden (Tab. 2.1).

Der dreidimensionale Verschiebungsvektor  $\vec{\Delta r}$ , gemessen in LOS-Richtung, setzt sich aus den Verschiebungsanteilen  $\Delta r_x$ ,  $\Delta r_y$  und  $\Delta r_z$  zusammen. Unter Berücksichtigung des Azimut- bzw. Kurswinkels  $\alpha_h$  (*heading*), der sich auf geographische Koordinaten bezieht, sowie dem Einfallswinkel  $\theta_i$  setzt sich laut Hanssen (2001) der Verschiebungsbetrag  $\Delta r$  in LOS wie folgt zusammen (vgl. Abb. 2.8):

$$\Delta r = \Delta r_z \cdot \cos \theta_i - \sin \theta_i \cdot [\Delta r_x \cdot \sin \alpha_{\text{az}} + \Delta r_y \cdot \cos \alpha_{\text{az}}] \quad (2.29)$$

Die horizontalen Verschiebungsbeträge  $\Delta r_x$  und  $\Delta r_y$  beziehen sich auf geographisch Ost bzw. Nord. Für rechtsblickende SAR-Systeme gilt für die Azimut-Blickrichtung (ALD)  $\alpha_{\text{az}}=(\alpha_h - 3\pi/2)$ , für linksblickende SAR-Systeme  $\alpha_{\text{az}}=(\alpha_h - 1\pi/2)$ . Gegenüber horizontalen Verschiebungen sind SAR-Systeme laut Formel 2.29 somit deutlich weniger empfindlich. Verschiebungen in Flugrichtung  $\alpha_h$  können nicht erfasst werden. Beispielsweise setzt sich die Verschiebung in LOS für eine ERS-Aufnahme mit  $\theta_i \approx 23^\circ$  und  $\alpha_h \approx 190^\circ$  zusammen mit  $[0.92, -0.07, 0.38] [\Delta r_x, \Delta r_y, \Delta r_z]^T$ . Unter der Annahme, dass nur vertikale Verschiebungen stattgefunden haben, entspricht nach Formel 2.30 ein Phasenzyklus mit  $\Delta r=2.83$  cm einer vertikalen Verschiebung von  $\Delta r_z=3.07$  cm. Je größer der Blickwinkel und entsprechend der Einfallswinkel  $\theta_i$  ist, umso größere vertikale Bewegungen können



**Abbildung 2.8.:** Projektion der drei Verschiebungskomponenten  $\vec{\Delta r} = (\Delta r_x, \Delta r_y, \Delta r_z)$  in Blickrichtung (LOS) nach [Hanssen \(2001\)](#): (a) Draufsicht, (b) 3D-Sicht mit der Projektion der vertikalen Komponente bezogen auf LOS anhand des Einfallswinkel  $\theta_i$ .

erfasst werden.

$$\Delta r_z = \frac{\Delta r}{\cos \theta_i} \quad (2.30)$$

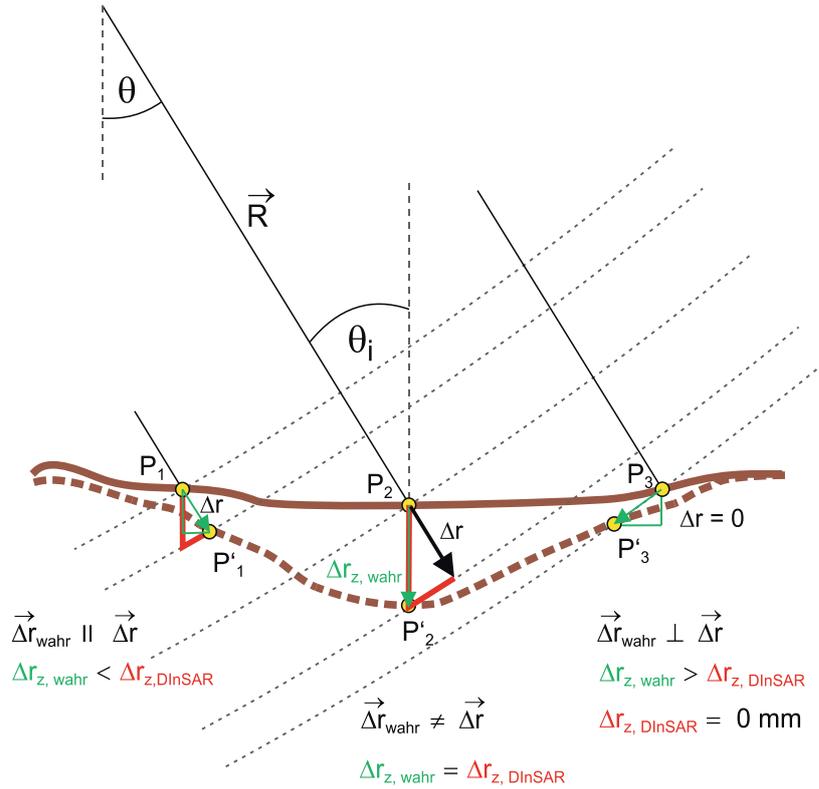
Ist die Richtung des Verschiebungsvektors  $\vec{\Delta r}$  nicht bekannt und wird nur von vertikalen Verschiebungen ausgegangen, können Fehler bei der Bestimmung von  $\Delta r_z$  entstehen. Abb. 2.9 verdeutlicht dies. Aufgrund der gekrümmten Erde gilt  $\theta \neq \theta_i$ . Bei Verschiebungen in Blickrichtung des Sensors, d.h. weg vom Sensor, kommt es zur Überschätzung von  $\Delta r_z$ , während bei Verschiebungen senkrecht zur Blickrichtung die vertikalen Verschiebungen  $\Delta r_z$  unterschätzt werden.

### 2.2.3. Kohärenz

Die Qualität der interferometrischen Phase ist abhängig vom Phasenrauschen, das hervorgerufen wird durch verschiedene Faktoren, die zu Kohärenzverlusten der Signale (Dekorrelation) führen. Der komplexe Korrelationskoeffizient  $\gamma$  ist ein Maß für die Ähnlichkeit von zwei SAR-Bildern, d.h. er beschreibt die Änderung der Amplituden- und Phaseninformation eines jeden Pixels. Der Betrag  $|\gamma|$  wird allgemein als Kohärenz bezeichnet und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen.  $|\gamma|=0$  bedeutet völlige Dekorrelation.

Dekorrelationen können laut [Hanssen \(2001\)](#) von verschiedenen Faktoren verursacht werden, wobei man folgende Dekorrelationen unterscheidet:

- **Geometrische Dekorrelation** ( $\gamma_{geom}$ ). Da die Blickwinkel  $\theta$  zweier SAR-Aufnahmen leicht voneinander abweichen, erscheint die Oberfläche unterschiedlich, was zu relativen Frequenzverschiebungen und zu einem Verlust der festen Phasenbeziehung führt. Die Änderung der Phase eines Pixels in zwei SAR Bildern wird durch den Phasengradienten beschrieben. Der kritische Phasengradient  $f_{\phi, \text{crit}}$  in LOS, bei dem



**Abbildung 2.9.:** Fehlschätzung von vertikalen Verschiebungen bei DInSAR-Messungen in LOS-Richtung  $\Delta r$  entsprechend Formel 2.30 aufgrund der Annahmen  $\Delta r_x=0$  und  $\Delta r_y=0$ . Wenn der wahre Verschiebungsvektor  $\vec{\Delta r}_{\text{wahr}}$  parallel zu  $\vec{\Delta r}$  ist, kommt es zur Überschätzung von  $\Delta r_z$  und bei  $\vec{\Delta r}_{\text{wahr}} \perp \vec{\Delta r}$  zur Unterschätzung.

es zur totalen Dekorrelation kommt, ergibt sich anhand der Bandbreite  $B_p$  und der Abtastfrequenz  $f_d$  (vgl. Kapitel 2.1):

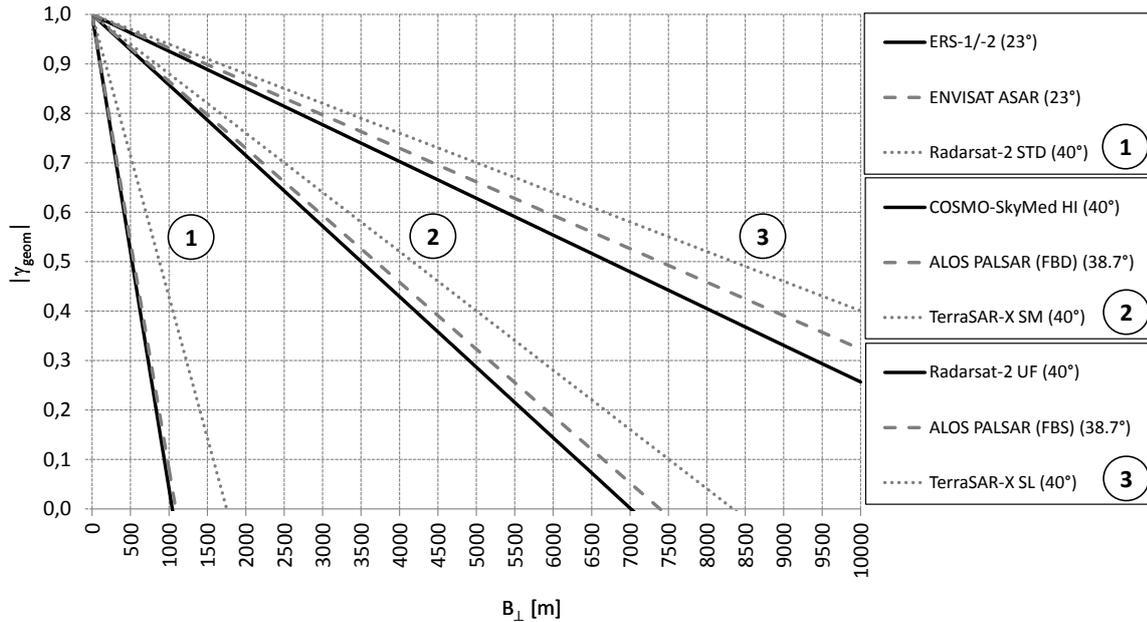
$$f_{\phi,\text{crit}} = \frac{B_p}{f_d} \text{ [Zyklen/Pixel]} = \frac{B_p}{f_d} \cdot \frac{\lambda}{2} \text{ [mm/Pixel]} = \frac{B_p \cdot \lambda}{c} \text{ [mm/m]} \quad (2.31)$$

Er beschreibt den Wert des Phasengradienten  $f_\phi$ , für den die relative Frequenzverschiebung den Wert der Bandbreite  $B_p$  des Sendesignals überschreitet (Scheiber, 2004). Die Dekorrelation ist abhängig von der Trägerfrequenz  $f_c$ , der räumlichen Basislinie  $B$ , dem Einfallswinkel  $\theta_i$ , dem topographischen Anstieg  $\alpha$  sowie dem Bewegungsgradienten. Je größer die Basislinie ist, umso größer sind die Dekorrelationen. Anhand des kritischen Phasengradienten lässt sich die kritische Basislinie  $B_{\perp,\text{crit}}$  ableiten, bei der  $|\gamma_{\text{geom}}|=0$  erreicht wird:

$$B_{\perp,\text{crit}} = \frac{\lambda \cdot B_p \cdot R_1 \cdot \tan(\theta_i - \alpha)}{c} \quad (2.32)$$

Die geometrische Dekorrelation kann definiert werden für  $B_{\perp} \leq B_{\perp,\text{crit}}$  mit

$$|\gamma_{\text{geom}}| = \frac{B_{\perp,\text{crit}} - B_{\perp}}{B_{\perp,\text{crit}}} \quad (2.33)$$



**Abbildung 2.10.:** Korrelationskoeffizient  $|\gamma_{\text{geom}}|$  in Abhängigkeit vom Sensor und der Basislinie  $B_{\perp}$ , unter Annahme eines jeweils sensortypischen Einfallswinkel  $\theta_i$ .

Um eine totale Dekorrelation zu vermeiden, sollte die senkrechte Basislinie  $B_{\perp}$  kleiner als die kritische Basislinie  $B_{\perp, \text{crit}}$  sein (vgl. Abb. 2.10).

Die kritische Basislinie ist sensorspezifisch. Größere Blickwinkel ergeben größere kritische Basislinien. Da bei den neuen hochauflösenden Sensoren wie z.B. TerraSAR-X die kritische Basislinie sehr groß ist (Stripmap-Modus mit  $\theta_i=40^\circ$  und  $\alpha=0^\circ$ : 8340 m), kommt es in den meisten Interferogrammen ( $B_{\text{max}} \approx 300\text{-}400$  m) nur zu sehr geringen geometrischen Dekorrelationen. Bodenbewegungsgradienten in LOS von mehr als 15.5 mm/m bei einem Pixelabstand von 1.36 m führen bei TerraSAR-X zur totalen Dekorrelation (vgl. Formel 2.31).

Da die Basislinie bei satellitengetragenen Systemen anders als bei flugzeuggetragenen Systemen nicht wählbar ist, ist es empfehlenswert SAR-Aufnahmen mit möglichst großem Blickwinkel zu bestellen, jedoch in Abhängigkeit der Geländeform, aufgrund der Zunahme von Schatten insbesondere bei extremen Hangneigungen (vgl. Kapitel 2.1.1.2).

- **Zeitliche Dekorrelation** ( $\gamma_{\text{temporal}}$ ). Sie ergibt sich aufgrund der physikalischen Änderungen im Gelände und schränkt die Anwendung der Repeat-Pass Interferometrie zur Erfassung von Bodenbewegungen am deutlichsten ein. Zeitliche Dekorrelationen treten auf, wenn sich die Verteilung der in der Größenordnung der Wellenlänge vorhandenen Rückstreuer innerhalb der Auflösungszelle zwischen den Aufnahmezeitpunkten, z.B. hervorgerufen durch Vegetation oder anthropogene Aktivitäten wie Baumaßnahmen, ändert. Ursache können auch Änderungen der elektrischen Eigenschaften sein, die z.B. durch das Wetter hervorgerufen werden. Je größer der zeitliche Abstand zwischen den Aufnahmen (= zeitliche Basislinie  $\Delta t$ )

ist, umso größer werden die Dekorrelationen. Dies ist jedoch saisonabhängig. Ein-Jahres-Interferogramme zwischen vegetationsfreien Wintern weisen deutlich höhere Kohärenzen auf als beispielsweise Zwei-Monats-Interferogramme im Sommer, in denen starke Vegetationsänderungen stattfinden. Die zeitlichen Dekorrelationen sind abhängig von der Wellenlänge. L-Band Daten sind z.B. weniger sensibel gegenüber Änderungen der Vegetationsdichte (Sarabandi & Lin, 2000).

- **Volumen-Dekorrelation** ( $\gamma_{vol}$ ). Sie tritt infolge des Eindringens der Radarstrahlung in ein Medium auf. Bei großen Eindringtiefen sinkt die effektive kritische Basislinie aufgrund der Volumenstreuung (Hoen & Zebker, 2000).
- **Prozessierungsbedingte Dekorrelation** ( $\gamma_{process}$ ). Aufgrund der interferometrischen Prozessierung und der gewählten Algorithmen, d.h. laut Just & Bamler (1994) durch Fehler bei
  - der Koregistrierung,
  - der SAR-Fokussierung,
  - und der Kompensation der Range-Migration (aufgrund der Fluggeschwindigkeit des Sensors und der Erdrotation)

entstehen Dekorrelationen.

Wie Just & Bamler (1994) zeigen, ändert sich die Kohärenz nicht mehr signifikant, wenn eine Koregistrierungsgenauigkeit besser als 0.1 Pixel erreicht wird, was einer Phasen-Standardabweichung von ca.  $19^\circ$  (SNR= $\infty$  dB) bzw.  $40^\circ$  (SNR=10 dB) entspricht.

- **Dopplerfrequenz-Dekorrelation** ( $\gamma_{DC}$ ). Wenn die Unterschiede zwischen den Dopplerschwerpunkten  $f_{DC}$  zweier Aufnahmen, aufgrund des seitlichen Schielens des Sensors in Azimut, zu groß sind, treten Dekorrelationen auf. Die Dopplerschwerpunktfrequenz  $f_{DC}$  ist abhängig vom Schielwinkel  $\psi$  (*squint angle*), der wiederum vom Nick- und Gierwinkel abhängig ist (Miranda et al., 2004).

$$\gamma_{DC} = 1 - \frac{\Delta f_{DC}}{f_a} \quad \text{mit} \quad f_{DC} = \frac{2 \cdot v_S}{\lambda} \cdot \sin \psi \quad (2.34)$$

Der Schwellwert für die Differenz der Dopplerschwerpunkte  $\Delta f_{DC}$  beträgt  $\pm f_a/2$  und sollte bei der Interferometrie nicht überschritten werden (Miranda et al., 2004), da sonst die Überlappung der Azimut-Spektren zu gering ist und Mehrdeutigkeiten auftreten können (Chang & Curlander, 1992).

- **Thermisches Rauschen** (Systemrauschen) ( $\gamma_{thermal}$ ). Aufgrund der Eigenschaften des Systems und der Antenne entsteht ein thermisches Rauschen. Mittels des SNR eines Sensorsystems kann  $\gamma_{thermal}$  theoretisch berechnet werden (Hanssen, 2001):

$$\gamma_{thermal} \approx \frac{1}{1 + SNR^{-1}} \quad (2.35)$$

Je größer das Rauschen wird, desto kleiner wird der SNR-Wert und umso kleiner auch  $\gamma_{thermal}$ . Beispielsweise liegt das thermische Rauschen des ERS-AMI Instruments bei ca.  $12^\circ$ , was etwa einem  $\Delta R$  von 1 mm entspricht.

Aus den beschriebenen Korrelationstermen ergibt sich ein gemeinsamer Korrelationskoeffizient  $\gamma_{total}$ , der theoretisch ableitbar ist (Zebker & Villasenor, 1992):

$$\gamma_{total} = \gamma_{geom} \cdot \gamma_{temporal} \cdot \gamma_{vol} \cdot \gamma_{DC} \cdot \gamma_{thermal} \cdot \gamma_{process} \quad (2.36)$$

Da die einzelnen Dekorrelationsanteile nicht messbar sind, erfolgt in der Praxis die Berechnung der Kohärenz eines Interferogramms anhand der komplexen Signale  $c_k$  über einen räumlichen Mittelwert innerhalb eines Schätzfensters  $N$  (Hanssen, 2001):

$$|\hat{\gamma}| = \frac{\sum_{n=1}^N c_{k_1}^{(n)} \cdot c_{k_2}^{*(n)}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |c_{k_1}^{(n)}|^2 \cdot \sum_{n=1}^N |c_{k_2}^{*(n)}|^2}} \quad (2.37)$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion *pdf* der interferometrischen Phase ergibt sich als Funktion des Korrelationskoeffizienten  $\gamma$ , die wiederum zur Berechnung der Standardabweichung der Phase  $\sigma_\phi$  dient (Hanssen, 2001).  $\sigma_\phi$  ist abhängig von der Anzahl der Looks. Je größer das Multilooking gewählt wird, umso geringer ist das Phasenrauschen, mit dem Nachteil einer geringeren geometrischen Auflösung. Das Rausch-Level in einem Interferogramm beträgt etwa  $40^\circ$  (Hanssen, 2001).

## 2.2.4. Multi-Basislinien-Verfahren zur Bodenbewegungsüberwachung

Bei der klassischen DInSAR-Analyse werden zur Ableitung von Bodenbewegungen aus Radar- und SAR-Daten einzelne interferometrische Bildpaare genutzt, welche für bestimmte Zeiträume flächenhafte Aussagen ermöglichen (*Single-Basislinien-Verfahren*). Die Anwendbarkeit beschränkt sich auf räumlich kohärente Bereiche, deren Ausdehnung variieren kann in Abhängigkeit vom Sensor sowie der räumlichen und zeitlichen Basislinie (vgl. Kapitel 2.2.3), so dass nur für einzelne Zeitabschnitte Bewegungsanalysen möglich sind.

Zur Auswertung von Zeitreihen wurden Verfahren entwickelt, bei denen mehrere Interferogramme mit unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Basislinien genutzt werden. Man spricht allgemein von *Multi-Basislinien-Verfahren*, insbesondere wenn die Anzahl unabhängiger Beobachtungen erhöht wurde (Cloude & Papathanassiou, 1998).

Beim so genannten **Stacking** werden einzelne Interferogramme mit hohen Kohärenzen zeitlich aufsummiert oder ein komplexes Netzwerk aus Interferogrammen mit kurzen zeitlichen wie auch räumlichen Basislinien, wie bei der **Small-Baseline Methode** (SBAS) nach Usai et al. (1999), gebildet. Zeitlich isolierte Bereiche können dabei durch einzelne kohärente Interferogramme mit großen Basislinien verknüpft werden (Berardino et al., 2002). Aufgrund der Redundanz der Beobachtungen erfolgt bei der SBAS-Methode die

Schätzung der Bodenbewegungen durch Ausgleichsrechnung unter Berücksichtigung aller anderen Phasenkomponenten (Details siehe z.B. Usai (2001), Ge (2010)). Bedingungen für die SBAS-Methode sind multi-looked Interferogramme und räumlich abgewinkelte Phasen. Durch Kombination mit der PSI-Methode (siehe nächster Absatz), funktioniert SBAS jedoch auch mit nicht-abgewinkelten Phasen und Erhalt der vollen Auflösung (Lanari et al., 2004), (Hooper, 2008). Bei der Phasenabwicklung findet eine räumliche Integration von Phasen entlang bestimmter Pfade statt, wobei man zwischen den zwei Hauptalgorithmen *Branch Cut* nach Goldstein et al. (1988) und *Minimum Cost Flow* (MCF) nach Costantini (1998) unterscheiden kann.

Im Gegensatz zur SBAS-Methode erfolgt bei der **Persistent Scatterer Interferometrie** (PSI), welche von Ferretti et al. (1999) entwickelt wurde, die Schätzung von Bewegungen ausschließlich für einzelne zeitlich kohärente Pixel (PSI-Punkte), die meist einen oder mehrere dominante Rückstreuer enthalten und auch in stark dekorrelierten Bereichen zu finden sind (vgl. Anhang B.2). Bei einer räumlich gleichmäßigen sowie hohen Punktdichte, welche mit der Verbesserung der Bodenauflösung steigt (z.B. TerraSAR-X (SM):  $\sim 15000$  PSI-Punkten/km<sup>2</sup> Stadtbereich), sind nahezu flächenhafte Analysen für eine lange Zeitreihe möglich. Die Schätzung der Bewegungen erfolgt über eine zeitliche Phasenabwicklung, bei der gleichzeitig Höhenfehler anhand der unterschiedlichen Basislinien und dem linearen Zusammenhang (siehe Formel 2.19) mit bestimmt werden. Dies bezeichnet man als 2D-Regressionsanalyse. D.h. im Gegensatz zur SBAS-Methode wird bei PSI ein Bewegungsmodell vorausgesetzt.

Lineare Modellannahmen führen zu Fehlern und Beschränkungen bei der Erfassung nicht-linearer Bewegungen. Die klassische PSI-Analyse mit nur einer Referenzszene nutzt zudem die hohe Redundanz eines Datenstapels nicht aus. Bei der *Multireferenz-Stack* PSI-Methode werden dagegen mehrere Referenzszenen sowie nur Phasen von Interferogrammen mit kurzen zeitlichen Basislinien verwendet, was die Messung nicht-linearer Bewegungen verbessert (Wegmüller et al., 2010). Weiterentwickelte PSI-Methoden sind z.B. die *SqueeSAR<sup>TM</sup>*-Methode bei der auch Bewegungen in Bereichen, in denen bisher keine bis nur sehr wenige PSI-Punkte detektierbar waren, erfassbar sind (Ferretti et al., 2011).

Die Vorteile der SBAS- und PSI-Methode gegenüber der Single-Basislinien-Interferometrie sind die Auswertung geschlossener Zeitreihen und die simultane Schätzung der Bewegung und Höhenfehler sowie anderer Phasenanteile. Die Erfassbarkeit von Bewegungen ist abhängig vom Sensor und deren Wiederholzyklus, und wird bei SBAS wie auch PSI räumlich durch den kritischen Phasengradienten (Formel 2.31) und zeitlich aufgrund der Phasenmehrdeutigkeiten mit  $\lambda/4$  [mm/ $\Delta t$ ] nach oben hin begrenzt. Beispielsweise können mit Envisat maximale räumliche Bewegungsgradienten von 3 mm/m in LOS bei einer Pixelgröße von 7.8 m sowie maximale Geschwindigkeiten von 14 mm/35 d erfasst werden.

Weiterentwicklungen der SAR-Interferometrie sind die 3D **SAR-Tomographie** (TomoSAR) (Homer et al., 1996; Reigber & Moreira, 2000) und 4D **Differentielle SAR-Tomographie** (D-TomoSAR) (Lombardini, 2005; Fornaro et al., 2009; Zhu & Bamler, 2010), bei denen eine zweite synthetische Apertur in Normalenrichtung mit der Länge  $B_s$  senkrecht zur Range-Azimut-Ebene erzeugt wird. Dies ermöglicht eine geometrische Auflösung in Höhen-Richtung  $\rho_s$  senkrecht zur Range-Azimut-Ebene (vgl. Formel 2.38).

Die Genauigkeit der Höhenschätzung  $\sigma_s$  ist u.a. abhängig von der Standardabweichung der Basislinienverteilung  $\sigma_{B_s}$  und der Anzahl der Aufnahmen  $N$  (Bamler et al., 2009). Die Anzahl der notwendigen Aufnahmen ergibt sich unter Berücksichtigung der Gesamthöhe des betrachteten Volumens (Reigber & Moreira, 2000).  $R$  beschreibt den Abstand zwischen Sensor und Objekt.

$$\rho_s = \frac{\lambda \cdot R}{2 \cdot B_s} \quad \sigma_s = \frac{\rho_s \cdot B_s}{2\pi \cdot \sqrt{N} \cdot \sqrt{2 \cdot SNR} \cdot \sigma_{B_s}} \quad (2.38)$$

Im Gegensatz zu SBAS und PSI, bei denen die InSAR-Höhe in Verbindung zum effektiven Phasenzentrum aller Rückstreuer innerhalb einer Auflösungszelle steht, erlaubt TomoSAR die Bestimmung der Höhenverteilung mehrerer Rückstreuer innerhalb einer Auflösungszelle z.B. in Layover-Bereichen (Reigber & Moreira, 2000) und die Unterscheidung zwischen *single-* und *double-bounces* (Fornaro & Serafino, 2006). Bei typischen PSI-Systeme kann es im Fall, wenn sich mehrere dominante Rückstreuer innerhalb einer Auflösungszelle befinden, zu Fehlschätzungen der Höhen und Bewegungen kommen (Adam et al., 2005), was zu starken Einschränkungen in dicht bebauten städtischen Bereichen führt. Bei D-TomoSAR wird dagegen für jeden einzelnen dominanten Rückstreuer die Bewegung geschätzt, siehe z.B. Zhu & Bamler (2010).

Mit den neuen hochauflösenden Sensoren ist das Interesse an TomoSAR, aufgrund der präziseren Orbitdaten, kürzerer räumlicher Basislinien, höherer SNR-Werte und PSI-Punktdichten und der Möglichkeit viele Aufnahmen in kurzer Zeit durchzuführen, deutlich gestiegen (Adam et al., 2005). Fornaro & Serafino (2006) konnten außerdem zeigen, dass die Methode auch für Datenstapel älterer Satelliten wie ERS-1/-2 anwendbar ist, um Bodenbewegungen ableiten zu können. Dies verdeutlicht das hohe Potential von D-TomoSAR.

## 2.3. Geokodierung von SAR-Bildern

Für eine möglichst exakte Korrektur der topographie-bedingten Phase in Interferogrammen, speziell bei Aufnahmen von Gebieten mit kontinuierlichen Bodenbewegungen, ist die Nutzung eines zuverlässigen Digitalen Höhenmodells (meist vorliegend in Kartenkoordinaten) unabdingbar (vgl. Kapitel 4). Ein entscheidender Schritt ist dabei die präzise Transformation des DHMs in die Slant-Range Bildgeometrie (*range doppler coordinates*, RDC). Die dabei abgeleiteten Transformationsparameter können zusätzlich zur Umwandlung von Radarbildern (z.B. Interferogramme, Intensitätsbilder) in eine Kartenprojektion verwendet werden. Die absolute Entzerrung von Bildern, durch die ein Bild auf ein übergeordnetes geodätisches Referenz-/Bezugssystem bzw. einen Kartennetzentwurf abgebildet wird bezeichnet man als Geokodierung (engl. *geocoding*) oder auch Georeferenzierung (DIN 18716-3). Die Georeferenzierung von Bilddaten in ein einheitliches Bezugssystem ist für viele Anwendungen in der Fernerkundung, wie multitemporale Analysen oder die Integration von verschiedenen Daten in einem gemeinsamen Auswertesystem, ein unumgänglicher Verarbeitungsschritt.

Die Geokodierung erfolgt gewöhnlich in zwei Schritten, erstens die Korrektur der geometrischen Verzerrungen (meist über lokale Verknüpfungspunkte (*tie-points*)) und zweitens die Transformation in ein Kartenbezugssystem, d.h. die Berechnung von Transformationspolynomen und Durchführung eines Resamplings. Traditionell werden in der Photogrammetrie und Fernerkundung Passpunkte (*ground control points*, GCPs) zur Bestimmung der Transformationsgleichungen genutzt (Albertz, 2001). Die Geokodierung von SAR-Bildern erfolgt in der Regel parametrisch und basiert auf der Rekonstruktion der Aufnahmegeometrie unter Nutzung von relevanten Informationen wie Orbitdaten und Prozessierungsparameter der Vorprozessierung (Roth et al., 1993; Schreier, 1993). Die Messung von Passpunkten, die bei Radarbildern aufgrund des Einflusses der Geländeneigung auf die radiometrische und geometrische Abbildung sowie wegen des Speckle-Rauschens und des unterschiedlichen Aussehens von SAR-Bildern, sehr schwierig ist, kann dabei entfallen.

Für eine präzise Geokodierung sind Höhenmodelle notwendig, um geometrische Verzerrungen aufgrund der Schrägsicht von SAR-Sensoren und der Geländevariabilitäten zu korrigieren (Roth et al., 1993; Schreier, 1993). Sind keine Höhendaten vorhanden, kann unter bestimmten Annahmen die Projektion der SAR-Bilder auch auf eine Ebene bzw. ein Ellipsoid ohne Berücksichtigung topographischer Gegebenheiten erfolgen (Roth et al., 1993). Grundsätzlich kann die Gestalt der Erde mit einem Ellipsoid oder Geoid jedoch nicht ausreichend beschrieben werden. Die Projektion auf eine Ebene ist in Bezug auf Geokodierungsfehler nur akzeptabel bei Betrachtung sehr kleiner Ausschnitte der Erdoberfläche und bei sehr flachem Gelände ohne Objekte bzw. mit nur sehr flachen Objekten. Layover- und Schattenbereiche müssen dabei ausmaskiert werden oder es muss eine Neusortierung der Pixel bzw. ein Auffüllen der Schattenbereiche mit z.B. Datenfusionstechniken (Hein, 2000) erfolgen. Eine einfache geometrische Herleitung für die Umrechnung von „Ground-Range“ in „Slant-Range“ Bilder unter Berücksichtigung der Erdkrümmung ist bei Wu et al. (1981) zu finden. Standard-geokodierte SAR-Produkte wie z.B. *ERS SAR Precision Images*, sind meistens auf ein Ellipsoid projizierte Abbildungen und berücksichtigen die Krümmung der Erdoberfläche zusätzlich. Die Qualität der Geokodierung ist entsprechend abhängig von der tatsächlichen Geländehöhe über dem Ellipsoid und kann zu Lageverschiebungen entsprechend Formel 2.8 von z.B. dem 2.3-fachen der ellipsoidischen Höhe bei ERS-Daten bei einem Einfallswinkel  $\theta_i=23^\circ$  führen (Roth et al., 1993).

Bei der Georeferenzierung sowohl mit einem Referenzellipsoid als auch einem DHM verwendet man üblicherweise den so genannten „Distanz-Doppler“-Ansatz (*range-doppler approach*), um die Beziehung zwischen der Lage eines Punktes auf der Erdoberfläche und seinem Bildpunkt in einer SAR-Szene herzustellen. Curlander (1982) entwickelte erstmals den Distanz-Doppler-Ansatz zur geometrischen Korrektur von Radarbildern mit einem Geoid, bei dem das Sensor-Prozessor-System als Ganzes unter Berücksichtigung der Bahn- und Pulslaufzeiten und Dopplerfrequenzen betrachtet wurde. Dieser dient als Grundlage für weiterentwickelte Korrekturverfahren, wie z.B. das von Kwok et al. (1987) basierend auf einem Geoid, bei dem jedoch reliefbedingte Verzerrungen mittels eines DHMs beseitigt wurden. Bei dem Distanz-Doppler Konzept von Meier (1989), das im folgenden Abschnitt näher erläutert wird, erfolgte erstmalig die Entzerrung mit einem DHM, wobei der Einfluss des Reliefs (lokale Geländehöhen) auf jedes Pixel berücksichtigt wurde, vergleichbar mit der Differentialentzerrung wie sie bei Albertz (2001) beschrieben ist.

### 2.3.1. Distanz-Doppler-Ansatz

Die Geokodierung mittels des Distanz-Doppler Ansatzes ist ein indirektes Geokodierungsverfahren bei dem die Abbildung eines 3D-Punktes im SAR-Bild bestimmt wird. Zu den Abbildungsparametern (Innere Orientierung) gehören im Wesentlichen die Pulslaufzeiten in Form von Schrägdistanzen zum ersten und letzten prozessierten Bildpunkt in Range, die geometrische Auflösung und der Schielwinkel (*squint angle*) (Domik et al., 1984). Für die Äußere Orientierung sind die Sensorpositionen und die Drehwinkel notwendig.

Zur Lokalisierung eines Bildelements benötigt man drei Radarabbildungsgleichungen (Curlander, 1982):

(1) **Das Modell der Erdoberfläche** dient der geometrischen Beschreibung der Form der Erde und wird genutzt zur Transformation eines Objektpunktes auf der Erdoberfläche (idealerweise aus einem DHM) vom Kartenbezugssystem ins geozentrische kartesische Bezugssystem (*Inertialsystem*<sup>7</sup>) der Ephemeriden des Sensors (Meier, 1989). Somit erhält man den Positionsvektor der Objektpunkte  $\vec{P}$  in raumfesten Koordinaten. Die Sensorpositionsvektoren (*state vector*)  $\vec{S}$  und Sensorgeschwindigkeitsvektoren  $\vec{v}_S$  liegen im erdfesten Koordinatensystem vor. Unter Berücksichtigung der Erdrotation  $\omega_E$  und der zu jeder Satellitenposition verfügbaren sehr präzisen Zeitangabe, erfolgt die Transformation der Sensorpositionen und -geschwindigkeiten vom erdfesten ins raumfeste Koordinatensystem (Meier, 1989).

(2) **Die Doppler-Gleichung** beschreibt die Richtungen, aus denen Signalanteile einer bestimmten Dopplerfrequenz empfangen werden. Die Frequenzverschiebungen (Dopplerfrequenzen)  $f_D$  resultieren aus den relativen Radialgeschwindigkeiten  $v_{\perp}$  der Zielobjekte gegenüber dem Sensor, die abhängig sind von der Fluggeschwindigkeit des Sensors  $v_S$ , der Rotationsgeschwindigkeit der Erde  $\omega_E$  und der Geländehöhe.

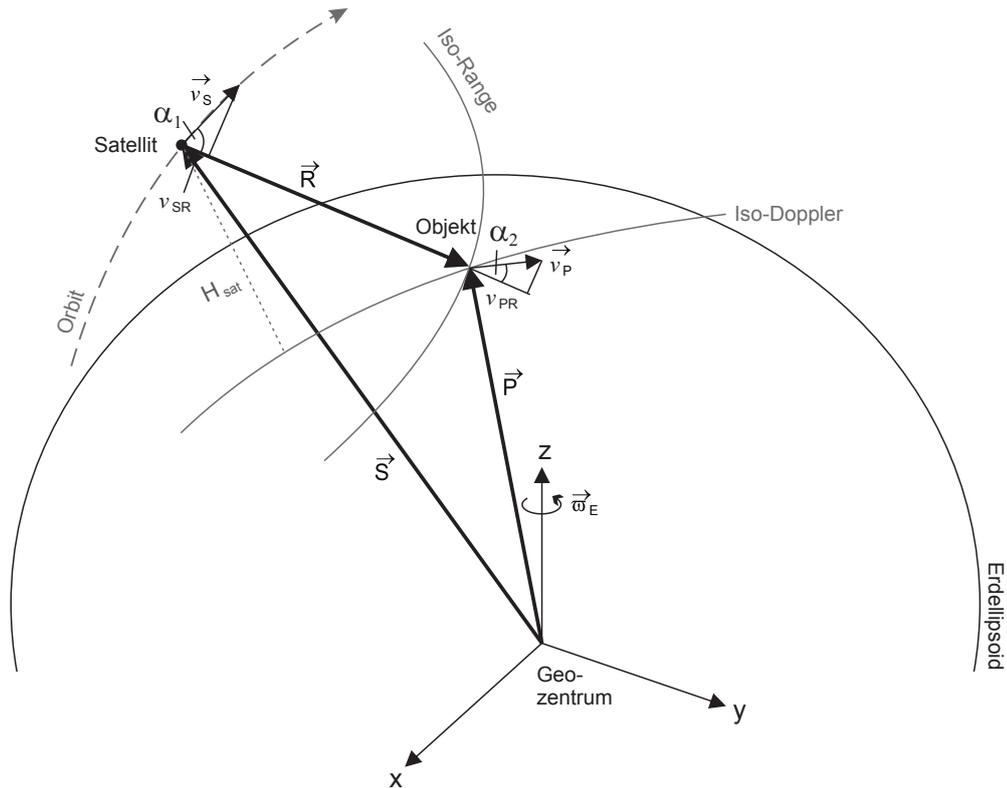
Die Radialgeschwindigkeit  $v_{\perp}$  ergibt sich entsprechend Formel 2.39 anhand des Sensor-  $\vec{v}_S$  und Objektgeschwindigkeitsvektors  $\vec{v}_P$  sowie dem Schrägdistanzvektor  $\vec{R}$  zwischen Sensor und Objektpunkt (vgl. die betrachteten Größen in Abb. 2.11). Die Berechnung der Schrägdistanzen  $R$  (Formel 2.40) basiert auf den zuvor geschätzten Satellitenpositionen. Die Berechnung des Objektgeschwindigkeitsvektors  $\vec{v}_P$  ergibt sich aus dessen Positionsvektor  $\vec{P}$  und der Rotationsgeschwindigkeit der Erde  $\omega_E$  im Inertialsystem (Formel 2.41).

$$v_{\perp} = v_{PR} - v_{SR} = (v_P \cdot \cos \alpha_2) - (v_S \cdot \cos \alpha_1) = \frac{(\vec{v}_P - \vec{v}_S) \cdot \vec{R}}{|R|} \quad (2.39)$$

$$R = \sqrt{(\vec{S} - \vec{P}) \cdot (\vec{S} - \vec{P})} \quad (2.40)$$

<sup>7</sup>Das raumfeste geozentrische kartesische Koordinatensystem (*Conventional Inertial System*, CIS) hat seinen Ursprung im Geozentrum (Massenmittelpunkt der Erde) und orientiert sich an der Lage der Sonne. Seine Z-Achse stimmt mit der mittleren Drehimpulsachse der Erde (*Celestial Ephemeris Pole*, CEP) überein. Die X-Achse weist in Richtung des Frühlingspunktes.

Im Inertialsystem ist das erdfeste, geozentrische kartesische System, das *Conventional Terrestrial System* (CTS) gelagert, dessen Z-Achse zum mittleren Pol (*Conventional International Origin*, CIO) weist und die XZ-Ebene im mittleren Meridian von Greenwich liegt. Das CTS liefert von der Eigenbewegung der Erde unabhängige Koordinaten. Das WGS84 ist ein globales Koordinatensystem, was mit dem CTS übereinstimmt. (Kahmen, 2006)



**Abbildung 2.11.:** SAR-Aufnahmegeometrie zur Beschreibung der Radarabbildungsgleichungen zur Lokalisierung eines Bildelements anhand des Distanz-Doppler Ansatzes

$$\vec{v}_P = \vec{\omega}_E \times \vec{P} \quad (2.41)$$

Die am Sensor registrierten mittleren Dopplerfrequenzen  $f_D$  der mit der Trägerfrequenz  $f_c$  ausgesandten Signale ergeben sich wie folgt:

$$f_D = \frac{2 \cdot f_c \cdot v_{\perp}}{c} = \frac{2 \cdot f_c}{c} \cdot \frac{(\vec{v}_P - \vec{v}_S) \cdot \vec{R}}{|R|} \quad (2.42)$$

**(3) Die Distanz-Gleichung** beschreibt den Abstand zwischen dem Sensor und den Objektpunkten. Die Position eines gesuchten Objektpunktes ergibt sich auf der Schnittlinie der Dopplergleichung und des Modells der Erdoberfläche entsprechend Formel 2.40.

Die Berechnung einer Range- und Azimut-Koordinate eines jeden Objektpunktes erfolgt letztendlich iterativ über die Ermittlung der Aufnahmepositionen für jeden Objektpunkt. Beginnend bei einer beliebig vorhandenen Aufnahmeposition erfolgt, nach der Berechnung der Schrägdistanz  $R$  und der Dopplerfrequenz  $f_D$  zu einem Objektpunkt, die Ermittlung der Dopplerverschiebungen bezogen auf den Dopplerschwerpunkt (*doppler centroid*) der Azimutreferenz (Meier, 1989). Die Azimutkoordinate eines Objektpunktes ergibt sich, wenn die berechnete Dopplerfrequenz  $f_D$  gleich dem Dopplerschwerpunkt ist. Nach der Bestimmung der Azimut-Koordinate kann die Range-Koordinate unter Nutzung folgender

Formel von Meier et al. (1993) berechnet werden:

$$n_L = \frac{R - R_0}{p_d} \quad (2.43)$$

Mit  $n_L$  = Zeilennummer,  $p_d$  = Pixelgröße in Range,  $R_0$  = Schrägdistanz „Sensor - Bildanfang“.

Bei so genannten „*stripline images*“, die große Gebiete in Flugrichtung abdecken, müssen zusätzlich Range-Polynome in der Geokodierung mit berücksichtigt werden (Huber et al., 2004).

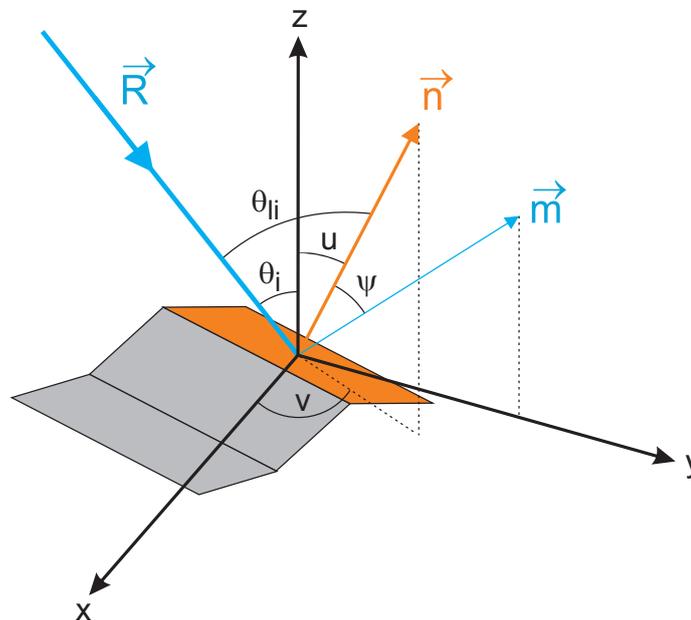
Über ein Resampling ergeben sich die Pixelwerte (Grauwerte) im Kartenbezugssystem anhand der Koordinaten in Range-Doppler Geometrie. Die Speicherung erfolgt in einer Zuweisungstabelle (*look-up-table*, LUT) im Kartenbezugssystem, die sowohl zur Vorwärtstransformation von Kartenkoordinaten in Radarkoordinaten als auch umgekehrt zur Rückwärtstransformation genutzt werden. Das Resampling kann erfolgen beispielsweise mit der Nearest-Neighbor Methode, der bilinearen Interpolation und der bikubischen Interpolation. Durch das Resampling wird auch die Nichtlinearität der Pixelabstände in Slant-Range Geometrie bei der Geokodierung mit berücksichtigt.

Ungenauere Orbitdaten, SAR-Systemparameter (z.B. Synchronisation der Orbit- und Sensorzeit), Unsicherheiten in der Definition der Kartenprojektion sowie DHM-Fehler führen zu Fehlern bei der Geokodierung, was sowohl vom gewählten Sensor als auch dem verwendeten DHM abhängig ist (vgl. Kapitel 3). Die Verbesserung der Genauigkeit der Georeferenzierung von Satellitenbildern ist grundsätzlich anhand von Passpunkten und mittels anschließender Bildausgleichung möglich (Huber et al., 2004). Jedoch ist bei SAR-Bildern eine präzise manuelle Punktbestimmung sehr schwierig (vgl. Kapitel 2.3) und auch zeitaufwendig. Sie erfordert vor allem Referenzdaten, die jedoch nicht immer verfügbar sind. Eine gute Möglichkeit zur Verbesserung liefert die Simulation von SAR-Bildern anhand von DHMs und die Nutzung von automatisch abgeleiteten Verknüpfungspunkten (homologe Punkte).

### 2.3.2. Simulation von Radarbildern

Die Genauigkeit der Georeferenzierung mittels dem Distanz-Doppler Ansatz (*initial geocoding*) ist hauptsächlich abhängig von der Genauigkeit der Orbitdaten und des verwendeten Modells der Erdoberfläche (z.B. Digitalen Höhenmodells). Die Verbesserung der Georeferenzierung erfolgt gewöhnlich durch Simulation eines SAR-Bildes in initialer Geometrie anhand eines DHMs und anschließender Georeferenzierung mit einer verfeinerten Geometrie, abgeleitet aus Verknüpfungspunkten (Small et al., 2000). Bei der Feinregistrierung erfolgt eine Kreuzkorrelation (Matching) zwischen dem simulierten und realen SAR-Bild, zunächst durch eine grobe Offset-Schätzung über die Korrelationspeaks in beiden Bildern und anschließend durch eine Feinschätzung, bei der die lokalen Verschiebungen bestimmt werden (Guindon, 1995; Wegmüller, 1999).

Die Bildsimulation in Verbindung mit der Korrelationsanalyse erlaubt die automatische Bereitstellung von vielen hundert oder tausend Verknüpfungspunkten zur Ausgleichung der Orbitdaten und Distanz-Doppler Parameter, auch in Gebieten wo GCPs nur schwierig ermittelbar wären (Small et al., 2000). Details zur Parameterschätzung sind u.a. bei Raggam et al. (1993) zu finden. Die geometrische Genauigkeit der beschriebenen Georeferenzierung ist abhängig von der Genauigkeit und Auflösung des DHMs in Verbindung mit dem Geländetyp und dem Einfallswinkel (Huber et al., 2004). Je größer die Geländevariationen sind, umso mehr Kanten und Verknüpfungspunkte können gefunden werden und umso zuverlässiger funktioniert die Georeferenzierung. Die Korrelation zwischen dem realen und simulierten SAR-Bild ist umso höher, je größer die Übereinstimmung zwischen der DHM- und SAR-Bodenauflösung ist. Small et al. (2000) zeigt diesen Zusammenhang beispielsweise am Beispiel von Radarsat Fine Beam Daten ( $6\text{ m} \times 8.9\text{ m}$ ) und DHMs mit einer Bodenauflösung von 10 m, 25 m etc.



**Abbildung 2.12.:** 3D-Geometrie eines Oberflächenelements und dessen Projektion in das SAR-Bild; mit dem Schrägdistanzvektor  $\vec{R}$  (Slant-Range Koordinate),  $x$  als Azimut-Koordinate, dem Flächennormalenvektor  $\vec{n}$ , dem Normalenvektor der lokalen Bildebene  $\vec{m}$  ( $=\vec{x} \times \vec{R}$ ), dem lokalen Einfallswinkel  $\theta_{li}$ , dem Einfallswinkel  $\theta_i$  (vgl. Kapitel A.3), den sphärischen Winkeln  $u$  und  $v$  (Neigungswinkel und Aspektwinkel relativ zu  $z$  und  $x$ ) und dem Projektionswinkel  $\psi$ . Abbildung nach Ulander (1996).

Die Simulation eines SAR-Bildes, d.h. die Beleuchtung eines DHMs, kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Voraussetzung ist, dass der lokale Flächennormalenvektor  $\vec{n}$  sowie der Beleuchtungsvektor  $\vec{R}$  bekannt sind, so dass die Berechnung des lokalen Einfallswinkels  $\theta_{li}$  (Kapitel A.3) bzw. des so genannten Projektionswinkels  $\psi$  (zwischen der Flächennormalen und der Normalen der Slant-Range-Bildebene, siehe Abb. 2.12) erfolgen kann.

Die Simulation dient häufig gleichzeitig der radiometrischen Korrektur (SAR-Kalibrierung) der realen SAR-Bilder, wie sie z.B. für thematische Auswertungen notwendig ist.

Erste Ansätze zur Erzeugung von geometrisch entzerrten Radarbildern mittels Simulation aus einem Digitalen Höhenmodell stammen von (Naraghi et al., 1983). Erste simulationsbasierte (empirische) Geokodierungen in Kombination mit einem einfachen Sensormodell wurden von Domik (1985), anhand der Berechnung eines mittleren Grauwertes für jeden lokalen Einfallswinkel, durchgeführt. Eine Weiterentwicklung von Rauste (1989) berücksichtigt die Range- und Azimut-Komponente des lokalen Einfallswinkels im Gegensatz zu den Berechnungen von Domik et al. (1984). Bayer et al. (1991) testete verschiedene empirische Rückstreuemodelle (Kosinus-basierte Modelle, Polynomiale Modelle, Mittlere-Grauwert-Modelle) zur Kompensation der Rückstreuänderungen aufgrund der lokalen Topographie. Die einfache Sinus-Korrektur (Holecz et al., 1994), die konventionelle Methode zur radiometrischen Korrektur, verwendet den lokalen Einfallswinkel zur Schätzung der lokalen Beleuchtungsfläche  $A(r, a)$  [-] für jedes SAR-Pixel in Range- ( $r$ ) und Azimutkoordinaten ( $a$ ) (vgl. Formel 2.44), berücksichtigt dabei jedoch nicht den Einfluss der Azimut-Neigung einer Fläche wie von Ulander (1996) gefordert (Formel 2.45, Abb. 2.12).

$$A(r, a) \approx \frac{1}{\sin \theta_{li}} \quad (2.44)$$

$$A(r, a) = \frac{1}{\cos \psi} = \frac{1}{\sin \theta_i \cdot \cos u + \cos \theta_i \cdot \sin u \cdot \sin v} \quad (2.45)$$

Die von Beaudoin et al. (1995) beschriebene "Terrain Facet Integration"-Methode berücksichtigt, dass die Topologie der Pixel in Radargeometrie nicht äquivalent zur Kartengeometrie ist und mehrere Karten-Pixel in ein Radarpixel fallen können (Heteromorphismus) Small et al. (1998). Das DHM wird in regelmäßige elementare Facetten zerlegt. Für jedes SAR-Pixel werden die Facetten bestimmt, welche Komponenten des SAR-Pixels sind (Beaudoin et al., 1995). Die lokale Beleuchtungsfläche für jedes SAR-Pixel  $A(r, a)$  ergibt sich durch Integration der Facetten-Flächen  $A_{facet}(N, E)$  im Referenzsystem (z.B. geographische Koordinaten: North/East) (Small et al., 1998):

$$A(r, a) = \sum_{\forall [N, E] \text{ in DHM}} A_{facet}(N, E) \quad (2.46)$$

Die Rückstreuung des simulierten SAR-Bildes (Grauwert-Zuordnung) kann ermittelt werden durch Multiplikation der lokalen Beleuchtungsfläche am Boden  $A_p$  [ $\text{m}^2$ ] (Formel 2.47;  $p_d$  und  $p_a$  siehe Formel 2.1 und 2.7) mit einer empirischen Rückstrefunktion, d.h. einer Funktion des lokalen Einfallswinkels (Wegmüller, 1999). Zur Vereinfachung werden bei der Simulation der SAR-Bilder die Oberflächenart und -eigenschaften nicht berücksichtigt. Das normalisierte (radiometrisch korrigierte) Rückstreubild  $\sigma^0(r, a)$  kann berechnet werden anhand der Radarhelligkeiten  $\beta^0(r, a)$  entsprechend Formel 2.48 (Small et al., 1998).

$$A_p = (p_d \cdot p_a) \cdot A(r, a) \quad (2.47)$$

$$\sigma^0(r, a) = \frac{\beta^0(r, a)}{A(r, a)} \quad (2.48)$$

### 2.3.3. Geokodierung von InSAR-DHMs

Einen Sonderfall bei der Geokodierung von SAR-Daten stellt die Geokodierung von interferometrisch abgeleiteten Höhenmodellen (InSAR-DHMs) dar, bei der die interferometrischen Gleichungen zur Bestimmung der 3D-Position mit genutzt werden. [Hellwich & Ebner \(2000\)](#) geben eine gute Übersicht über die unterschiedlichen Geokodierungsansätze von SAR-Interferogrammen, die in zwei Gruppen unterteilt werden können:

**(1) Die Zwei-Schritt-Verfahren:** Bei diesen klassischen Verfahren werden zunächst die Geländehöhen anhand der interferometrischen Phasendifferenzen abgeleitet und diese anschließend von der Slant-Range Geometrie in ein übergeordnetes Kartenbezugssystem transformiert ([Nico, 2002](#)). Die Ableitung der Geländehöhen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen, zum einen basierend auf den bereits vom „*flat-earth*“ Einfluss befreiten Phasen, zum anderen unter Nutzung der „*raw*“ interferometrischen Phasen ([Small et al., 1996](#)). Die exakte Geokodierung basiert schließlich auf dem Distanz-Doppler Ansatz und Lösung des nichtlinearen Systems der drei Radarabbildungsgleichungen (vgl. Kapitel 2.3.1). Die interferometrisch abgeleitete Höhe wird dabei zu den lokalen Ellipsoid-Radien hinzugefügt. Die drei Oberflächen schneiden sich in zwei Punkten, wobei einer davon die Objektkoordinate ist. Die Georeferenzierung erfolgt gewöhnlich mit einem Ellipsoid oder einem Referenz-DHM, kann aber auch ohne ein Referenz-DHM erfolgen, wenn Höhenverknüpfungspunkte vorhanden sind ([Small et al., 1995](#)).

**(2) Die Ein-Schritt-Verfahren:** Die Berechnung der Objektkoordinaten erfolgt direkt anhand der Sensorpositionen, der Distanzen, Dopplerfrequenzen und interferometrischen Phasen. Voraussetzung bei Repeat-Pass-Interferogrammen ist, dass keine signifikanten Bodenbewegungen und Oberflächenveränderungen stattgefunden haben. Viel zitierte Geokodierungsalgorithmen sind die von [Schwäbisch \(1995\)](#) für Repeat-Pass-Interferogramme und [Madsen et al. \(1993\)](#) für Single-pass Interferogramme. Der zuletzt genannte Algorithmus basiert auf dreidimensionalen Vektorrechnungen, jedoch mit der Einschränkung, dass die Beobachtungsvektoren parallel verlaufen.

Eine effiziente Methode zur Geokodierung von Interferogrammen ohne DHM mittels Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate und Nutzung von GCPs zeigen [Hellwich & Ebner \(2000\)](#), aber auch [Crosetto \(2002\)](#). Diese Methode ist ohne Restriktionen, d.h. für jede beliebige Konfiguration sowie für die Repeat-Pass-Interferometrie, anwendbar. Eine weitere Geokodierungsmethode ohne Restriktionen präsentiert [Nico \(2002\)](#) als eine Lösung in geschlossener Form.

## 2.4. Digitale Höhenmodelle

Voraussetzung für die präzise topographische Phasenkorrektur in einem SAR-Interferogramm ist ein Digitales Höhenmodell, welches möglichst exakt mit der Rückstreuoberfläche der Radarstrahlen übereinstimmt. In diesem Kapitel wird auf die Eignung und Qualität unterschiedlich erzeugter Digitaler Höhenmodelle eingegangen. Nach DIN 18709-1 versteht

man unter einem Digitalen Höhenmodell (DHM) allgemein als Oberbegriff die Menge digital gespeicherter Höhenwerte von regelmäßig oder unregelmäßig verteilten Punkten, die die Höhenstruktur eines Objektes hinreichend repräsentieren. Das Digitale Geländemodell (DGM) repräsentiert die Gelände- oder auch Erdoberfläche, während ein Digitales Oberflächenmodell (DOM) zusätzlich noch die ober- und unterhalb des Geländes befindlichen Objekte, wie Vegetation und Bauwerke mit beschreibt (DIN 18740-3). DHMs sind grundsätzlich keine 3D-Modelle mit senkrechten Flächen wie im CAD-Bereich, sondern 2.5D-Daten (Bartelme, 2005).

Bezüglich der Datenstruktur wird zwischen Vektor-, Raster-, TIN- und Hybridmodellen unterschieden (Bill, 2010). Die Datenstruktur ergibt sich in Abhängigkeit von der Erfassungsmethode (Primärdaten) bzw. der Datengrundlage (Sekundärdaten), dem Reliefcharakter und der Weiterverwendung. Für radarinterferometrische Auswertungen eignen sich prinzipiell nur Raster-Modelle mit gleichmäßigen Punktlagen, zum einen aufgrund der gleichen Struktur der SAR-Daten und der einfacheren Verarbeitung bei der Phasenkorrektur, zum anderen da eine lokale Verdichtung von Höhenwerten an morphologisch kritischen Stellen zu keinem Mehrwert führt, da letztendlich für jedes SAR-Pixel nur ein Phasenwert für das Summensignal vorliegt, der die Höhe des Phasenzentrums repräsentiert. Unregelmäßig verteilte Punkte die durch Dreiecksvermaschung (TIN) verknüpft sind sowie Modelle mit Bruchkanten sind in diesem Sinne nicht zweckmäßig (vgl. Kapitel 2.4.2) und führen eher zu Ungenauigkeiten bei der SAR-Auswertung, aufgrund der Überlagerung mehrerer DHM-Werte in einem SAR-Pixel. Deshalb soll im Folgenden nur auf einige primäre Erfassungsmethoden eingegangen werden, die zur Erzeugung von DHM-Rasterdaten für größere Gebiete (z.B.  $>20 \times 20 \text{ km}^2$ ) geeignet sind (Bill, 2010). Die Raster-Modelle werden gewöhnlich unter Anwendung von Interpolations- und Approximationsverfahren meist aus unregelmäßig verteilten Messpunkten generiert. Details zur Flächeninterpolation und -approximation liefern Kraus (2000) und Bartelme (2005).

### 2.4.1. Erfassungsmethoden

Zur großflächigen digitalen Erfassung von Höhenmodellen der Erdoberfläche eignen sich photogrammetrische Luftbildaufnahmen, Airborne Laserscanning (ALS) Daten, flug- und satellitengestützte SAR-Daten sowie Stereobilder von Satelliten. Terrestrische Verfahren (Tachymetrie, GPS, Dynamische Profilierung, Echolot) dienen hauptsächlich der Verdichtung der Höheninformationen z.B. in für den Sensor nicht sichtbaren Bereichen oder auch zur Aufnahme von Einzelpunkten und Bruchkanten. Die Digitalisierung von z.B. Höhenlinien findet immer weniger Anwendung.

#### 2.4.1.1. Photogrammetrie und Airborne Laserscanning

Bei der Luftbildphotogrammetrie, als klassisches Verfahren zur DHM-Generierung, werden mittels analoger oder digitaler Kameras streifenweise Bildverbände zentralperspektivisch erfasst, die sich überlappen und über die Bündelblockausgleichung mittels Pass- und

Verknüpfungspunkten orientiert werden. Über die Stereobildauswertung erfolgt die indirekte Ableitung eines DHM. Im Gegensatz dazu finden beim Laserscanning (auch Lidar: light detection and ranging) direkte Entfernungsmessungen statt, indem stark gebündelte kohärente Laserimpulse im Nahen Infrarot aktiv zur Erdoberfläche ausgesendet werden (Wagner et al., 2003; Baltsavias, 1999) und die Laufzeit der zurückgestreuten Signale gemessen wird. Aus den Punktwolken können verschiedene Höhenmodelle (DOM, DGM), aufgrund der Reflexion der Laserimpulse an Objektoberflächen wie auch am Boden, abgeleitet werden. Zur Ableitung von DGMs aus photogrammetrisch abgeleiteten DOMs sind morphologische Filterungen notwendig (Haala, 2005). Details zur photogrammetrischen Höhenbestimmung und ALS sind u.a. bei Kraus (2004) und Konecny & Lehmann (1984) zu finden; speziell zu *Full-Waveform* ALS-Systemen bei Hug et al. (2004).

Die Luftbildphotogrammetrie durchläuft seit einiger Zeit die Umstellung von den analogen Filmkameras zu den digitalen Luftbildkameras mit dem Ziel der automatischen Ableitung von 3D-Punktwolken und Erfassung von 2.5D-Höhenmodellen in einer Qualität, die bisher nur mit ALS-Messungen möglich sind (Haala et al., 2010). Vorteile der digitalen Luftbildphotogrammetrie gegenüber ALS bei der DHM-Ableitung sind beispielsweise die hochentwickelten und geprüften Auswertalgorithmen, das relativ einfache, qualitative und robuste Aufnahmeverfahren, die einfachere Flugplanung und die Möglichkeit neben einem DHM auch andere Produkte abzuleiten. In bewaldeten und bebauten Gebieten sowie Bereichen ohne Textur sind ALS-Systeme den photogrammetrischen Systemen bei der Höhenableitung deutlich überlegen (Kraus, 2004). Beide Systeme sind stark wetterabhängig, wobei die Qualität photogrammetrischer Aufnahmen stärker durch die Jahres- und Tageszeit (u.a. wegen Schatten) beeinflusst wird.

Die empirische Höhengenaugigkeit photogrammetrisch abgeleiteter DHMs ist abhängig von der Flughöhe  $H$  [m], der Kamerakonstante  $k$  [m] und der Geländeneigung  $\alpha$  und kann *a posteriori* nach Kraus (2004) wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_z[\text{m}] = \pm \left( 0.15\% \cdot H + \frac{1.5 \cdot 10^{-4}}{k} \cdot H \cdot \tan \alpha \right) \quad (2.49)$$

Die empirische Höhengenaugigkeit aus ALS-Daten generierten DHMs ist gewissermaßen unabhängig von der Flughöhe. Entscheidend ist die erreichbare Punktzahl  $n$  pro  $m^2$ , die zum einen vom Scanner, d.h. dessen Öffnungswinkel und Messrate abhängig ist, zum anderen von der Flughöhe und -geschwindigkeit (Karel et al., 2006):

$$\sigma_z[\text{cm}] \approx \pm \left( \frac{6}{\sqrt{n}} + (30 \dots 50) \cdot \tan \alpha \right) \quad (2.50)$$

Die aktuell erreichbaren Höhengenaugigkeiten von ALS-Systemen betragen etwa  $\pm 5$  cm, wobei es durch die Geokodierung noch zu Verlusten kommt, so dass die absoluten Höhengenaugigkeiten bei etwa  $\pm 10$ - $15$  cm liegen. Die Lagegenauigkeiten betragen etwa  $\pm 5$  cm. Die Genauigkeit der Vegetationshöhenbestimmung liegt bei etwa 15 cm in Abhängigkeit vom Vegetationstyp, der Höhe und Dichte (Göpfert & Heipke, 2006). Die Höhengenaugigkeit von photogrammetrisch generierten DHMs mit digitalen Kameras liegt aktuell bei besser/gleich der Objektpixelgröße am Boden (Ground Sample Distance, GSD) (Jacobsen,

2011). Beispielsweise zeigt [Haala et al. \(2010\)](#), dass bei einer GSD von 8 cm Höhengenaugigkeiten von 3.3 cm im Vergleich zu einem Laser-DOM bei asphaltierten Flächen erreichbar sind. Gemessene Höhenmodelle (Stereoplotting) liefern eine Höhenmessgenauigkeit für klar identifizierbare Punkte von 1.0-1.2 Pixel. Die Lagemessgenauigkeit klar identifizierbarer Punkte im digitalen Stereomodell liegt bei  $\leq 0.6$  Pixel ([Spreckels & Schlienkamp, 2010](#)).

### 2.4.1.2. Optische Satellitendaten

Mit dem Start des Satelliten Ikonos im Jahre 1999 ist das Interesse an Stereobildpaaren aus sehr hochauflösenden (VHR) optischen Satellitendaten mit Bodenauflösungen unter 1 m zur Ableitung von DHMs deutlich gestiegen. Bei along-track Bildpaaren werden quasi simultan mit CCD-Sensoren Bilder erzeugt, während bei across-track die Bildaufnahmezeitpunkte unterschiedlich sind, was das Messen von homologen Punkt erschwert. Die DHM-Generierung erfolgt wie in der Photogrammetrie über Matching-Verfahren. Die erreichbaren Höhengenaugigkeiten der abgeleiteten Oberflächenmodelle betragen etwa 1-5 Pixel bei hochauflösenden Satellitendaten (vgl. Tab. D.1), sind jedoch sehr stark abhängig vom Gelände und der Generierungssoftware.

### 2.4.1.3. SAR-Verfahren

Radaraufnahmen liefern wie die Photogrammetrie lediglich eine 2D-Abbildung der 3D-Erdoberfläche. Zu Erfassung der Topographie sind in der Regel zwei Aufnahmen von unterschiedlichen Aufnahmepositionen notwendig. Die Rekonstruktion der Topographie aus SAR-Daten ist seit 40 Jahren Gegenstand aktueller Forschungen, wobei erst mit dem Start der ersten zivilen Radarsysteme in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts (Shuttle Imaging Radar: SIR-A (1981), SIR-B (1985)) praktische Untersuchungen stattfinden konnten ([Toutin & Gray, 2000](#)). Die Modellierung von Höhen aus SAR-Daten kann mittels der Interferometrie, Stereoskopie, Klinometrie, Polarimetrie erfolgen. Einen aktuellen Stand zu diesen Verfahren liefern [Toutin & Gray \(2000\)](#).

Bei der **SAR-Interferometrie** werden zwei komplexe SAR-Aufnahmen, d.h. Projektionen der Erdoberfläche, kombiniert, die von unterschiedlichen Orbitpositionen aufgenommen wurden (vgl. Kapitel 2.2.1). Die Nutzung von mehreren interferometrischen Paaren mit unterschiedlichen Basislinien führt zur Verbesserung der Genauigkeit der Höhenableitung. Bei SAR-Interferometrie werden Phasen ausgewertet, währenddessen bei der **Stereo-Radargrammetrie**, vergleichbar mit der Stereo-Photogrammetrie, die Amplitudeninformationen genutzt werden und zwischen den Aufnahmen größere Winkelunterschiede bestehen müssen ([Leberl, 1978](#)). Eine Gegenüberstellung zwischen der SAR-Interferometrie und der Stereo-Radargrammetrie ist bei [Gelautz et al. \(1999\)](#) zu finden. Eine Kombination aus der Stereo-Radargrammetrie und der SAR-Interferometrie stellt die Methode nach [Bamler \(2000\)](#) dar, die so genannte „*Interferometric stereo radargrammetry*“, die InSAR-Paare mit großen Basislinien zur Ableitung von Höhen nutzt. Sie ist

ein Grenzfall und findet ihre Anwendung z.B. in der sogenannten *ERS-ENVISAT Tandem (EET) Cross-Interferometry* (Monti Guarnieri & Prati, 2000; Wegmüller et al., 2009).

Eine weitere Methode zur Ableitung der Topographie aus Radardaten ist die **Radarklinometrie**, bei der anhand der Intensität der Rückstreuung Hangneigungen bestimmt werden. Ein Anwendungskonzept der Radarklinometrie ist das „*shape from shading*“ Verfahren (Frankot & Chellappa, 1990; Bors et al., 2003), eine Adaption der Photoklinometrie entwickelt von Horn (1975), welches jedoch nur bei homogenen Oberflächen und in Range-Richtung erfolgreich angewendet werden kann. Die **SAR-Polarimetrie** erlaubt die Messung von Geländeneigungen und somit die Schätzung von Geländehöhen in Azimutrichtung (Schuler et al., 1996), und kann mit der Radarklinometrie kombiniert werden. Ein Vorteil der Radarklinometrie und SAR-Polarimetrie gegenüber den anderen Verfahren ist, dass nur ein einzelner Überflug zur Rekonstruktion von Höhen benötigt wird. Aufgrund der Grenzen beider Verfahren, insbesondere hinsichtlich der Höhengenaugigkeit, ist das Interesse in der Praxis aktuell sehr gering. Die SAR-Interferometrie und Stereo-Radargrammetrie sind die am meisten angewendeten Verfahren insbesondere aufgrund immer höherauflösenderer SAR-Sensoren, neuer interferometrischer Missionen wie TerraSAR-X und Tandem-X und der Weiterentwicklung kombinierter Verfahren, z.B. die Nutzung von *ascending* und *descending* SAR-Daten in der Stereo-Radargrammetrie zur Verbesserung der Ergebnisse in Layover- und Schattenbereichen (Toutin, 1996).

Die erreichbaren Höhengenaugigkeiten von SAR-Höhenmodellen sind vor allem vom Sensor, der Aufnahmegeometrie und der Orbitgenauigkeit abhängig. Bei den interferometrischen Verfahren ist die Genauigkeit zusätzlich vom Phasenrauschen, d.h. der Genauigkeit der gemessenen Phasen, abhängig. Knöpfle et al. (1998) zeigen am Beispiel von Daten der *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), wie anhand der genannten Parameter die empirische Höhengenaugigkeit eines InSAR-DHM berechnet werden kann. Details zur SRTM-Mission sind u.a. bei Roth et al. (2001) und Rosen et al. (2001) zu finden. Die absoluten Genauigkeiten von Radar-DHMs werden üblicherweise in offenem Gelände überprüft, da in gemischtem Gelände (z.B. Bereiche mit Bebauung, Bäumen, Wasser) die Höhe des Phasenzentrums nicht mit der Höhe eines vermarkten Passpunktes übereinstimmt und zusätzlich mit höherer Wahrscheinlichkeit Layover und Schatten auftritt. Aus SAR-Daten abgeleitete Höhendaten entsprechen grundsätzlich jedoch einem DOM, in Abhängigkeit vom Sensor und der Eindringtiefe der Radarstrahlen (vgl. Kapitel 2.1.2.1). In Tab. 4.3 sind die Genauigkeiten von SRTM-Daten mit aufgeführt. ERS-1/-2 Tandem-DHMs erreichen Genauigkeiten in der Größenordnung von 5-10 m in flachem, hügeligem Gelände und 10-50 m in bergigen Gebieten (Roth et al., 1998), ähnlich wie SRTM. EET-DHMs können Höhengenaugigkeiten unter 1 m erreichen (Monti Guarnieri & Prati, 2000), wobei dies sehr stark abhängig ist von dem genutzten Eingangs-DHM und vom Gelände. Sowohl für Bereiche mit starker Vegetation sowie sehr starken Höhenvariationen, wie z.B. in Städten, ist die Erzeugung von EET-DHMs nicht möglich (Wegmüller et al., 2009). Für die TanDEM-X Mission ist ein globales DHM (12 m × 12 m) mit einer absoluten Höhengenaugigkeit von <10 m (relativ: <2 m (4 m bei  $\alpha > 20^\circ$ )) geplant (Krieger et al., 2007). Aufgrund von aktuell sehr hochauflösenden SAR-Modi (vgl. Tab. F.1.) können mittels der Stereo-Radargrammetrie absolute Genauigkeiten von unter 1 m für die Lage und ~3 m (LE68) bzw. ~6 m (LE90) für die Höhe erzielt werden (Toutin, 2010).

## 2.4.2. Qualitätskriterien

Die Datenqualität wird im Allgemeinen einem ganzen Datensatz zugeordnet und beschreibt die Gesamtheit aller charakteristischen Eigenschaften eines Produktes, die die Erfüllung bestehender Anforderungen ermöglichen (Bartelme, 2005). Die Eignung eines Höhenmodells für die topographische Korrektur von Interferogrammen sowie auch deren Georeferenzierung, wird nicht allein dadurch bestimmt, wie hochauflösend sondern ob es zweckentsprechend ist. Höhenmodelle sind grundsätzlich „fremde Daten“ und stehen nicht in direkter Beziehung zu SAR-Daten, unabhängig von dessen Qualität. Höhenmodelle sind nur eine Abstraktion der realen Welt und bestehen aus diskreten Werten, d.h. es gibt weder ein perfektes, vollständiges noch richtiges Modell (Bartelme, 2005).

Quantitative und nicht-quantitative Qualitätskriterien, die auch für DHMs gelten und auf den Normen ISO 19113 und ISO 19114 basieren, sind laut Bartelme (2005) folgende:

### Quantitative:

- Vollständigkeit
- Genauigkeit
- räumliche Auflösung
- zeitliche Genauigkeit
- Zuverlässigkeit
- Zugänglichkeit
- logische Konsistenz

### Nicht-quantitative:

- Herkunft
- Zweck und Verwendung
- anwendungsspezifische Qualitätsangaben

Im Folgenden soll näher auf die Qualitätskriterien für DHMs eingegangen werden, die im Rahmen dieser Arbeit von Bedeutung sind.

**Vollständigkeit.** Die Vollständigkeit umfasst sowohl Datenlücken (*invalids*) wie auch das allgemeine Nichtvorhandensein von bestimmten Objekten bzw. auch deren Zuvielvorkommen im Datensatz. Der Begriff ist eng gekoppelt an die zeitliche Gültigkeit eines Höhenmodells. Speziell in stark urbanen und industriell geprägten Bereichen kommt es zu ständigen Veränderungen (z.B. Neubebauung) was zu unvollständigen Datensätzen führt. In Bergbauregionen kommt es zur Schüttung wie auch Abtragung von Abraumhalden. Die „Vollständigkeit“ wird in Prozent angegeben. Beispielsweise deckt die SRTM-X Daten nur 40% der Landmasse der Erde ab. In gebirgigen Regionen treten zusätzlich Löcher in Schattenbereichen auf, wie sie typisch für seitwärtsblickende Radarsysteme sind.

**Genauigkeit.** Jeder Höhenwert eines DHMs besitzt eine Abweichung gegenüber der Realität. Somit ist die Angabe einer einzigen Genauigkeitsangabe für die Lage und Höhe für ein DHM sehr unpräzise und beschreibt nicht die räumliche Variation der Genauigkeit z.B. in Abhängigkeit von der Höhenvariabilität, der Geländeneigung, der Datendichte und der Interpolationsmethode.

Die „äußere Genauigkeit“ wird auch als *absolute Genauigkeit* bezeichnet und ergibt sich durch den Vergleich mit Kontroll-/Referenzmessungen mit einer übergeordneten Genauigkeit. Anhand der Differenzen, hier am Beispiel der Höhen ( $dh_i = h_i - h_{i,ref}$ ), kann der so genannte *Root Mean Square Error* (RMSE) über die Anzahl der Kontrollmessungen  $n$  berechnet werden (Kraus, 2004):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dh_i^2} \quad (2.51)$$

Der RMSE enthält alle Fehlereinflüsse, auch systematische. Unter der Annahme, dass keine systematischen Fehler in Höhendaten enthalten sind bzw. diese durch Mittelbildung (Mittelwert  $\mu$ ) oder über Passpunkte abgespalten wurden, erhält man anhand der verkleinerten Differenzen  $v_i = dh_i - \mu$  die empirische Standardabweichung  $\sigma$  (Kraus, 2004):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (2.52)$$

Die empirische Standardabweichung  $\sigma$  beschreibt die „innere Genauigkeit“, d.h. *Präzision* oder auch *relative Genauigkeit*. Sie beschreibt jedoch nicht die absolute Genauigkeit, d.h. die „Richtigkeit eines DHMs“. Da Kontrollmessungen mit höherer Genauigkeit zur Prüfung der absoluten Genauigkeiten nicht immer vorhanden sind, wird anhand von Zweitmessungen die Genauigkeit bestimmt. Die Standardabweichung des Mittels bei redundanten Daten, entsprechend Formel 2.52 mit den Differenzen  $d$  der Einzelmessungen statt  $v$ , beschreibt die relative Genauigkeit. Da die Genauigkeiten der Einzelmessungen etwa gleich sind, ergibt sich die Ist-Standardabweichung  $\sigma_{\text{ist}}$  entsprechend Kraus (2004):

$$\sigma_{\text{ist}} = \sigma / \sqrt{2} \quad (2.53)$$

Unter der Annahme, dass tatsächlich keine systematischen Fehler in den Höhendaten enthalten sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Fehler mittelwertfrei ( $\mu=0$ ) normalverteilt sind und mit einer Wahrscheinlichkeit (Konfidenzintervall) von 68.27% innerhalb von  $\pm 1\sigma$  (bzw. 90% ( $\pm 1.65\sigma$ ), 95.45% ( $\pm 2\sigma$ )) der wahren Lage bzw. Höhe liegen. Da in der Realität die Fehler nicht immer frei von systematischen Fehlern sind, ist es üblich neben  $\sigma$  bzw. RMSE auch ein Konfidenzintervall (Perzentil) für ein DHM unabhängig von der Verteilungsfunktion mit anzugeben. Beispielsweise bedeutet LE95, dass 95% aller Höhenfehler kleiner als der angegebene absolute lineare Fehler sind. Für die Lagegenauigkeit wird üblicherweise der zirkulare Fehler (CE) angegeben, der beschreibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich ein Punkt innerhalb eines Kreisradius befindet. Die Berechnung des relativen Fehlers erfolgt nicht immer einheitlich entsprechend Formel 2.52. Beispielsweise entspricht der relative Höhenfehler (90% Konfidenzintervall) oder auch „*point-to-point error 90%*“ bei SRTM-Daten für eine 1°-Zelle etwa  $2.33 \cdot \sigma_h$ .

Da Referenzdaten zur Bestimmung der DHM-Genauigkeit häufig sehr kostenintensiv sind, erlauben empirische Berechnungen eine *a posteriori* oder *a priori* Schätzung. Diese ist abhängig von der Messmethode sowie den Filter- und Interpolationsalgorithmen (vgl. Genauigkeitsangaben in Kapitel 2.4.1).

**Räumliche Auflösung.** Die räumliche Auflösung eines DHMs gibt an, inwieweit die Höhe eines Objektpunktes durch das Modell überhaupt repräsentiert werden kann. Die horizontale Auflösung beschreibt die Datendichte oder auch Diskretisierung der Höheninformationen in xy-Richtung. Bei Rastermodellen ist die Datendichte homogen. Der Höhenwert einer jeden Rasterzelle repräsentiert eine mittlere Höhe (bzw. bei SAR-DHMs die Höhe des Phasenzentrums) für eine Fläche von z.B.  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ . Die Auflösung bestimmt letztendlich die maximal erreichbare Genauigkeit. Die vertikale Auflösung beschreibt, welche Höhenunterschiede noch detektierbar sind. Sie ist zum einen durch das Aufnahmesystem gegeben, und ist z.B. bei Radar-DHMs abhängig vom relativen Rauschen, zum anderen durch das gewählte Datenformat. Beispielsweise bei Integer-Höhendaten mit Angabe in [m] ist nur eine Meter-genaue Höhenunterscheidung möglich.

**Zeitliche Genauigkeit.** Höhendaten sind zeitlich sehr sensible Daten, da die Höhen einer ständigen Veränderung unterliegen. Aufnahmedatum bzw. -zeitraum sowie die zeitliche Gültigkeit stellen die relevanten Kriterien für die Nutzung eines DHM dar. Die zeitliche Gültigkeit ist abhängig vom Gebiet und der Flächennutzung sowie dessen Veränderungsgeschwindigkeit. Urbane Räume unterliegen einer ständigen Veränderung z.B. aufgrund von Bauaktivitäten. Vegetationsbereiche sind quasi sich kontinuierlich verändernde Bereiche, was sich bei DOMs sehr deutlich auf deren Genauigkeit auswirkt. Bodenbewegungen und -verformungen können Höhenänderungen bewirken, was die Nutzbarkeit von Höhenmodellen für spezielle Anwendungen zeitlich stark verkürzt. Speziell für radarinterferometrische Auswertungen können Höhenmodelle sehr schnell an Aktualität verlieren, was nicht vernachlässigbar ist, wie die Untersuchungen in dieser Arbeit zeigen.

**Zuverlässigkeit und Konsistenz.** Die Zuverlässigkeit eines DHMs beschreibt, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, einen Höhenfehler zu entdecken und wird wesentlich durch die Redundanz der Daten beeinflusst. Konsistenz-Prüfungen dienen u.a. zur Aufdeckung von systematischen Fehlern wie Bildverschiebungen infolge einer ungenauen Sensororientierung. Bei flugzeuggetragenen Systemen können aufgrund von Turbulenzen beim Flug wellenförmige Effekte in den Höhendaten auftreten, die korrigiert werden müssen. Die Prüfung der topologischen Konsistenz ist beispielsweise bei Radar-DHMs in Layover-Bereichen bedeutsam. Der Grad der Qualitätsprüfung und Datenkorrektur spiegelt die Zuverlässigkeit eines DHM-Produkts wider.

**Zugänglichkeit.** Die Zugänglichkeit von Höhendaten ist zum einen abhängig von deren Verfügbarkeit, die z.B. gebunden ist an die technische Realisierbarkeit, zum anderen deren Zugriffsberechtigung und auch deren Kosten! SRTM-Höhendaten stehen beispielsweise weltweit kostenlos für Nutzer zur Verfügung, während aktuelle und hochauflösendere DHMs verhältnismäßig teuer sind, so dass ihre Nutzbarkeit eingeschränkt wird.

**Herkunft und Zweck.** Je nach Anwendung sind Angaben zum Aufnahmesystem und der Aufnahmemethode, zur Generierungssoftware sowie zum erstellten Produkt (DOM, DGM) von Interesse. Eng gekoppelt an den Herstellungsprozess ist auch der Zweck für den ein DHM erstellt wurde z.B. ob es für Gewässermodellierungen genutzt werden soll. Höhenmodelle, die national oder global angeboten werden, sind üblicherweise für viele Anwendungen nutzbar, wenn auch nicht immer „zweckentsprechend“.

---

# Funktionale Zusammenhänge

---

Im folgenden Kapitel werden die funktionalen Zusammenhänge dargestellt, die den Einfluss von Höhenfehlern auf die radarinterferometrische Bodenbewegungsmessung beschreiben. Der Begriff „Höhenfehler“ schließt alle tatsächlichen Fehler ein, die sich aufgrund der in Kapitel 2.4.2 genannten Qualitäts- oder auch Ungenauigkeitsfaktoren ergeben.

### 3.1. Topographische Phasenkorrektur

Bei der topographischen Phasenkorrektur mit einem externen Höhenmodell wirken sich „Höhenfehler“  $\partial h$ , unabhängig von der Ungenauigkeitsursache, unmittelbar auf die differentielle Phase  $\phi_{DInSAR}$  aus, d.h. ein ungenaues DHM führt zur unzureichenden Korrektur der topographischen Phasen. Topographiebedingte Phasenfehler ( $\partial\phi_{\text{Topo}} \hat{=} \phi_{\text{DHM-Error}}$ ) führen wiederum bei der Phasenabwicklung zu fehlerhaft abgeleiteten Bodenbewegungen.

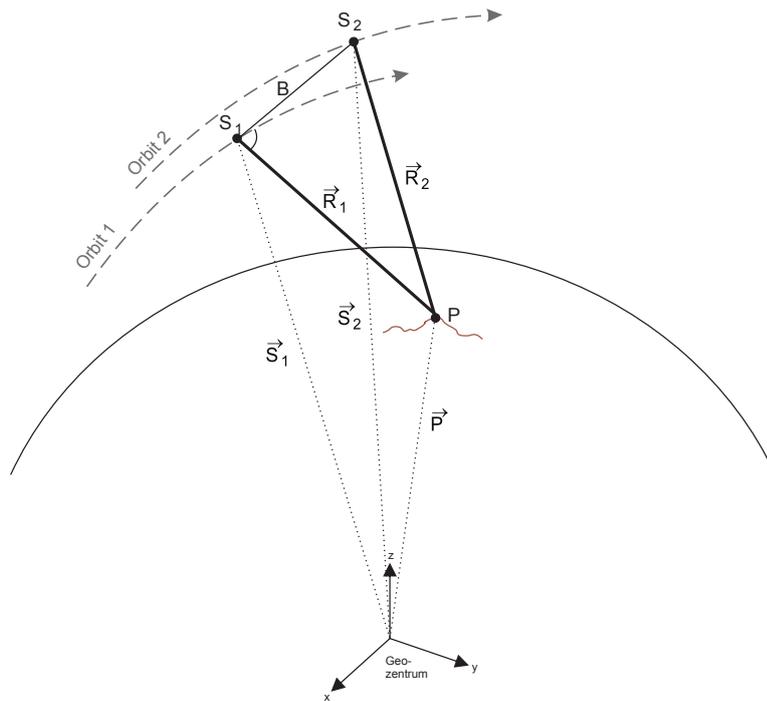
Die Simulation der aufnahmebedingten Phase erfolgt mittels der Distanz-Doppler-Gleichungen (vgl. Kapitel 2.3.1) für jedes Pixel in Range-Doppler-Koordinaten (RDC). Für jedes Pixel mit einer Range- und Azimut-Koordinate ist mit der Range-Zeit  $\tau$  die Signallaufzeit gegeben und mit der Null-Doppler-Azimut-Zeit  $t$  die Aufnahmezeit bei der die Beobachtungsrichtung zu dem Pixel senkrecht zur Flugrichtung war (Null-Doppler-Bedingung) (Schwäbisch, 1995). Beginnend mit der Azimut-Zeit  $t_0$ , der entsprechenden Schrägdistanz  $R_1$  und der aus den Orbit-State-Vektoren abgeleiteten Sensorposition  $\vec{S}_1$

(Abb. 3.1) erfolgt das iterative Lösen der Distanz-Doppler-Gleichungen, bis man die Position  $\vec{P}$  des Pixels bezogen auf das raumfeste kartesische Koordinatensystem ermittelt hat (Schwäbisch, 1995). Als Modell der Erdoberfläche wird das bei der Geokodierung in RDC-Koordinaten transformierte Digitale Höhenmodell verwendet. Höhenmodellfehler bewirken an dieser Stelle bereits Fehler bei der Bestimmung von  $\vec{P}$ , die aufgrund des iterativen Vorgangs funktional nicht eindeutig beschreibbar sind.

Die Bestimmung der Sensorposition  $\vec{S}_2$  der zweiten Szene erfolgt durch Lösen der aus der Null-Doppler-Bedingung resultierenden Gleichung:

$$(\vec{P} - \vec{S}_1) \cdot \vec{S}_2 = 0. \quad (3.1)$$

Anhand der Sensorposition  $\vec{S}_2$  kann  $R_2$  sowie die Basislinie  $B$  ermittelt werden. Ist die Basislinie bereits durch die präzise Koregistrierung der zweiten Szene bezogen auf die erste Szene gegeben, erfolgt damit die Bestimmung von  $R_2$ . Die Differenz  $\Delta R$  von  $R_1$  und  $R_2$  kann entsprechend Formel 2.11 in die aufnahmebedingte Phase, bestehend aus der geometrie- und topographiebedingten Phasenkomponente, umgewandelt werden. Die simulierte Phase wird anschließend vom Interferogramm subtrahiert.



**Abbildung 3.1.:** Aufnahmeconfiguration zur Simulation der aufnahmebedingten Phase

Höhenfehler haben bei der Simulation Einfluss auf die Genauigkeit der bestimmten Schrägdistanzen  $R$ , aber auch auf die Genauigkeit der Bestimmung der Basislinie  $B$  und des Basislinienwinkels  $\zeta$ , jedoch in Abhängigkeit von der Methode der Basislinienschätzung. Eine kurze Übersicht über die verschiedenen Methoden zur Schätzung der Basislinie zeigt Small et al. (1996). Zusammen mit dem Höhenfehler selbst wirken sich diese Ungenauigkeiten auf die Genauigkeit der topographischen Phasenschätzung nach Formel 2.19 aus.

Da  $R$  sehr groß ist, ist der Einfluss höhenfehlerbedingter Schrägdistanzfehler  $\partial R$  auf  $\phi_{\text{topo}}$  nur sehr gering (vgl. Kapitel 3.2.1). Dagegen wirken sich Basislinienlängen-  $\partial B$  und -winkelfehler  $\partial \xi$  sowie Höhenfehler  $\partial h$  sehr stark auf  $\phi_{\text{topo}}$  aus, insbesondere wenn  $B$  und  $h$  selbst sehr groß sind. Der Basislinienfehler infolge von Höhenfehlern ist jedoch sehr klein, und wesentlich stärker abhängig von der Genauigkeit der Orbitdaten (vgl. Kapitel 3.1.2). Aus diesem Grund soll zunächst auf den unmittelbaren Einfluss des Höhenfehlers  $\partial h$  auf die Genauigkeit der simulierten topographischen Phase eingegangen werden. Bei den Betrachtungen wird auf aktuell genutzte Radarsensoren eingegangen. Da ERS-1/-2 und Radarsat-2 vergleichbare Ergebnisse wie Envisat zeigen, wie auch COSMO-SkyMed und TerraSAR-X, beschränken sich die Darstellungen auf die drei Sensoren Envisat ASAR, TerraSAR-X und ALOS PALSAR sowie deren Sensor- und Aufnahmeparameter (vgl. Tab. F.1). Da ALOS PALSAR standardmäßig im Beam-Modus F8 mit  $\theta=34.3^\circ$  bzw.  $\theta_i=38.8^\circ$  operiert, erfolgten alle Berechnungen für diesen Sensor nur mit diesen Parametern.

### 3.1.1. Der Einfluss des Höhenfehlers auf die Genauigkeit der Höhenänderungen

Den Zusammenhang zwischen der Geländehöhe  $h$  und der aufnahmebedingte Phase  $\phi(h)$  ist entsprechend Formel 2.15 und 2.11 vollständig unter Berücksichtigung paralleler Blickrichtungen (*far-field* Approximation) gegeben durch (Schwäbisch, 1995):

$$\phi(h) = -\frac{4\pi \cdot B}{\lambda} \cdot \left( \sin(\xi - \theta) + \frac{\cos(\xi - \theta)}{R_1 \cdot \sin \theta} \cdot h + \frac{\cos \xi}{2 \cdot R_1^2 \cdot \sin^3 \theta} \cdot h^2 \right) \quad (3.2)$$

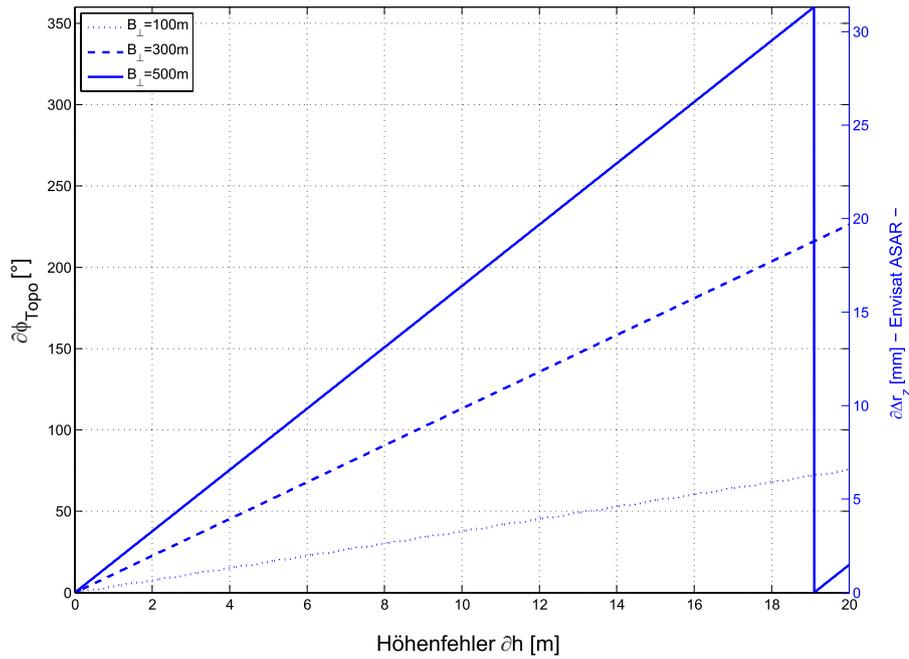
Durch die partielle Ableitung nach der Geländehöhe  $h$  ergibt sich der absolute topographiebedingte Phasenfehler  $\partial \phi_{\text{topo}}$ , der näherungsweise linear abhängig von  $\partial h$  ist:

$$\partial \phi_{\text{topo}} \approx -\frac{4\pi \cdot B_{\perp}}{\lambda \cdot R_1 \cdot \sin \theta} \cdot \partial h \quad (3.3)$$

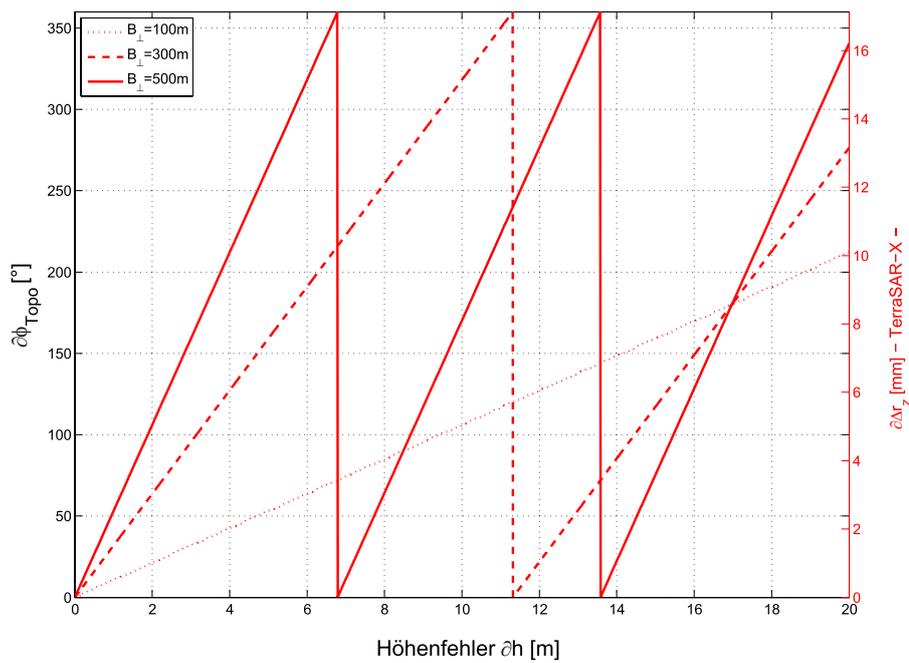
Der quadratische Term kann nach der Ableitung vernachlässigt werden, da er sehr kleine Werte annimmt, selbst bei sehr großen Geländehöhen wie z.B.  $h=4000$  m. Der topographiebedingte Phasenfehler ist sehr stark abhängig von der geometrischen Basislinie  $B_{\perp}$ , jedoch auch vom Sensor und dessen Aufnahmeparametern, wie anhand der Abb. 3.2 und 3.3 für aktuelle Sensoren dargestellt ist. Da die Phase zwischen  $-\pi$  und  $+\pi$  gemessen wird, kann sich für ein Pixel ein maximaler theoretischer Phasenfehler von  $360^\circ$  ergeben, weshalb alle Phasenfehler-Abbildungen in diesem Kapitel nur bis  $360^\circ$  skaliert sind. Bei der räumlichen Phasenabwicklung eines differentiellen Interferogramms ist jedoch nicht auszuschließen, dass auch größere Phasenfehler auftreten können (Kapitel 4.3.1.1), aufgrund von Fehlern bei der Integration der Phasendifferenzen von einem Pixel zum nächsten.

Der maximale Fehler der vertikalen Bewegung  $\partial \Delta r_z$  beträgt nach Formel 2.21 und Formel 2.30:

$$\partial \Delta r_z \leq \frac{\lambda}{2 \cdot \cos \theta_i} \quad (3.4)$$



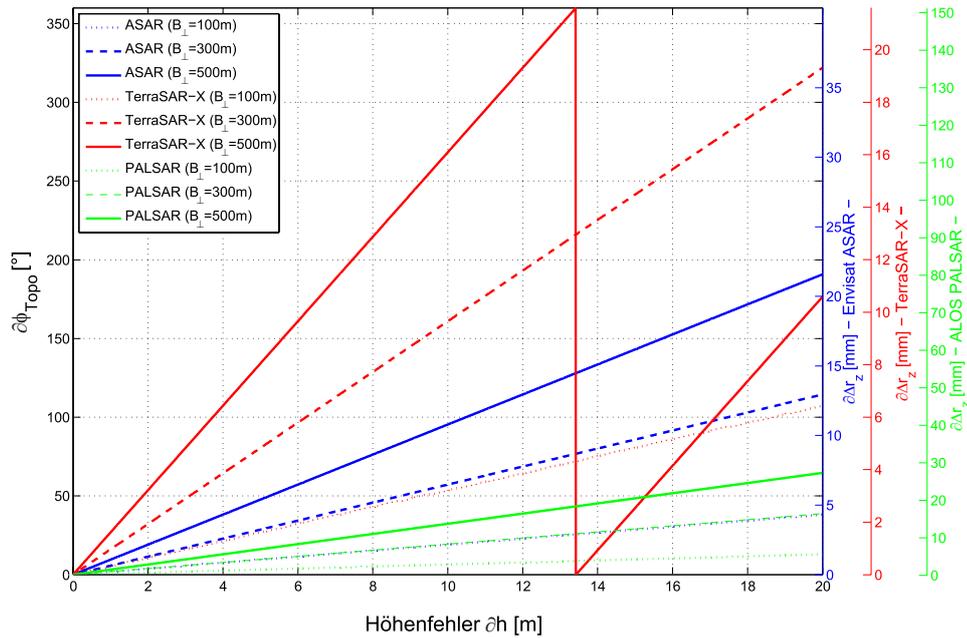
(a)



(b)

**Abbildung 3.2.:** Auswirkungen von Höhenfehlern auf die topographische Phasenkorrektur und den sich ergebenden relativen Phasenfehler  $\partial\phi_{topo}$  (linke Y-Achse), der wiederum zu Fehlern bei der Erfassung von vertikalen Bewegungen  $\partial\Delta r_z$  (rechte Y-Achse) führt in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Sensors. Die Diagramme zeigen die Ergebnisse für den Blickwinkel  $\theta=23^\circ$  für verschiedene Basislinien  $B_\perp$  (100, 300 und 500 m) der Satelliten (a) Envisat ASAR und (b) TerraSAR-X. Je größer die senkrechte Basislinie ist, umso größer sind die topographiebedingten Phasenfehler  $\partial\phi_{topo}$  im differentiellen Interferogramm.

Je kleiner die Wellenlänge  $\lambda$  sowie die Flughöhe  $H_{\text{sat}}$  und somit die Schrägdistanz  $R_1$  ist (z.B. wie bei TerraSAR-X und COSMO-SkyMed im Vergleich zu ALOS PALSAR), umso stärker wirken sich Höhenfehler  $\partial h$  in den differentiellen Interferogrammen aus. Flache Blickwinkel  $\theta$  haben nicht nur den Vorteil, dass weniger Layover in SAR-Bildern auftritt, was bei Deformationsmessungen von Vorteil ist, sondern dass auch die Phasenfehler aufgrund von Höhenfehlern bei der topographischen Phasenkorrektur geringer sind. Wie in Abb. 3.2 sowie Abb. 3.3 zu sehen ist, entspricht der Phasenfehler  $\partial\phi_{\text{topo}}$ , der sich in einem TerraSAR-X Interferogramm aufgrund von Höhenfehlern ergibt, bei einer Basislinie  $B_{\perp}$  von etwa 100 m etwa dem der eines Envisat Interferogramms mit  $B_{\perp}=300$  m. Die Phasenfehler beim PALSAR Sensor sind dagegen deutlich kleiner als bei TerraSAR-X und Envisat, aufgrund der deutlich größeren Wellenlänge (Abb. 3.3).



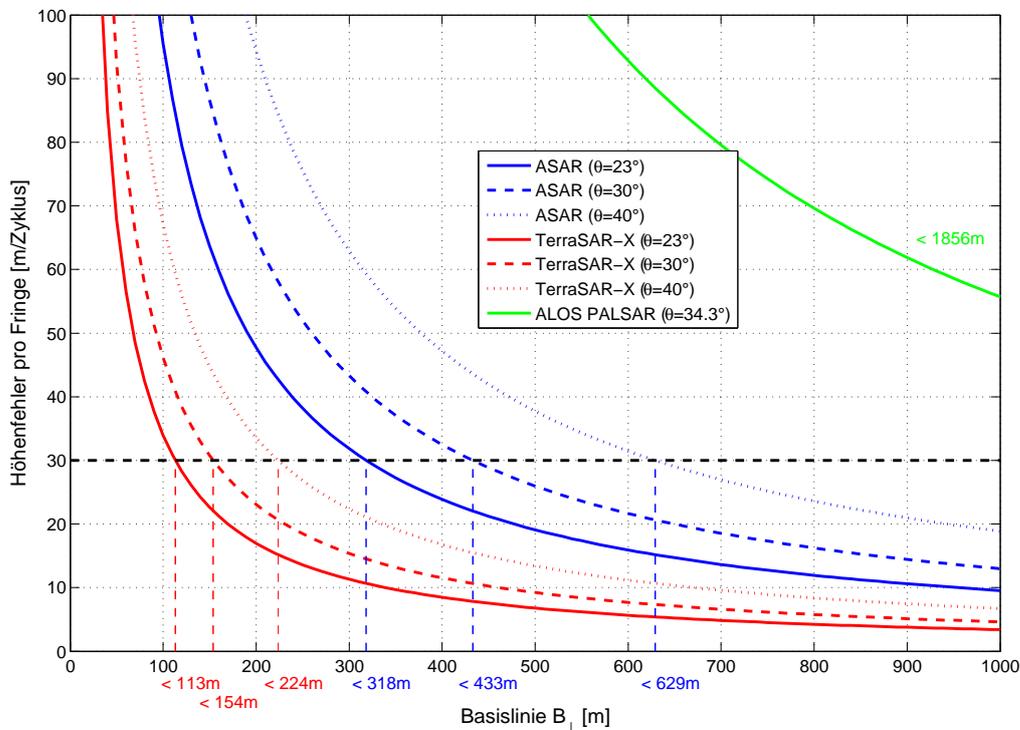
**Abbildung 3.3.:** Auswirkungen von Höhenfehlern auf die topographische Phasenkorrektur und den sich ergebenden Phasenfehler  $\partial\phi_{\text{topo}}$  (linke Y-Achse), der wiederum zu Fehlern bei der Erfassung von vertikalen Bewegungen  $\partial\Delta r_z$  (rechte Y-Achse) führt in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Sensors. Dargestellt für die Sensoren Envisat ASAR ( $\theta=40^\circ$ ), TerraSAR-X ( $\theta=40^\circ$ ) und ALOS PALSAR ( $\theta=34.3^\circ$ ) mit verschiedenen Basislinien  $B_{\perp}$  (100, 300 und 500 m).

Durch Umrechnung der Phasenfehler in Bewegungsbeträge entsprechend Formel 2.21 (LOS) und Formel 2.30 ( $\Delta r_z$ ) ergeben sich aufgrund der Abhängigkeit von der Wellenlänge bei gleichen Phasenfehlern unterschiedlich große Fehler bei der Messung der vertikalen Bewegungen, wie das folgende Beispiel mit  $\partial\phi_{\text{topo}}=120^\circ$  zeigt (vgl. Abb. 3.3):

- TerraSAR-X,  $\theta=40^\circ \rightarrow \theta_i=44.0^\circ$ ,  $\partial h=20$  m,  $B_{\perp} \approx 100$  m:  $\partial\Delta r_z=7.2$  mm
- Envisat ASAR,  $\theta=40^\circ \rightarrow \theta_i=46.3^\circ$ ,  $\partial h=20$  m,  $B_{\perp} \approx 300$  m:  $\partial\Delta r_z=13.6$  mm
- ALOS PALSAR,  $\theta=34.3^\circ \rightarrow \theta_i=38.7^\circ$ ,  $\partial h=20$  m,  $B_{\perp} \approx 930$  m:  $\partial\Delta r_z=50.4$  mm

Gleiche Phasenfehler bewirken somit bei TerraSAR-X kleinere Messfehler als bei Envisat ASAR und ALOS PALSAR. Außerdem entsprechen relativ kleine Phasenfehler bei ALOS PALSAR relativ großen Fehlern bei der Messung der vertikalen Bewegungen.

Höhenfehler-bedingte Phasenfehler werden insbesondere bei kleinen Wellenlängen schnell im differentiellen Interferogramm sichtbar, wie die Beispiele in Kapitel 4 zeigen. Ursache ist zum einen die höhere Phasenempfindlichkeit gegenüber Änderungen von  $\Delta R$  bei kleineren Wellenlängen (vgl. Formel 2.11), zum anderen die Farbtiefe bei der Darstellung von Interferogrammen (vgl. Kapitel 4.2). Bei größeren Wellenlängen wie dem L-Band werden Phasenfehler, unabhängig davon ob sie topographie- oder z.B. atmosphärenbedingt sind, somit kaum sichtbar, bleiben somit meist unbeachtet und werden infolgedessen häufig nicht ausreichend korrigiert. Je größer die Basislinie  $B_{\perp}$  ist, umso stärker zeigen sich Höhenfehler im differentiellen Interferogramm. Abb. 3.4 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der Basislinie und dem Höhenfehler pro Fringe, in Abhängigkeit vom Sensor und dessen Blickwinkel  $\theta$ .



**Abbildung 3.4.:** Höhenmehrdeutigkeit der interferometrischen Phase in Abhängigkeit von der Basislinie  $B_{\perp}$  und dem Blickwinkel  $\theta$ , dargestellt für die Sensoren Envisat ASAR, TerraSAR-X und ALOS PALSAR. Ein Höhenfehler von 30 m entspricht einem Phasenfehler von einem Phasenzyklus ( $2\pi$ ) im differentiellen Interferogramm, wenn die Basislinie  $B_{\perp}$  den jeweils markierten x-Wert erreicht.

Die Höhenfehler in Digitalen Geländemodellen betragen typischerweise etwa 20-30 m je nach Gebiet, aufgrund der fehlenden Oberflächenobjekte wie Gebäude etc. (vgl. Kapitel 4.1.3). Je nach Sensor und Blickwinkel zeigt sich solch ein Höhenfehler von 30 m als mindestens ein Phasenzyklus im differentiellen Interferogramm, wenn die in Abb. 3.4 entsprechend gekennzeichneten Basislinien überschritten werden. Kleinere Höhenfehler zeigen sich erst als deutliche Fringes, wenn die Basislinien entsprechend größer sind.

Anhand der Beziehung

$$B_{\perp, \max} = \frac{R \cdot \sin \theta}{\partial h} \cdot \sigma_{\Delta r} = \frac{R \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta_i}{\partial h} \cdot \sigma_{\Delta r_z} \quad (3.5)$$

die sich durch Einsetzen von Formel 2.30 und 2.21 in Formel 2.19 und Umstellen nach  $B_{\perp}$  ergibt, lässt sich folgende Frage beantworten:

*Wie groß darf die maximale Basislinie  $B_{\perp, \max}$  sein, um eine bestimmte Messgenauigkeit für die Erfassung von Höhenänderungen  $\Delta r_z$  zu erreichen, unter der Annahme, dass keine horizontalen Bewegungen stattgefunden haben und der relative Höhenfehler  $\partial h$  des verwendeten DHMs für die topographische Korrektur bekannt ist?*

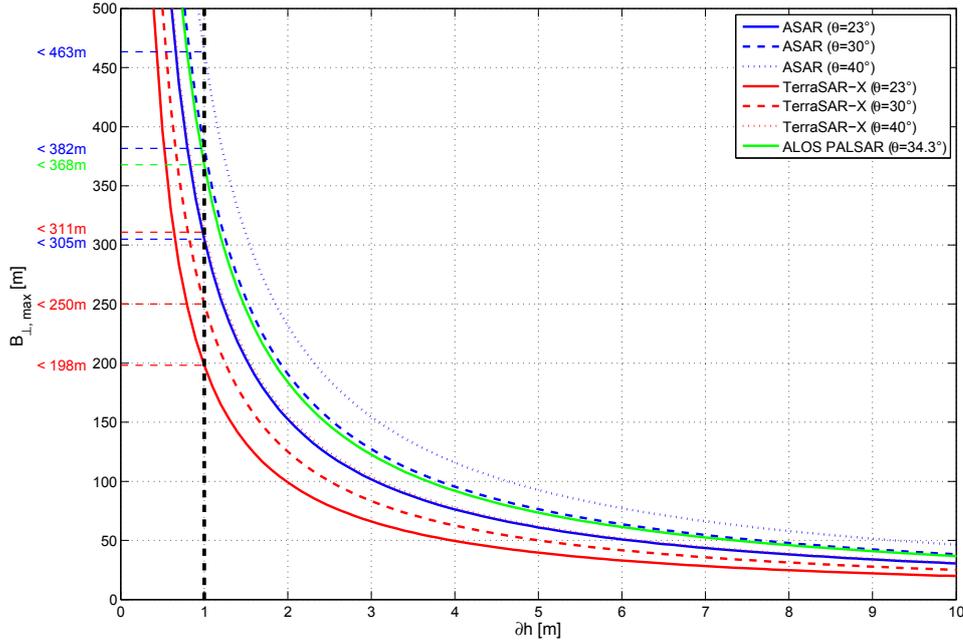
Da beim klassischen DInSAR-Verfahren eine räumliche Phasenabwicklung stattfindet (vgl. Kapitel 2.2.4), entspricht  $\partial h$  der relativen Höhengenaugigkeit  $\sigma_{\text{rel}}$ , da gleiche absolute Höhenfehler bezogen auf einen Referenzpunkt zu keinem Messfehler  $\sigma_{\Delta r_z}$  führen. Größere relative Höhenungenauigkeiten treten insbesondere an Flächennutzungsgrenzen wie „Acker - Wald“, „Acker - Bebauung“ etc. auf oder wenn als Referenz-DHM ein DGM verwendet wird, was nicht der Rückstreuoberfläche der Radarstrahlung entspricht.

Die Ergebnisse für den Zusammenhang in Formel 3.5 sind in Abb. 3.5 für die Sensoren TerraSAR-X, Envisat ASAR und ALOS PALSAR in Abhängigkeit verschiedener Blickwinkel  $\theta$  und unterschiedlicher relativer Höhenfehler  $\sigma_{\text{rel}}$  für eine Messgenauigkeit (einfache Standardabweichung)  $\sigma_{\Delta r_z} = 1$  mm dargestellt. Die maximale Basislinie vergrößert sich proportional zu  $\sigma_{\Delta r_z}$ , d.h. für eine doppelt so große Standardabweichung sind Interferogramme mit doppelt so großer senkrechter Basislinie zulässig. Bei einer relativen Höhengenaugigkeit von beispielsweise 10 m wie sie für SRTM-C Daten angegeben wird, einem Blickwinkel  $\theta = 40^\circ$  ergeben sich für  $\sigma_{\Delta r_z} = 1$  mm folgende maximalen Basislinien  $B_{\perp, \max}$ : 31 m (TerraSAR-X), 46 m (Envisat ASAR) und 37 m (ALOS PALSAR,  $\theta = 34.3^\circ$ ). Da  $B_{\perp, \max}$  unabhängig von der Wellenlänge ist, sind die Ergebnisse sehr ähnlich. Da solche Basislinien unüblich für alle aktuellen C- und L-Band Sensoren sind, ist bei Verwendung von SRTM-C Daten als Höhenreferenz mit deutlich schlechteren Messgenauigkeiten bzgl. der Erfassung von vertikalen Verschiebungen  $\Delta r_z$  zu rechnen.

### 3.1.2. Der Einfluss des Höhenfehlers auf die Schrägdistanzen und die Basislinie

Basislinienfehler bewirken Fehler in der interferometrischen Phase und bei der topographischen Phasenkorrektur, was wiederum Auswirkungen auf die Genauigkeit der Bodenbewegungsmessung hat. Der Einfluss des Basislinienlängen- und -winkelfehlers ist beschreibbar anhand der partiellen Ableitungen von Formel 3.2 nach  $B$  und  $\xi$  (vgl. Formel 3.6 und 3.7). Da bei der Simulation der topographischen Phase gleichzeitig der geometriebedingte Phasenanteil mit bestimmt wird, muss der erste Term in Formel 3.2 bei der Ableitung nach  $B$  und  $\xi$  mit berücksichtigt werden.

$$\partial \phi_{\text{topo}} = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \left( \sin(\xi - \theta) + \frac{\cos(\xi - \theta)}{R_1 \cdot \sin \theta} \cdot h + \frac{\cos \xi}{2 \cdot R_1^2 \cdot \sin^3 \theta} \cdot h^2 \right) \cdot \partial B \quad (3.6)$$



**Abbildung 3.5.:** Maximal zulässige Basislinie für die Erfassung von vertikalen Bewegungen mit einer Messgenauigkeit  $\sigma_{\Delta z} = 1 \text{ mm}$  in Abhängigkeit vom relativen Höhenfehler  $\partial h$ , dargestellt für verschiedene Blickwinkel  $\theta$  und Sensoren (Envisat ASAR, TerraSAR-X, ALOS PALSAR).

$$\partial\phi_{\text{topo}} = -\frac{4\pi \cdot B}{\lambda} \cdot \left( \cos(\xi - \theta) - \frac{\sin(\xi - \theta)}{R_1 \cdot \sin\theta} \cdot h - \frac{\sin\xi}{2 \cdot R_1^2 \cdot \sin^3\theta} \cdot h^2 \right) \cdot \partial\xi \quad (3.7)$$

Die Genauigkeit der Basislinie  $\partial B$  und deren Komponenten im Raum ist im Wesentlichen abhängig von

- den Orbitfehlern, d.h. der Genauigkeit mit der die Positionen der SAR-Antennenphasenzentren entlang der Satellitenbahnen, die nicht parallel sind, bestimmt wird,
- der Genauigkeit der Schrägdistanzen  $R_1$  und  $R_2$ ,
- und der Methode der Basislinienbestimmung (Details siehe [Small et al. \(1996\)](#)).

Basislinienungenauigkeiten resultieren im Wesentlichen aus Fehlern bei der Satellitenbahnbestimmung. Tabelle 3.1 zeigt die Orbitgenauigkeiten und die Erfassungsmethode einiger Sensoren. Aufgrund geringer Sonnenaktivität sind die Genauigkeiten häufig besser. Moderne SAR-Sensoren erreichen Flugpfadgenauigkeiten von  $\pm 4 \text{ cm}$  ([Eineder et al., 2010](#)). Der Einfluss von Orbitfehlern auf die interferometrische Phase und damit auf die Höhen- und Bewegungsmessung wird u.a. bei [Hanssen \(2001\)](#), [Reigber et al. \(1997\)](#) sowie [Goblirsch \(1997\)](#) gezeigt. Dabei muss zwischen den Fehleranteilen in Flugrichtung des Satelliten (*along-track*), senkrecht zur Flugrichtung (*across-track*) und in radialer Richtung unterschieden werden. Die *along-track* Komponente wird durch die Koregistrierung der SAR-Szenen zueinander ausreichend korrigiert, wobei die anderen Komponenten zu systematischen Fehlern in den Interferogrammen führen ([Meyer, 2004](#)). Mit  $\xi = 90^\circ$  kann in Formel 3.6 der Einfluss radialer Fehler auf die Phase berechnet werden und mit

**Tabelle 3.1.:** Orbitfehler unterschiedlicher Orbitdatentypen für verschiedene SAR-Sensoren laut Produktbeschreibung

Sensor (Messmethode)	Orbittyp	Genauigkeit [m]	Verfügbarkeit
TerraSAR-X (Dual-Frequenz GPS)	predicted rapid* science	< 700 (along track) < 1 (3D, 1 $\sigma$ ) < 0.1-0.2 (3D, 1 $\sigma$ )	vor Aufnahme nach etwa 15 h nach 5 Tagen
ERS-1/-2** (Laser-Distanzmesser)	predicted restituted  preliminary precise	400/125/25 2-4 (along), 1-2 (across), 0.5 (radial) 0.08-0.1 (radial) 0.08-0.1 (radial)	6/3/1 Tag(e) vorher nach 1 Tag  nach 3-5 Tage nach 3-4 Wochen
Radarsat-2 (Dual-Frequenz GPS)	predicted definitive	$\pm 60$ (3 $\sigma$ ) < 2 (3D RMSE)***	31 Tage vorher nach $\approx$ 12-24 h
Envisat (DORIS)	predicted restituted preliminary precise	<b>along, across, radial</b> 3 $\sigma$ : <900, <15, <25 3 $\sigma$ : <60, <15, <25 RMSE: 0.4, 0.4, 0.2 RMSE: 0.3, 0.3, 0.1	1-6 Tage vorher nach 3 Tagen nach >3 Tagen nach 4-5 Wochen
ALOS PALSAR (Dual-Frequenz GPS)	preliminary decision high precise	k.A. k.A. <1	k.A. k.A. nach 3 Tagen

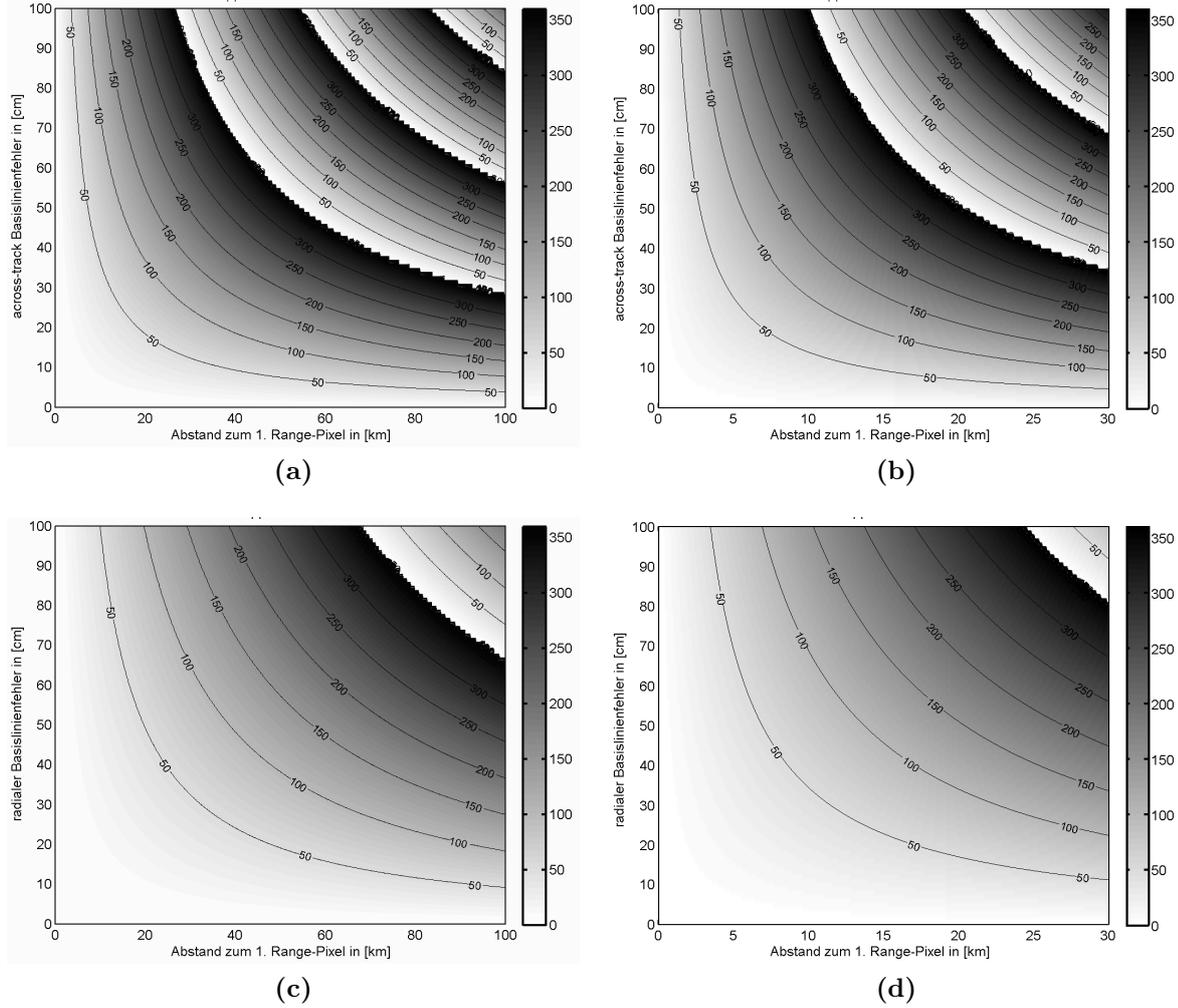
\* Die Anfangsspezifikation von 2 m (3D, 1 $\sigma$ ) konnte heruntergestuft werden auf 1 m trotz Berücksichtigung von atmosphärischen Laufzeitverzögerungen und Orbitfehlern aufgrund von höheren Sonnenaktivitäten (Breit et al., 2010).

\*\* [http://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/SAR/orbits.ps](http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/SAR/orbits.ps)

\*\*\* Hillman et al. (2010)

$\zeta=0^\circ$  der *across-track* Orbitfehler. Gegenüber *across-track* Basislinienfehlern ist die interferometrische Phase empfindlicher im Vergleich zu radialen Fehlern. Der Unterschied ist sensorabhängig und blickwinkelabhängig (vgl. Abb. 3.6). Beispielsweise wirken sich Basislinienfehler stärker bei TerraSAR-X aus als bei Envisat ASAR, wenn man die Szenengröße berücksichtigt (Abb. 3.6). Mit zunehmender Entfernung vom Sensor nehmen die absoluten Phasenfehler im Interferogramm zu. Mit zunehmendem mittlerem Blickwinkel wird der across-track Phasenfehler jedoch im Bild kleiner, während beim radialen Fehler der umgekehrte Effekt auftritt. Je größer die Basislinie ist, umso geringer sind die Auswirkungen von Basislinienfehlern auf die interferometrische Phase. Orbitfehler bewirken überwiegend streifenartige Phasentrends in Interferogrammen, deren Zyklenanzahl zeilenweise für die jeweilige Basislinie in Abb. 3.6 ablesbar ist. Orbitfehler können z.B. durch Polynomialflächen approximiert und fast vollständig eliminiert werden. Auf die Auswirkungen von Basislinienfehler infolge von Orbitfehlern auf die Bewegungsmessung soll in dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden.

Da Höhenmodellfehler zu Schrägdistanzfehlern bei der Simulation von  $\phi_{\text{topo}}$  führen (vgl. Abb. 3.9, Kapitel 3.2.1), was sich wiederum auf die Genauigkeit der Basislinienbestimmung auswirken kann (vgl. Kapitel 3.1), ist die Betrachtung des Einflusses der



**Abbildung 3.6.:** Auswirkungen von across-track und radialen Basislinienfehlern auf die interferometrische Phase (Grad) für einen mittleren Blickwinkel  $\theta$  und einer mittleren Schrägdistanz  $R_1$ : (a) across-track, Envisat ASAR ( $\theta=23^\circ$ ,  $R_1=845$  km), (b) across-track, TerraSAR-X ( $\theta=23^\circ$ ,  $R_1=560$  km), (c) radial, Envisat ASAR, (d) radial, TerraSAR-X

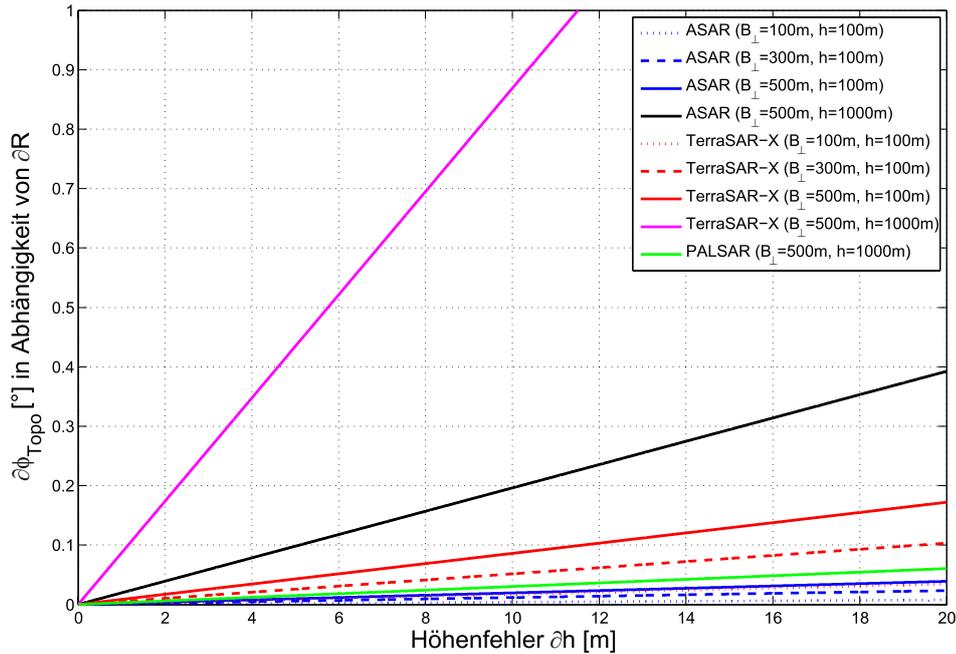
Schrägdistanzen von Bedeutung. Der sich ergebende Basislinienfehler ist selbst sehr schwierig zu quantifizieren, u.a. aufgrund der iterativen Lösung der Distanz-Doppler-Gleichungen zur Bestimmung der Distanz  $R_2$  und der Basislinie  $B$ . Wenn bekannt ist, dass die Höhenmodellfehler relativ groß sind, sollte die Basislinienschätzung nicht unter Nutzung eines Höhenmodells erfolgen.

Der Einfluss von Schrägdistanzfehlern  $\partial R_1$  auf den topographischen Phasenfehler  $\partial \phi_{\text{topo}}$  ergibt sich anhand der partiellen Ableitung von  $\phi_{\text{topo}}$  nach  $R_1$  in Formel 3.2.

$$\partial \phi_{\text{topo}} = \frac{4\pi \cdot B}{\lambda \cdot R_1^3 \cdot \sin^3 \theta} \cdot \left( \cos(\xi - \theta) \cdot \sin^2 \theta \cdot R_1 \cdot h + \cos \xi \cdot h^2 \right) \cdot \partial R_1 \quad (3.8)$$

Der Einfluss der Schrägdistanzfehler (verursacht durch Höhenfehler entsprechend Formel 3.9) auf die topographische Phase ist relativ klein, wie Abb. 3.7 zeigt. Er ist jedoch

von der Geländehöhe  $h$  selbst abhängig. Je größer die Wellenlänge  $\lambda$  und die Schrägdistanz  $R$  sind, wie z.B. bei ERS und Envisat im Vergleich zu TerraSAR-X, umso kleiner ist der Phasenfehler. Je größer der Blickwinkel  $\theta$  wird, umso kleiner werden die Phasenfehler. Jedoch wenn  $|\xi - \theta|$  kleiner wird, werden die Phasenfehler größer und erreichen ihr Maximum bei  $|\xi - \theta| = 0^\circ$ . Größere absolute Höhen und Basislinien wirken sich stärker auf den Phasenfehler aus. Beispielsweise bei einem TerraSAR-X Interferogramm mit einer Basislinie von  $B = 500$  m,  $\theta = \xi = 23^\circ$  ergibt sich für  $h = 4000$  m ein Phasenfehler von gerade mal  $7.2^\circ$  und bei  $h = 1000$  m ein  $\partial\phi_{\text{topo}}$  von  $1.7^\circ$ . Dies entspricht einem Bewegungsfehler in LOS von deutlich weniger als 1 mm.



**Abbildung 3.7.:** Auswirkungen von Höhenfehlern  $\partial h$  auf den Phasenfehler  $\partial\phi_{\text{topo}}$  in Abhängigkeit des resultierenden Schrägdistanzfehlers  $\partial R$  (Formel 3.9), dargestellt für die Sensoren Envisat ASAR, TerraSAR-X ( $\theta = \xi = 23^\circ$ ) und ALOS PALSAR ( $\theta = \xi = 34.3^\circ$ ) und verschiedene Basislinien  $B_{\perp}$  (100, 300, 500 m) und absolute ellipsoidische Höhen  $h$  (100, 1000 m).

### 3.1.3. Auswirkungen des Höhenfehlers bei der Umrechnung von LOS

Höhenmodellfehler haben zur Folge, dass Fehler bei der Bestimmung der Blickwinkel für jedes Bildpixel entstehen (Abb. 3.8). Dies wirkt sich wiederum auf die Genauigkeit der Bestimmung der Einfallswinkel  $\theta_i$  aus, die zur Umrechnung der Verschiebung von LOS in die vertikale Richtung benötigt werden (Formel 2.30). Da ein Höhenfehler vernachlässigbar klein gegenüber dem Erdradius von ca. 6365 km ist, ist die Änderung von  $\theta_i$  ebenfalls sehr klein und kann bei der Umrechnung unberücksichtigt bleiben (vgl. Anhang A.3).

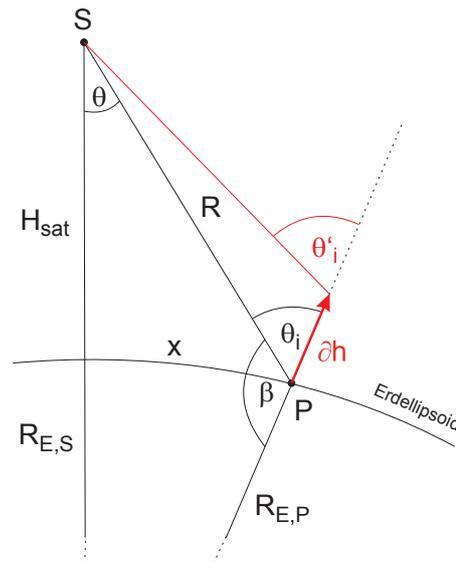


Abbildung 3.8.: Auswirkungen von Höhenfehlern  $\delta h$  auf die Bestimmung des Einfallswinkels  $\theta_i$

## 3.2. Geokodierung

Voraussetzung für die topographische Phasenkorrektur mit einem Digitalen Höhenmodell ist die exakte Transformation dieses DHMs vom übergeordneten Referenzsystem ins Range-Doppler-Koordinatensystem (RDC), was, wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, anhand der Distanz-Doppler-Gleichungen erfolgt. Die Genauigkeit der Geokodierung ist abhängig vom verwendeten Höhenmodell und dessen Höhengenaugigkeit. Höhenmodellfehler führen entsprechend zu:

1. Verschiebungen und Verzerrungen des Höhenmodells im RDC-System, die entsprechend Kapitel 3.1 wiederum zu Fehlern bei der topographischen Phasenkorrektur führen,
2. Fehlpositionierungen im Kartenbezugssystem nach der Rückwärtstransformation aller radarinterferometrischen Ergebnisse.

Beide Effekte führen zu Fehlern bei der Messung von Bewegungen.

Höhenfehler wirken sich bei der Geokodierung auf die Bestimmung

- der Schrägdistanzen  $R$
- der relativen Radialgeschwindigkeiten  $v_{\perp}$  und
- der lokalen Einfallswinkel  $\theta_{li}$  aus (Kapitel 3.2.3).

Die Transformation der radarinterferometrischen Ergebnisse in ein Referenzkoordinatensystem erfolgt über eine Zuweisungstabelle, die anhand eines DHMs, das im entsprechenden Koordinatensystem vorliegt, erstellt wird (vgl. Kapitel 2.3.1).

### 3.2.1. Rangeverschiebungen in Abhängigkeit vom Höhenfehler

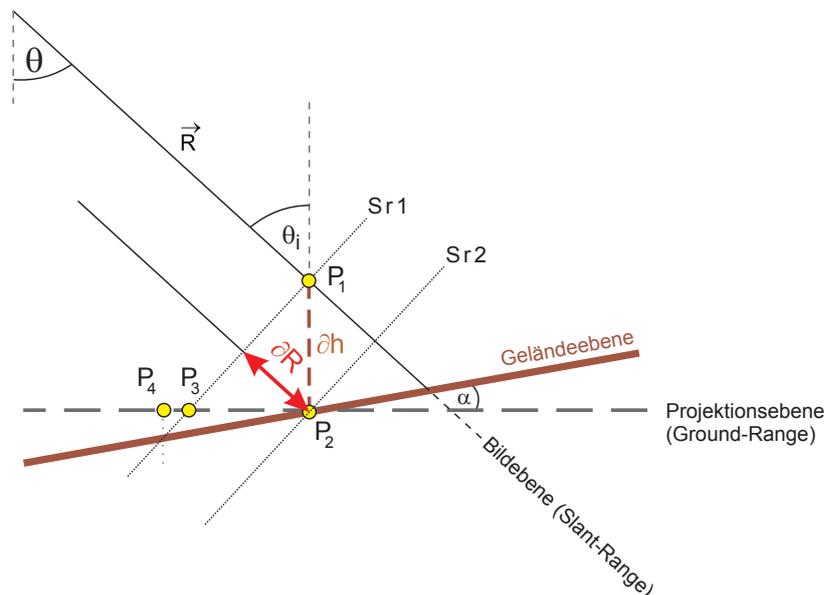
Die Schrägdistanzen  $R$  ergeben sich nach Formel 2.40 über die Objekt-  $\vec{P}$  und Sensorpositionsvektoren  $\vec{S}$ . Unter der Annahme, dass die Sensorposition frei von Orbitfehlern (vgl. Kapitel 3.1.2) sowie Range- und Azimut-Zeitfehlern ist (Details siehe Breit et al. (2010)), ergibt sich für jeden Objektpunkt aufgrund von Höhenfehlern  $\partial h$  ein Schrägdistanzfehler  $\partial R$ , der unabhängig von der Geländeneigung  $\alpha$  ist. Aufgrund der Fernfeldbedingung, d.h. parallele Blickrichtungen, erhält man diesen näherungsweise über:

$$\partial R = \partial h \cdot \cos \theta_i \quad (3.9)$$

Wie in Abb. 3.9 zu sehen ist, wird der Punkt  $P$  mit der vom Sensor erfassten Rückstreuhöhe in  $P_1$  im Slant-Range Bild mit dem Abstand  $Sr1$  wiedergegeben. Aufgrund der fehlerhaften DHM-Höhe erhält der Punkt eine falsche Slant-Range Distanz  $Sr2$ . Durch den sich daraus ergebenden Schrägdistanzfehler  $\partial R$  ist es möglich, dass ein DHM-Pixel nach dem Resampling einem falschen Range-Segment im RDC-System zugewiesen wird, was bei kleinen Höhenfehlern jedoch nicht zwingend ist. Wenn der Schrägdistanzfehler  $\partial R$  deutlich kleiner als die Pixelgröße des Slant-Range Bildes ist, d.h.

$$\partial h < p_d / \cos \theta \quad (3.10)$$

erfolgt die Zuordnung noch korrekt. Für niedriger auflösende SAR-Sensoren können entsprechend DHMs mit größeren Höhenfehlern, z.B. aufgrund einer schlechteren Bodenauflösung, für die Geokodierung verwendet werden.



**Abbildung 3.9.:** Auswirkungen von Höhenfehlern auf die Änderung der Schrägdistanzen und die Lageverschiebung bei der Geokodierung.

Range-Segment Fehlzugeweisungen haben zur Folge, dass von einem Pixel im realen SAR-Bild, welches sich aus den gemessenen Schrägdistanzen zusammensetzt, eine falsch zugeordnete Höhe bzw. fehlerhafte topographische Phase (Kapitel 3.1) korrigiert wird. Dies

führt neben dem unmittelbar vom DHM-Höhenfehler abhängigen topographischen Phasenfehler zu einem zusätzlichen Phasenfehler aufgrund der Geokodierung  $\partial\phi_{\text{topo,GEC}}$ , der unter anderem auch abhängig ist von der Geländeneigung, den Höhenvariationen und den Höhenfehlern benachbarter Pixel. Geringe Verschiebungen bewirken Höhenfehler (relativ zu den Höhenvariationen), die anhand der Multiplikation mit dem Tangens der Geländeneigung berechnet werden können. Die durch die Verschiebung verursachten Höhenfehler können sehr groß sein, jedoch maximal den lokalen Höhenunterschieden entsprechen, und folglich große topographische Phasenfehler verursachen (vgl. Kapitel 3.1.1).

Der Einfluss höhenabhängiger Schrägdistanzfehler  $\partial R$  auf die topographischen Phasenfehler  $\partial\phi_{\text{topo}}$  (Formel 3.8) ist dagegen relativ klein (vgl. Kapitel 3.1.2) und führt erst bei sehr großen absoluten Höhen  $h$  in Kombination mit großen Basislinien  $B$  zu nicht mehr vernachlässigbaren Fehlern.

Bei der Rücktransformation eines jeden RDC-Pixels in ein übergeordnetes Referenzsystem anhand der Zuweisungstabelle führt der Höhenfehler eines DHM letztendlich noch zu einer zusätzlichen Fehlpositionierung gemäß Formel 2.8 (vgl. Abb. C.1). Die Fehlpositionierung in der Ground-Range Ebene ist dabei abhängig von der Geländeneigung  $\alpha$ . Der Punkt  $P_1$  in Abb. 3.9, der fälschlicherweise im Slant-Range Bild an der Position  $P_2$  abgebildet wird, wird bei der Rückwärtstransformation in ein Kartenbezugssystem von seiner real gemessenen Position  $P_1$  an die Stelle  $P_3$  bzw. bei Berücksichtigung der Geländeneigung an der Position  $P_4$  dargestellt. Kleine Höhenfehler bewirken entsprechend Formel 3.10 nur eine Verschiebung innerhalb der Pixelgröße, auch im Kartenbezugssystem.

Wenn ein DHM einen nahezu regelmäßigen Höhenfehler-Offset über das gesamte Bild enthält, z.B. aufgrund von Datumsunsicherheiten des DHM, führt dies zu einem weitestgehend konstanten  $\partial R$  und einer gleichmäßigen Bildverschiebung ohne signifikante Verzerrungen im RDC-System. Durch die Feinregistrierung über die Simulation von SAR-Intensitätsbildern (vgl. Kapitel 2.3.2) können solche gleichmäßigen Lage-Offsets gut approximiert und korrigiert werden.

### 3.2.2. Azimutverschiebungen in Abhängigkeit vom Höhenfehler

Höhenfehler verursachen aufgrund der falschen Dopplerberechnungen auch Fehlpositionierungen in Azimutrichtung bei der Geokodierung (Meier, 1989) und somit topographische Phasenfehler. Dies ist jedoch vom Schrägdistanzfehler  $\partial R$  abhängig, der sich ebenfalls durch den Höhenfehler  $\partial h$  ergibt. Der Einfluss auf die Azimutverschiebung ist sehr klein und liegt bei vielen Sensoren im Subpixelbereich (Meier, 1989).

Ursache für die Azimutverschiebungen sind die aufgrund von Höhenunterschieden verursachten Veränderungen der Radialgeschwindigkeiten zwischen den Objektpunkten und dem Sensor (vgl. Abb. 3.10). Dies führt zu Dopplerfrequenzverschiebungen. Aufgrund der Fehlzusweisung eines Objektes zu einer falschen Iso-Doppler-Linie kommt es bei der Geokodierung zur Fehlpositionierung des DHMs in Azimutrichtung. Die Azimutverschiebung aufgrund des Höhenfehlers kann wie folgt hergeleitet werden:

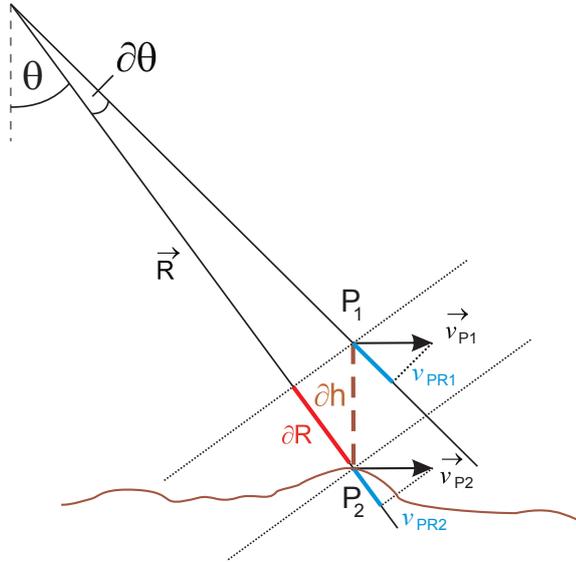


Abbildung 3.10.: Auswirkung von Höhenfehlern bzw. Differenzen auf die Radialgeschwindigkeiten

Der Höhenfehler bewirkt eine Änderung des geozentrischen Radius  $R_E$  in Abhängigkeit von der geographischen Breite  $\varphi$  und der geozentrischen Breite  $\gamma_E$ . Da  $R_E$  sehr groß ist (vgl. Anhang C.2), kann die Änderung des geozentrischen Radius  $\partial R_E$  näherungsweise wie folgt berechnet werden:

$$\partial R_E \approx \partial h \cdot \cos(\varphi - \gamma_E) \quad (3.11)$$

Unter der Annahme, dass sich die Blickrichtung vom Sensor zum Punkt  $P$  nur minimal durch einen Höhenfehler ändert und somit keine signifikante Änderung des radialen Geschwindigkeitsanteils  $v_{SR}$  (vgl. Abb. 2.11) erfolgt, ergibt sich entsprechend Formel 2.39 und Ableitung nach der Objektgeschwindigkeit  $v_P$  und  $\theta$  die Änderung der Radialgeschwindigkeit (vgl. Abb. 3.10):

$$\partial v_{\perp} = \partial v_{PR} = \sqrt{(\sin \theta \cdot \partial v_P)^2 + (v_P \cdot \cos \theta \cdot \partial \theta)^2} \quad (3.12)$$

mit

$$\partial v_P = \omega \cdot \partial R_E = \frac{2\pi}{t_E} \cdot \partial R_E \quad (3.13)$$

$$\partial \theta = \frac{\partial h \cdot \sin \theta}{R} \quad (3.14)$$

und einem mittleren Sterntag  $t_E = 86164.09058$  s zur Berechnung der Rotationsgeschwindigkeit der Erde  $\omega_E$ .

Die Änderung der resultierenden Radialgeschwindigkeit  $\partial v_{\perp}$  führt zu einer Dopplerverschiebung  $\partial f_D$ , die wiederum zu einer Azimutverschiebung  $\partial g_{az}$  in Abhängigkeit von der Fluggeschwindigkeit  $v_S$  führt (Meier, 1989):

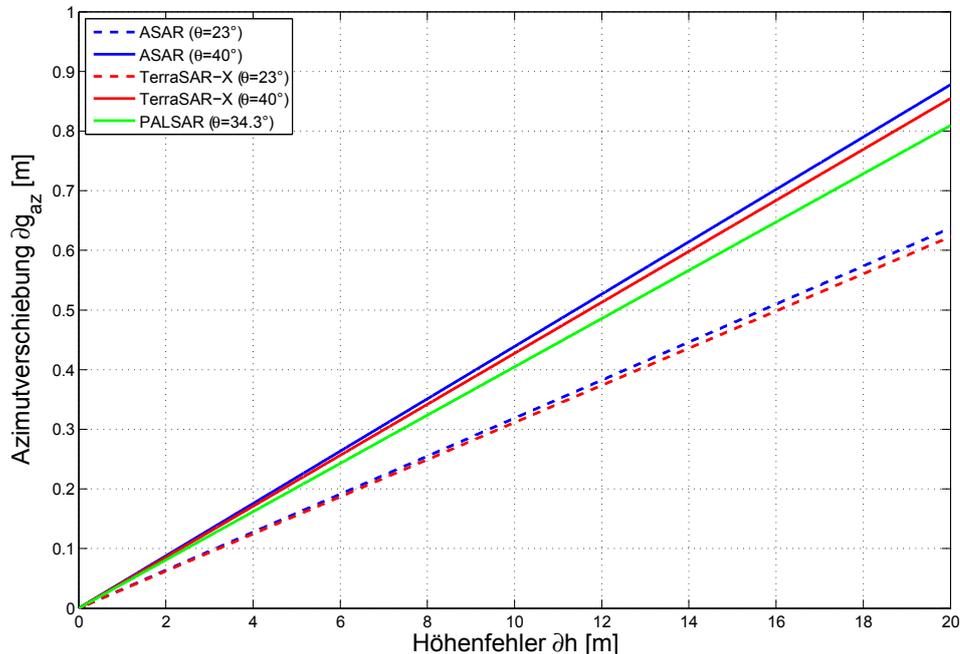
$$\partial f_D = \frac{2 \cdot f_c}{c} \cdot \partial v_{PR} \quad (3.15)$$

$$g_{az} = R \cdot \frac{v_{\perp}}{v_S} \quad (3.16)$$

$$\partial g_{az} = \sqrt{\left(\frac{v_{\perp}}{v} \cdot \partial R\right)^2 + \left(\frac{R}{v_S} \cdot \partial v_{PR}\right)^2} \quad (3.17)$$

mit  $\partial R \approx \partial h \cdot \cos \theta_i$  (vgl. Abb. 3.9). In Abhängigkeit des vom Sensor mit der Trägerfrequenz  $f_c$ , der Fluggeschwindigkeit  $v_S$  und der Schrägentfernung  $R$ , sowie des Beobachtungsgebietes (geographische Breite  $\varphi$ , ellipsoidische Höhe  $h$ ) verursachten Höhenfehlers  $\partial h$  ergeben sich sehr kleine Azimutverschiebungen entsprechend Abb. 3.11.

Eine Änderung der geographischen Breite  $\varphi$  führt zu keiner sichtbaren Änderung der Graphen in Abb. 3.11. Größeren Einfluss hat dagegen der Blickwinkel  $\theta$ . Die sich ergebenden Azimutverschiebungen  $\partial g_{az}$  liegen bei allen Sensoren und einem Höhenfehler von  $\partial h < 20$  m unter 1 m. Demzufolge liegen die Azimutverschiebungen im Subpixelbereich einiger aktueller Sensoren wie z.B. ERS-1/-2 und Envisat. Dies führt zu entsprechenden vernachlässigbaren topographischen Phasenfehlern. Bei hochauflösenden Sensoren und deren Modi im Meter-Bereich, können diese Azimutverschiebungen zu Pixelfehlzuweisungen führen, die je nach Stärke der Höhenunterschiede und Länge der Basislinie (vgl. Kapitel 3.1.1) dementsprechend große topographische Phasenfehler im differentiellen Interferogramm verursachen können.



**Abbildung 3.11.:** Azimutverschiebungen  $\partial g_{az}$  in Abhängigkeit vom Höhenfehler  $\partial h$ , der Änderungen der Radialgeschwindigkeiten verursacht. Zum Vergleich sind die Ergebnisse für unterschiedliche Blickwinkel  $\theta$  und unterschiedliche Sensoren (Envisat ASAR, TerraSAR-X, ALOS PALSAR) für ein Aufnahmegebiet in  $\varphi=5^\circ$  Nord dargestellt.

### 3.2.3. Auswirkung von Höhenfehlern bei der Feinregistrierung

Höhenfehler verursachen Fehler bei der Berechnung des Flächennormalenvektors  $\vec{n}$ , welcher zur Simulation der Intensitätsbilder bei der Verbesserung der Geokodierung notwendig ist (vgl. Kapitel 2.3.2). Die fehlerhafte Orientierung von  $\vec{n}$  führt zu Fehlern bei der Bestimmung des lokalen Einfallswinkels  $\theta_{li}$  bzw. des Projektionswinkels  $\psi$ , was sich zwar nicht unmittelbar auf die Genauigkeit der interferometrischen Phase auswirkt, jedoch zu Verzerrungen und Verschiebungen des DHMs im RDC-System führen kann. Daraus können wiederum Fehlzusweisungen von Höhenwerten bei der topographischen Korrektur resultieren und Phasenfehler verursacht werden.

Die Berechnung des lokalen Einfallswinkels  $\theta_{li}$  kann entsprechend Anhang A über die Berechnung des Flächennormalenvektor  $\vec{n}$  auf unterschiedliche Weise erfolgen. Da ein Höhenmodell nur diskrete mittlere Höhenwerte für jeweils kleine Flächenelemente liefert, entspricht der berechnete Flächennormalenvektor  $\vec{n}$  nicht der Realität, da reale Flächen und damit auch ihr Rückstreuverhalten deutlich komplexer sind. Hochauflösende DHMs haben zwar den Vorteil, dass die lokalen Beleuchtungsflächen  $A(r, a)$  exakter geschätzt werden können, andererseits treten bei der Transformation des DHMs ins RDC-System häufiger Pixelfehlzuordnungen und fehlerhafte Interpolationen auf, insbesondere in Gebieten mit starken Höhenvariationen und demzufolge öfter vorkommenden Layover-Bereichen (z.B. in Stadtgebieten). Layover- und Schattenbereiche sollten bei der Simulation ausmaskeiert werden und z.B. über benachbarte Werte interpoliert werden. Da dies aufgrund der Bodenauflösung von DHMs nicht immer möglich ist, erfolgt die topographische Phasenkorrektur mit fehlerhaften DHM-Werten, die speziell in Layover-Bereichen zur Verstärkung von Phasenfehlern führen können (vgl. Kapitel 4.4.3).

## 3.3. Schlussfolgerungen

Für eine möglichst exakte topographische Phasenkorrektur eignen sich grundsätzlich nur Höhenmodelle, die die tatsächliche Rücksteueroberfläche der SAR-Daten am besten widerspiegeln. Bei Verwendung von „externen“ Höhenmodellen, die in einem zunächst übergeordneten Koordinatensystem zur Verfügung stehen, ist zu beachten, dass dies allgemein „fremde Daten“ sind und nicht in direkter Beziehung zu SAR-Daten stehen und somit trotz hoher Genauigkeit, Aktualität, Auflösung etc. zu geometrischen Fehlern führen können.

Höhenfehler bewirken Phasenfehler in Interferogrammen in Abhängigkeit vom Sensor und der Aufnahmegeometrie. Da externe Höhenmodelle zunächst ins RDC-System transformiert werden müssen, resultieren die Fehler der Höhenwerte, die für die Simulation der topographischen Phasen benötigt werden, nicht nur aus DHM-Fehlern, sondern auch aus der Transformation selbst. DHM-Fehler bewirken bei der Geokodierung Verschiebungsfehler, aufgrund fehlerhaft abgeleiteter Schrägdistanzen und Fehler beim Lösen der Distanz-Doppler-Gleichungen. Die Auswirkungen in Azimut-Richtung sind vernachlässigbar klein, während sie in Range-Richtung beträchtlich sein und zu starken lokalen Verzerrungen

führen können. In Abhängigkeit von der Oberflächenvariabilität führt dies zu entsprechend fehlerhaften Zuordnungen von DHM-Werten im RDC-System und damit zu zusätzlichen Höhenfehlern. Geokodierungsfehler werden jedoch nicht allein durch Höhenfehler verursacht. Wesentlich stärker wirken sich Orbitungenauigkeiten auf die Geokodierung von DHMs aus, führen jedoch anders als Höhenfehler zu relativ gleichmäßigen Lageverschiebungen. Je größer die Verschiebungen sind, umso größer sind letztendlich auch die Höhenfehler. Je größer die Höhenfehler des Eingangs-DHMs sind, umso größer sind die Schrägdistanzfehler.

Fehlerhafte Höhenwerte im RDC-System wirken sich unmittelbar auf die Phasenkorrektur aus. Mit Zunahme der Basislinie steigen höhenfehlerbedingte Phasenfehler linear an. Doppelt so große Höhenfehler bewirken doppelt so große Phasenfehler. Doppelt so große Basislinien führen bei gleichem Höhenfehler zu ebenfalls doppelt so hohen Phasenfehlern. Basislinienfehler wirken sich sehr stark auf die topographische Korrektur aus, werden jedoch hauptsächlich durch Orbitfehler verursacht und sind anhand der Phasentrends bestimmbar. Die Bestimmung der Basislinien über das Lösen der Distanz-Doppler-Gleichungen bei der Simulation sollte insbesondere bei größeren (zu erwartenden) Höhenfehlern vermieden werden. Der Einfluss höhenfehlerbedingter Schrägdistanzfehler ist vernachlässigbar.

Je kleiner die Wellenlänge und auch die Sensorhöhe ist, umso größer sind die Auswirkungen von Höhenfehlern auf die Phase. Eine halb so große Wellenlänge führt zu halb so großen Phasenfehlern. Je größer der Blickwinkel ist, umso kleiner sind die Phasenfehler. Gleiche Phasenfehler entsprechen in Abhängigkeit von der Wellenlänge eines Sensors unterschiedlichen Messfehlern in LOS. Je größer die Wellenlänge ist, umso größer sind die Messfehler pro Phasenfehler.

# Beispielhafte Untersuchungen mit realen Daten

---

In diesem Kapitel werden anhand von realen Daten die Einflüsse von Höhenmodellfehlern auf die radarinterferometrische Erfassung von Bodenbewegungen am Beispiel einer durch untertägigen Bergbau beeinflussten Tagesoberfläche dargestellt. Die Analysen wurden bewusst in einem Gebiet mit geringen Geländehöhenunterschieden durchgeführt, da die Auswirkungen topographischer Phasenfehler speziell in flachen, jedoch stark anthropogen geprägten Untersuchungsgebieten häufig von Anwendern im Hinblick auf die Genauigkeit der Bodenbewegungsmessung aber auch auf die Qualität der Interferogramme (Kohärenz) unterschätzt werden. Die in Kapitel 3 dargestellten funktionalen Zusammenhänge werden am Beispiel von realen Daten der Sensoren TerraSAR-X, Envisat ASAR und ALOS PALSAR unter Verwendung verschiedener Höhenmodelle überprüft und verglichen. Die Validierung mittels terrestrischer Daten erfolgt im Kapitel 5. Die Untersuchungen beschränken sich auf einzelne Interferogramm-Paare mit guten Kohärenzen und unterschiedlichen Basislinien. Anhand der Beispiele in Kapitel 4.4 werden zum einen die Auswirkungen von Höhenfehlern in Gebieten mit kontinuierlich topographischen Veränderungen sowie in Stadt- und Vegetationsbereichen gezeigt. Zum anderen wird in Kapitel 4.3 untersucht, wie sich Höhenfehler auf die Genauigkeit der Geokodierung von Radardaten auswirken und welche Folgen dies bezüglich der Messgenauigkeit von Bodenbewegung haben kann. Die Ergebnisse sind übertragbar auf Gebiete mit ähnlicher Topographie. Die in Kapitel 4.2 erläuterten Zusammenhänge sollen als Interpretationshilfe zur Identifikation von Höhenfehlern in Interferogrammen dienen.

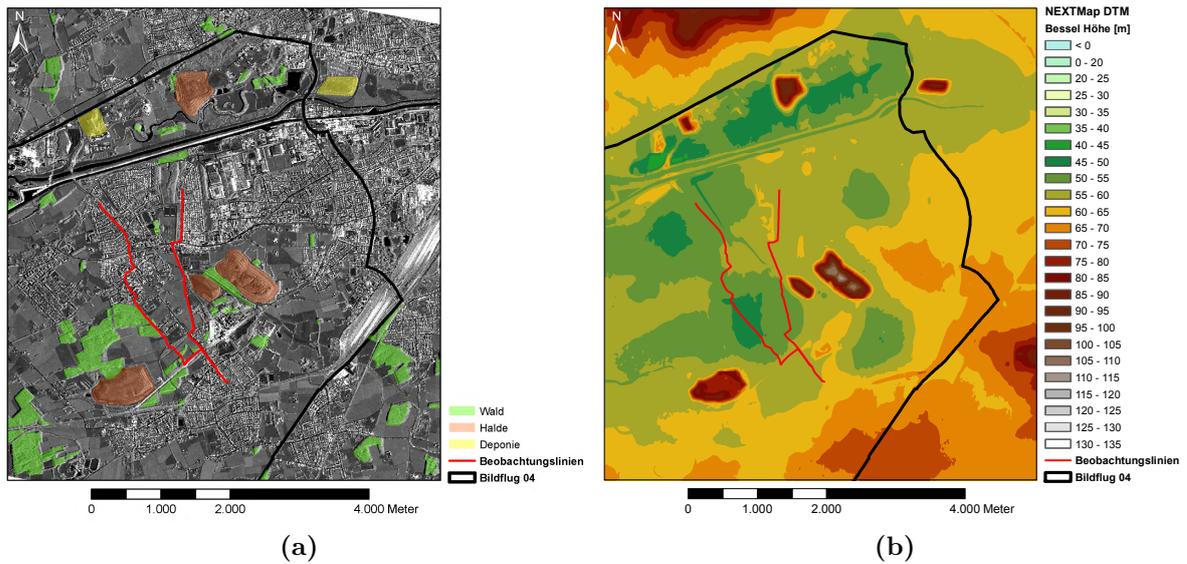
## 4.1. Beschreibung der Datensätze

Die für die Untersuchungen verwendeten Datensätze stammen überwiegend aus Forschungstätigkeiten, die zusammen mit der RAG Deutschen Steinkohle AG (RAG DSK) durchgeführt wurden mit dem Ziel der anwendungs-basierten Nutzbarmachung von radarinterferometrischen Daten im geometrischen Monitoringprozess von Bergbaubereichen (DSK FE0572). Die SAR-Daten wurden im Rahmen des *DLR TerraSAR-X Pre-launch AO Project GEO0165*, *ESA's ALOS ADEN Program Project 3576* und *JAXA's RA Program Project 094* für wissenschaftliche Zwecke zur Verfügung gestellt. Die Höhenmodelle wurden vom DLR (SRTM-X/-C) und von der RAG DSK (NEXTMap DTM, DGM50, Bildflüge) bereitgestellt. Eine Topographische Karte im Maßstab 1:25000 (TK25) lag bereits vor. Das NEXTMap DSM wurde vom IGMC der TU Clausthal erworben. Das Untersuchungsgebiet erwies sich als geeignet aufgrund der umfangreichen SAR- und DHM-Datenlage sowie der von der RAG DSK zur Verfügung gestellten terrestrischen Daten.

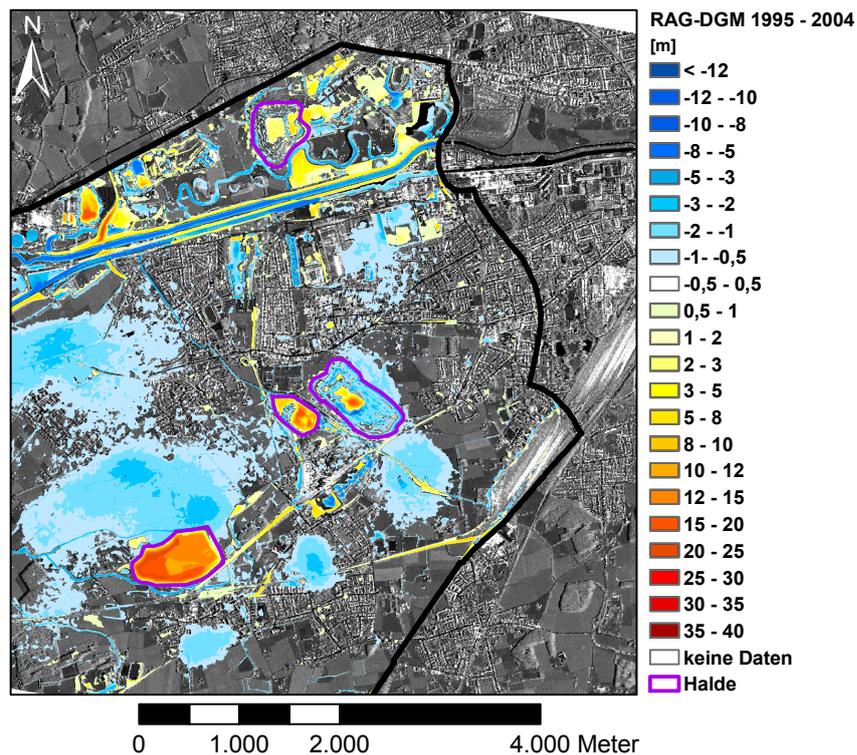
### 4.1.1. Testgebiet

Die Untersuchungen beschränken sich auf einen durch aktiven untertägigen Steinkohlenabbau geprägten Teilbereich im östlichen Ruhrgebiet in Deutschland zwischen etwa  $51^{\circ}38' - 51^{\circ}43' \text{ N}$  und  $7^{\circ}43' - 7^{\circ}50' \text{ O}$  (ca.  $8 \text{ km} \times 9 \text{ km}$ ), dessen Oberfläche vor allem städtisch aber auch ländlich geprägt ist (Abb. 4.1 a). Innerhalb des Betrachtungszeitraumes 12/2003 - 12/2009 sind im Testgebiet unterschiedliche Bewegungen an der Oberfläche zu beobachten. Überwiegend treten großflächige Senkungsmulden insbesondere im ländlichen Bereich zwischen den südlichen Halden auf (Abb. 4.1 a), die auf die untertägige Gewinnung von Steinkohleflözen im Strebverfahren ohne anschließende Verfüllung der Hohlräume zurückzuführen sind. Die Abbautätigkeiten wurden am 30.09.2010 in dem in Abb. 4.1 dargestellten südlichen Bereich eingestellt. Die muldenförmigen Abbaueinwirkungen des jahrzehntelangen Steinkohlebergbaus in dem Gebiet sind deutlich im Geländemodell in Abb. 4.1 b (grüne Bereiche) erkennbar. Weitere Bodenbewegungen, so genannte Setzungen, sind im Bereich der künstlich aufgeschütteten Bergehalden zu beobachten. Einige der Halden befinden sich bis heute noch in Schüttung bzw. sind teilweise erst innerhalb der letzten 15 Jahre entstanden. Das in Abb. 4.2 dargestellte Differenzbild zweier DHMs, die aus zwei Bildflügen der RAG DSK abgeleitet wurden, veranschaulicht, wie stark sich die Geländehöhen zwischen 1995 und 2004 infolge der Bergbautätigkeiten (Absenkung, Aufschüttung) im Untersuchungsgebiet verändert haben. Einige Halden wurde in Teilbereichen um etwa 15-20 m neu aufgeschüttet. Im östlichen städtischen Bereich sind nur sehr geringe Abbaueinwirkungen zu beobachten.

Innerhalb des bergbaulichen Einwirkungsbereichs wurden zwei Beobachtungslinien von der RAG DSK angelegt, die zwischen April 2006 und Juli 2009 regelmäßig etwa alle 3 Monate nivelliert wurden und als Referenzdaten für diese Untersuchungen zur Verfügung standen (vgl. Kapitel 5). Als Kartenbezugssystem wurde das lokale System DSK-Ruhr29 (Gauß-Krüger, Bessel, 3. Meridianstreifen) gewählt (Details siehe [Musiedlak & Spreckels \(2006\)](#)).



**Abbildung 4.1.:** Untersuchungsgebiet und Lage der Beobachtungslinien der RAG DSK (rote Linien); RAG-Bildflugbereich (schwarze Linie); (a) TerraSAR-X Intensitätsbild mit Überlagerung der topographischen Besonderheiten, (b) Geländemodell NEXTMap DTM von 2006



**Abbildung 4.2.:** Änderung der Geländehöhen zwischen 1995 und 2004 im Untersuchungsgebiet: Aufschüttungen (gelb-rot), Senkungen (blau); abgeleitet aus den Bildflügen der RAG DSK (schwarzer Umring); Halden (lila umrandet)

### 4.1.2. Satellitendaten

Für die Untersuchungen standen SAR-Datensätze der Satelliten Envisat (Track 337), TerraSAR-X (strip\_012R) und ALOS (Track 644, 645) zur Verfügung (Tab. 4.1). Abb. 4.3 verdeutlicht die unterschiedliche geometrische Auflösung der Daten. Details zu den Sensorparametern sind in Tab. F.1. zu finden.

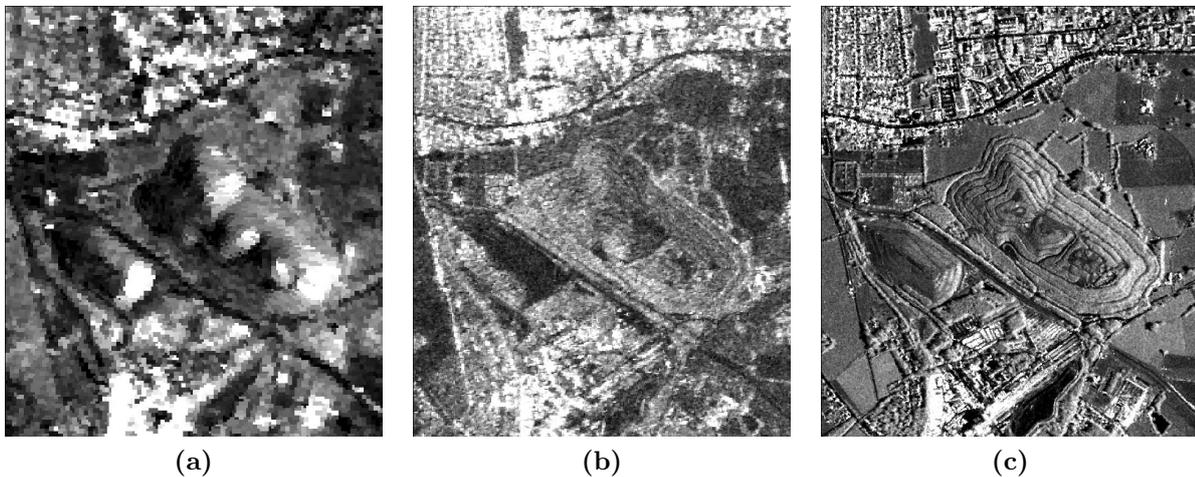
Der TerraSAR-X und Envisat ASAR Datensatz eignen sich sehr gut zur Bodenbewegungsüberwachung aufgrund der fast vollständig im jeweiligen Wiederholzyklus des Satelliten vorhandenen geschlossenen Datenreihe. Der zeitliche Abstand zwischen den PALSAR Szenen ist teilweise sehr groß. Er beträgt maximal 230 Tage zwischen zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmen. Einige PALSAR Szenen standen nur im Dual Mode (FBD) mit nur halber Range Bandbreite  $B_p$  zur Verfügung, konnten jedoch entsprechend Werner et al. (2007) gemeinsam mit den FBS-Mode Daten interferometrisch ausgewertet werden.

*Tabelle 4.1.: Verfügbare SAR-Datensätze*

Sensor	Track	Frame	Start	Ende	#	$\theta_i^*$		max. $\Delta t$
TerraSAR-X	12**	154**	11.02.08	24.12.09	53	41.08°	DESC	33
Envisat ASAR	337	2562	18.12.03	31.12.09	62	22.77°	DESC	105
ALOS PALSAR	644	1030	23.02.07	18.04.10	11	38.73°	ASC	230
	645	1020	15.01.07	20.06.10	15	38.75°	ASC	230

\* Bzgl. Szenenmitte

\*\* Die TerraSAR-X Szenen erfolgt die Kennzeichnung über die Beam- und Orbitnummer.



**Abbildung 4.3.:** Ausschnitte aus den gemittelten Intensitätsbildern zur Veranschaulichung der unterschiedlichen Bodenaufösungen von (a) Envisat ASAR, (b) ALOS PALSAR und (c) TerraSAR-X

Die senkrechten räumlichen Basislinien  $B_{\perp}$  betragen maximal 335 m bei den TerraSAR-X Interferogrammen, 1845 m bei Envisat ASAR und 6265 m bei ALOS PALSAR. Für DInSAR und Stacking eignen sich aufgrund der Kohärenzen nur Interferogramme mit maximalen Basislinien wie in Tab. 4.2 angegeben. Für die Untersuchungen wurden interferometrische Paare mit sehr guten Kohärenzen und geringen atmosphärischen Störungen ausgewählt. Die Validierung erfolgte mit interferometrischen Paaren mit geringem zeitlichen Abstand zu den Nivellementszeitpunkten (vgl. Kapitel 5). Alle interferometrischen Prozessierungen wurden mit der Software der Firma GAMMA Remote Sensing Research and Consulting AG, Schweiz durchgeführt.

Die ASAR und PALSAR Szenen standen als Rohdaten zur Verfügung und wurden zunächst in SLC-Daten vorprozessiert. Für die jeweiligen SLC-Datenstapel erfolgte anschließend die Koregistrierung aller Szenen, bezogen auf eine Referenzszenen und für jeweils einen kleinen Ausschnitt aus der Gesamtszene, sowie ein Multilooking (siehe Tab. 4.2). Vor der Erzeugung der differentiellen Interferogramme und Simulation der topographischen Phasen anhand von Höhenmodellaten wurden umfangreiche Geokodierungsanalysen mit den verfügbaren Höhenmodellen (Kapitel 4.1.3) durchgeführt. Für die ASAR und PALSAR Interferogramme erfolgte zusätzlich über die Bestimmung orbitfehlerbedingter Phasentrends eine präzise Bestimmung der Basislinien. Für alle Interferogramme erfolgte eine Schätzung eines räumlich niedrig-frequenten Phasenanteils, der zur atmosphärischen Korrektur der differentiellen Interferogramme genutzt wurde. Die Schätzung erfolgte über ein sehr starkes Multilooking unter Berücksichtigung der niedrig-frequenten Deformationsanteile. Höher-frequente atmosphärische Phasenanteile sind in den Interferogrammen noch enthalten und wurden bei der Interpretation berücksichtigt. Vor der Phasenabwicklung wurden die Interferogramme mit einem adaptiven spektralen Filteralgorithmus mehrfach gefiltert. Für die Phasenabwicklung eignete sich am besten der *Minimum Cost Flow* Algorithmus (Costantini, 1998). Die Ableitung der vertikalen Bewegungen anhand der abgewickelten differentiellen Phase geschieht unter der Annahme, dass nur vertikale Verschiebungen stattfanden (vgl. Kapitel 2.2.2).

*Tabelle 4.2.: Parameter der Interferogramme*

Sensor	Pixelgröße SLC [m × m]	Multilooking	Referenz	max. $\Delta t$ [d]	Ausschnitt [Pixel]	max. $B_{\perp}^*$ [m]
TerraSAR-X (Stripmap)	$1.36 \times 1.90$	$2 \times 2$	08.02.2009	33	$2000 \times 2000$	335
Envisat ASAR	$7.80 \times 4.03$	$1 \times 5$	26.04.2007	105	$500 \times 500$	~500-700
ALOS PALSAR 644	$4.68 \times 3.13$	$1 \times 2$	12.04.2008	230	$1200 \times 1200$	~3000
ALOS PALSAR 645	$4.68 \times 3.13$	$1 \times 2$	13.12.2007	230	$1200 \times 1200$	~3000

\* Maximale nutzbare Basislinie bei der die differentiellen Interferogramme erfahrungsgemäß noch ausreichend hohe Kohärenzen für die räumliche Phasenabwicklung aufweisen können, in Abhängigkeit von der Jahreszeit sowie anderen Kohärenzfaktoren.

### 4.1.3. Höhenmodelle

Um die Auswirkungen von Höhenmodellfehlern auf die interferometrische Bodenbewegungsmessung zu untersuchen, standen Höhenmodelle mit unterschiedlichen Qualitätsmerkmalen zur Verfügung (Tab. 4.3).

*Tabelle 4.3.: Verfügbare Höhenmodelldaten*

	SRTM		NEXTMap		RAG-DGM Bildflug
	X-Band	C-Band	DSM	DTM	
<b>Anbieter</b>	DLR		Intermap Technologies		RAG Deutsche Steinkohle AG
<b>Verfahren (System)</b>	InSAR (STS-99)		InSAR (STAR-3i)		Stereo-Photo- grammetrie (RMK TOP15)
<b>Wellenlänge</b>	3.1 cm	5.6 cm	~3 cm (X-Band)		–
<b>Typ</b>	DOM	DOM/DGM	DOM	DGM <sup>1</sup>	DGM
<b>Level</b>	DTED-2	DTED-1	Type II		–
<b>Erfass- ungszeit</b>	11.-22.2.2000		21.9.-13.10.2006		31.3.2004
<b>Lagegenauig- keit</b>	20 m (absolut <sup>3</sup> ) 15 m (relativ <sup>3</sup> )	20 m (absolut <sup>3</sup> ) 15 m (relativ <sup>3</sup> )	2.0 m (RMSE) <sup>4</sup> , 4.0 m (LE95)		$\leq \pm 2.5 \text{ cm}^5$
<b>Höhen- genauigkeit</b>	16 m (absolut <sup>2</sup> ) 6 m (relativ <sup>2</sup> )	16 m (absolut <sup>2</sup> ) 10 m (relativ <sup>2</sup> )	1.0 m (RMSE) <sup>4</sup> , 2.0 m (LE95)		$\leq \pm 4 \text{ cm}^5$
<b>horizontale Auflösung</b>	1“	3“	0.15“		–
<b>vertikale Auflösung</b>	~± 1 m		± 0.7 m		–
<b>Format</b>	16bit Integer, GeoTIFF		32bit Float, Binary Grid		32bit Float, TIN
<b>Datum horizontal</b>	WGS84	WGS84	ETRS89		DHHN92, DSK-Ruhr29
<b>Datum vertikal</b>	WGS84, MSL	WGS84, MSL	EVRS2000 (EGG07)		NN

<sup>1</sup> Das DGM wurde vom DOM abgeleitet, indem dichte Vegetation (>100 m in alle Richtungen) entfernt wurde.

<sup>2</sup> LE90: 90% Konfidenzintervall linearer Fehler (relativ: Punkt-zu-Punkt innerhalb von  $1^\circ \times 1^\circ$ , d.h. Unsicherheit der Höhe zwischen 2 Punkten aufgrund zufälliger Fehler)

<sup>3</sup> CE90: 90% Konfidenzintervall zirkularer Fehler

<sup>4</sup> Gilt für Geländeneigungen  $< 10^\circ$ . Bei  $20\text{-}30^\circ$  kann der RMSE doppelt so hoch sein.

<sup>5</sup>  $3\sigma$  für klar identifizierbare Passpunkte und Kanaldeckel (Spreckels & Schlienkamp, 2010).

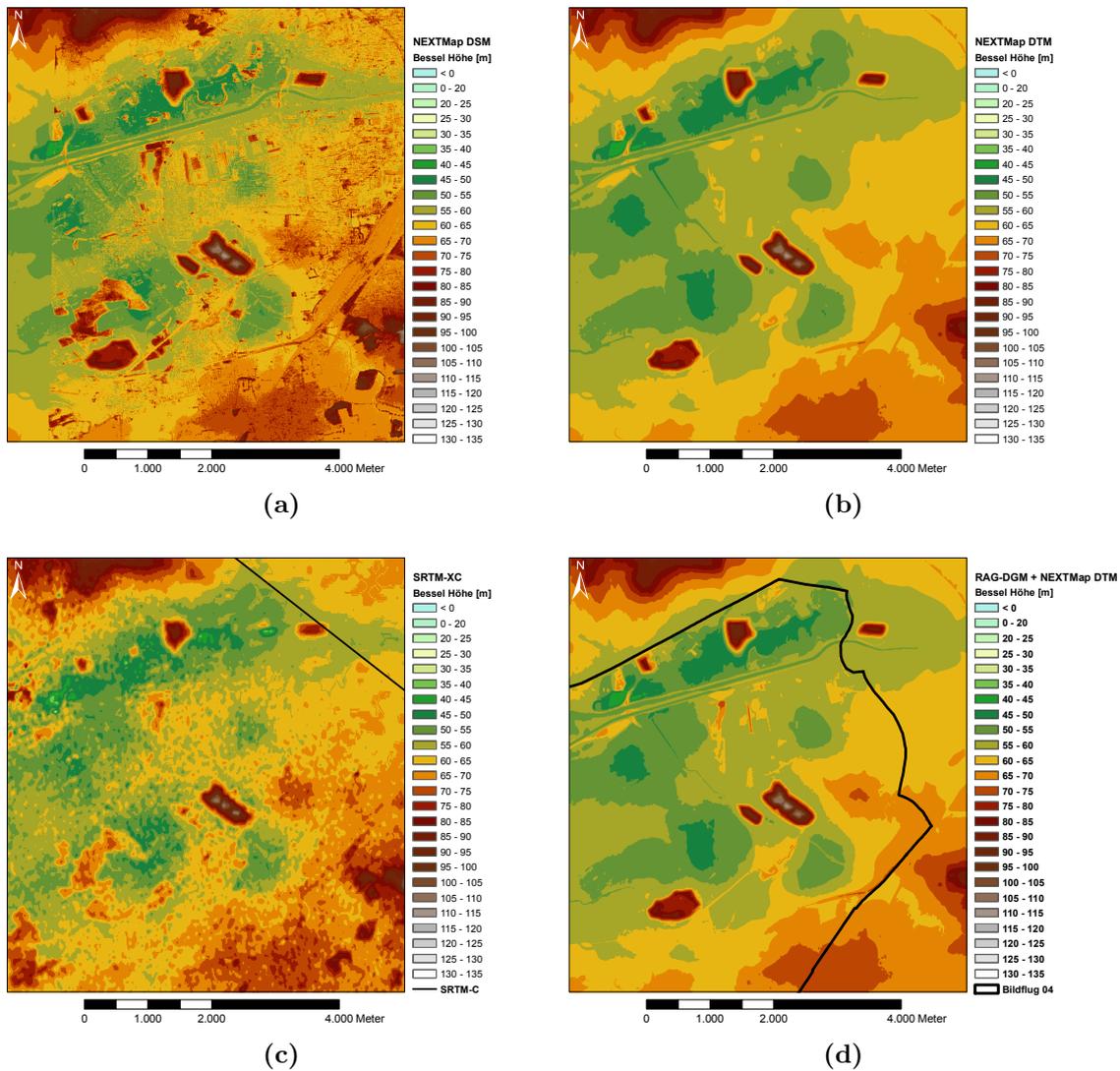
SRTM-Daten (Kapitel 2.4.1.3), speziell die kostenfreien SRTM-C DHMs mit 3“ Pixel (= 90 m am Äquator), werden von Anwendern am häufigsten für die topographische Phasenkorrektur verwendet. Die radarinterferometrisch abgeleiteten SRTM-DHMs haben den Vorteil, dass sie die Höhe der Phasenrückstreuungszentren widerspiegeln und somit grundsätzlich gut für die topographische Phasenkorrektur von Interferogrammen geeignet sind. Da die SRTM-Mission im Februar 2000 und somit im Nordhemisphärenwinter

durchgeführt wurde, ist zu berücksichtigen, dass die Eindringtiefe bei Laubwäldern deutlich höher ist als bei Nadelwäldern, was theoretisch zu topographischen Fehlern in Interferogrammen der Vegetationsperiode führen kann. Wie die Untersuchungen jedoch zeigen, sind Waldflächen grundsätzlich im Frühjahr bis Herbst in X- und C-Band Repeat-Pass Interferogrammen (ausgenommen Tandem-Paare) auch bei geringen Wiederholzyklen von 11 Tagen dekorreliert, so dass eine flächenhafte Ableitung der Bodenbewegungen in diesen Gebieten nicht erfolgen kann. L-Band Interferogramme weisen jedoch auch bei großen zeitlichen Basislinien sowie in der Vegetationsperiode relativ hohe Kohärenzen auf, da die Radarstrahlung bis zum Boden vordringen kann. In diesem Fall ist die Rückstreuoberfläche der SRTM-Daten (Baumkrone) nicht identisch mit der Höhe der Phasenzentren im L-Band (Bodennähe). Dies führt zu Phasenfehlern wie in den Beispielen in Kapitel 4.4.2 gezeigt wird.

Für die Untersuchung wurde das höher auflösende SRTM-X (1“) DHM mit einer räumlichen Auflösung von etwa  $19.5 \text{ m} \times 31.5 \text{ m}$  im Betrachtungsgebiet verwendet. Dieses weist im nordöstlichen Randbereich des Untersuchungsbereichs Datenlücken auf, die mit den frei verfügbaren SRTM-C (3“) zu einem Mosaik (SRTM-XC) aufgefüllt wurden (Abb. 4.4 c). Zwei wesentliche Nachteile von SRTM-DHMs zeigen sich insbesondere bei der Verwendung im Zusammenhang mit neueren hochauflösenden Sensoren. Dies ist zum einen die geringe räumliche Auflösung und Höhengenaugigkeit der SRTM-Daten, was sich insbesondere auf die Genauigkeit der topographischen Phasenkorrektur in städtischen Bereichen auswirken kann. Zum anderen wird am Beispiel der aufgeschütteten Halden die begrenzte zeitliche Gültigkeit der SRTM-Daten gut sichtbar.

Zur Verbesserung der topographischen Korrektur und insbesondere der Geokodierungsgenauigkeit wurden aktuellere DHMs beschafft, zunächst ein sehr hochauflösendes DGM von einem Bildflug der RAG DSK von 2004 (Abb. 4.4 d) sowie zusätzlich die NEXTMap DHMs von 2006 (Abb. 4.4 a-b). Ein DGM-50 der Landesvermessung erwies sich von vornherein als ungeeignet, aufgrund der schlechten räumlichen Auflösung (50 m), der geringen zeitlichen Aktualität und vielfach vorkommenden Artefakten in den Daten z.B. infolge von Orientierungsfehlern benachbarter ALS-Flugstreifen. Aktuelle hochauflösende ALS-Daten standen für die Untersuchungen leider nicht zur Verfügung.

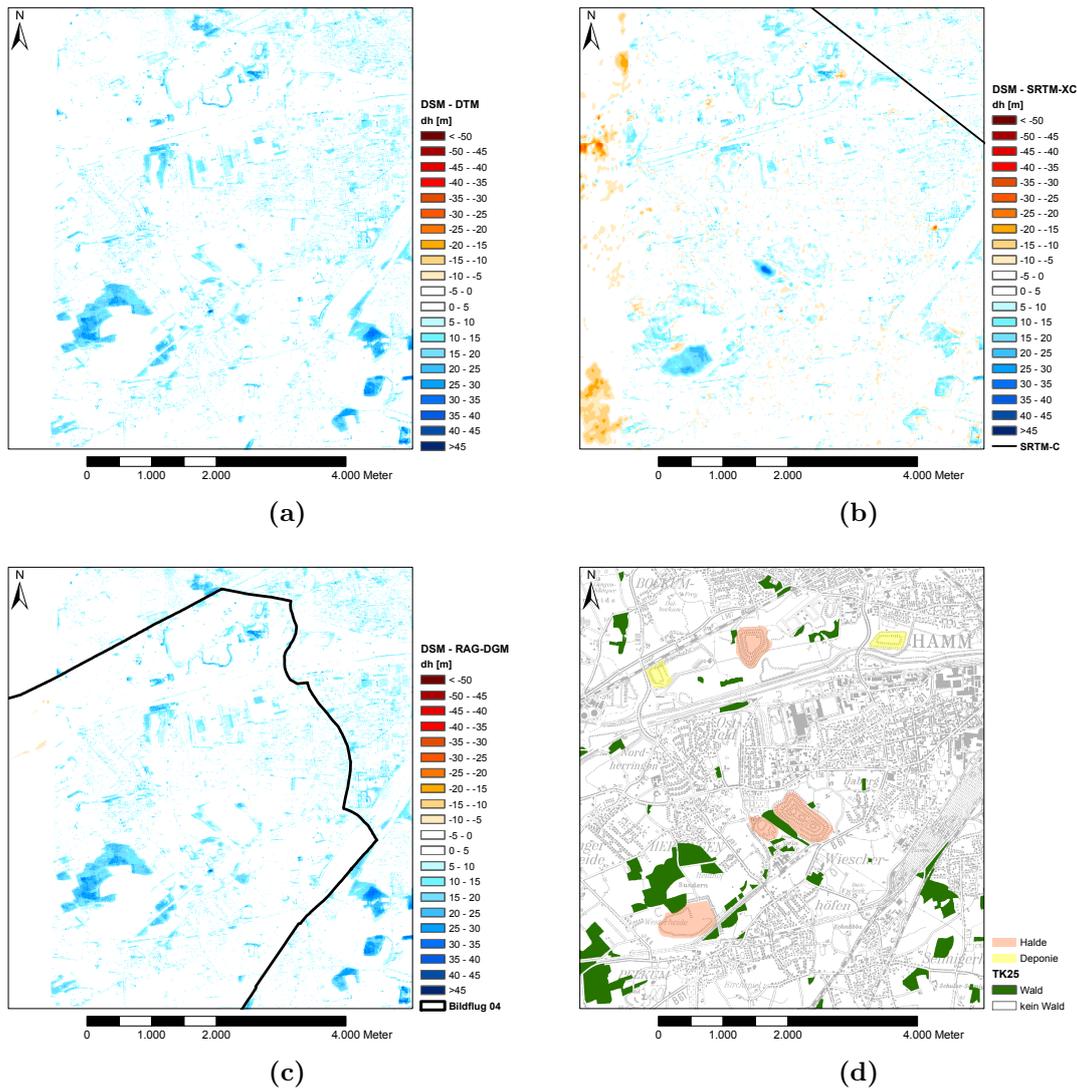
Die NEXTMap Höhenmodelle (Abb. 4.4 a-b) sind wie das SRTM-DHM aus SAR-Daten generierte Modelle, deren Erfassung jedoch flugzeuggestützt erfolgte. Sie sind zusätzlich deutlich aktueller und hochauflösender. Die Qualität der NEXTMap Höhenmodelle ist abhängig von der Geländeneigung, vgl. Tab. 4.3. In zugänglichen Gebieten wurden die NEXTMap Daten mit Bodendaten validiert; in großen Waldgebieten die Geländeoberfläche vom Bearbeiter unter Nutzung der FITS Software geschätzt bzw. mit nationalen Daten verglichen (Intermap Technologies, 2011). Aufgrund der guten Dokumentation können die Daten als recht zuverlässig eingestuft werden. Das NEXTMap DSM wurde nur für einen sehr kleinen Teilbereich von etwa  $12 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  erworben, weshalb der Betrachtungsbereich im Westen nicht vollständig abgedeckt werden konnte (vgl. Abb. 4.4 a). Entsprechend erfolgte eine Mosaikierung des NEXTMap DSM mit dem DTM ( $32.7 \text{ km} \times 23.5 \text{ km}$ ). Da die NEXTMap DSM Höhen wie bei SRTM die Höhen der Phasenrückstreucentren widerspiegeln, eignet sich dieses Oberflächenmodell grundsätzlich am besten für die topogra-



**Abbildung 4.4.:** Bessel-Höhen der verfügbaren Höhenmodelle in [m]: (a) NEXTMap DSM, (b) NEXTMap DTM, (c) SRTM-X/-C, (d) RAG Bildflug kombiniert mit dem NEXTMap DTM

phische Phasenkorrektur. Aufgrund seiner guten zeitlichen Aktualität, hohen räumlichen Auflösung, Lage- und Höhengenaugigkeit sowie der hohen Zuverlässigkeit wurde das NEXTMap DSM als Referenzhöhenmodell für die Untersuchungen genutzt.

Die Höhendifferenzen zwischen den Höhenmodellen bezogen auf das NEXTMap DSM sind in (Abb. 4.5 a-c) dargestellt. Alle Höhenmodelle wurden für die Analysen in das DSK-Ruhr29 System mit Bessel-Höhen transformiert. Da die Differenzen zwischen dem NEXTMap DTM und dem RAG-DGM im Mittel nur  $-33\text{ cm}$  ( $\pm 80\text{ cm}$ ) betragen (vgl. Tab. 4.4) und Berechnungen mit beiden Höhenmodellen somit fast identische Ergebnisse liefern, wird im folgenden auf die Ergebnisdarstellungen mit dem RAG-DGM verzichtet. Die größten Unterschiede zwischen den DGMs und dem NEXTMap DSM sind in Vegetations- und bebauten Bereichen zu finden. Die Unterschiede betragen im Mittel  $2.6\text{--}2.8\text{ m}$ . 90% der Höhendifferenzen liegen innerhalb von  $\pm 8\text{ m}$  (Tab. 4.4), in Waldbereichen



**Abbildung 4.5.:** Darstellung der Höhenmodell­differenzen in [m]: (a) NEX­TMap DSM - NEX­TMap DTM, (b) NEX­TMap DSM - SRTM-X/-C, (c) NEX­TMap DSM - RAG Bildflug; (d) TK25 inkl. Vegetation, Halden und Deponien

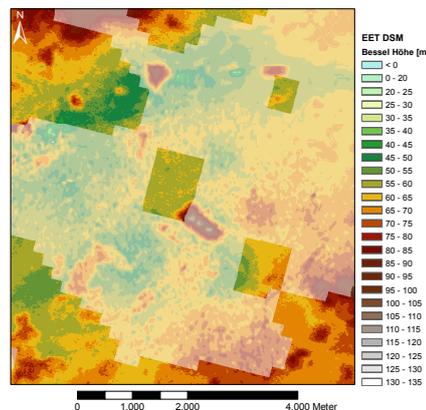
bei 15-30 m. Der Vergleich der Oberflächenmodelle NEX­TMap DSM und SRTM-XC zeigt die unzureichende Aktualität der SRTM-Daten im Bereich der Halden. SRTM-Höhen sind in Wäldern etwas niedriger als beim NEX­TMap DSM, was auf unterschiedliche Eindring­tiefen, aber auch Vegetationswachstum zurückzuführen ist. Die niedrigeren bzw. teilweise höheren SRTM-Höhen in bebauten Bereichen resultieren aus der geringen Bodenauf­lösung (Abb. 4.5 b). 90% der Differenzen zwischen dem NEX­TMap DSM und SRTM-XC liegen zwischen  $\pm 6$  m und sind innerhalb dieses Konfidenzintervalls normalverteilt mit einem Mittelwert von 0.4 m und einer Standardabweichung von  $\pm 2.5$  m.

Da L-Band Strahlung Vegetation bis zum Boden bzw. bis in Bodennähe durchdringen kann, wurde anhand des Wald-Layers der TK25 (Abb. 4.5 d) ein „DSM ohne Wald“ erzeugt. Dieses weist in Waldgebieten die NEX­TMap DTM und in den übrigen Bereichen die

*Tabelle 4.4.: Statistik der Höhendifferenzen [m] der verwendeten Höhenmodelle*

Differenz	MIN	MAX	MEAN	STDDEV	90%	95%
DSM - DTM	-14	49	2.8	4.7	±8.0	±12.0
DSM - RAG-DGM	-14	49	2.6	4.7	±8.0	±12.0
DSM - SRTM	-28	46	1.2	4.0	±6.0	±9.0
DSM - SRTM (ohneWald)	-28	46	0.9	3.6	±6.0	±8.0
DTM - RAG-DGM	-12	0	-0.3	0.8	±1.0	±2.0

NEXTMap DSM Höhen auf. Das Modell wurde für die topographische Phasenkorrektur von ALOS-Daten getestet. Zusätzlich wurden für die Geokodierungstests weitere Modelle erzeugt: NEXTMap DSM mit WGS84-Höhen, SRTM-XC Modell mit WGS84 Höhen bzw. *Mean Sea Level* (MSL) Höhen). Damit wurde untersucht, welchen Einfluss Abweichungen zwischen dem Lage- und Höhendatum auf das Ergebnis der Geokodierung haben. In der Praxis kann es vorkommen, dass in einem lokalen Bezugssystem gearbeitet wird in welches das verfügbare Höhenmodell vor der Geokodierung ins RDC-System bzgl. der Lage transformiert wird, z.B. von WGS84 in eine Gauß-Krüger Abbildung mit Bessel-Ellipsoid, jedoch ohne Transformation der Höhen. Anhand eines ERS-Envisat Tandem-Paares (EET) vom 15.01.2009 wurde zusätzlich versucht ein EET-DHM zu generieren. Aufgrund der schlechten Kohärenzen von EET-Daten im Stadtbereich (vgl. Kapitel 2.4.1.3) konnten jedoch für nur wenige Stellen im Testgebiet Höhen abgeleitet werden (vgl. Abb. 4.6).



*Abbildung 4.6.: Der Versuch ein DHM aus ERS-Envisat Tandem-Daten zu generieren war nur für wenige Stellen im Testgebiet erfolgreich. In Bereichen mit Kohärenzen  $< 0.5$  in denen die DHM-Ableitung misslang ist das SRTM-XC DHM transparent dargestellt.*

## 4.2. Detektion von höhenfehlerbedingten Phasendifferenzen in Interferogrammen

Höhenfehler führen zu systematischen Phasenfehlern in differentiellen Interferogrammen, die sich von anderen Phaseneinflüssen durch deren Abhängigkeit von der räumlichen Ba-

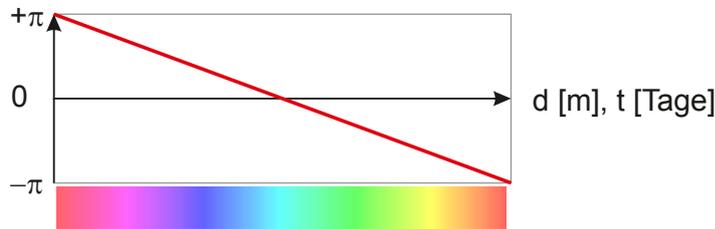
sislinie (vgl. Kapitel 3) unterscheiden. Dies erleichtert die Detektion und Interpretation höhenabhängiger Fehler in radarinterferometrischen Ergebnissen. Bei großen Basislinien bewirken Höhenfehler größere Phasenfehler. Hohe räumliche Phasenfehlergradienten werden in Abhängigkeit von der Bodenauflösung durch enge Farbzyklen im Interferogramm sichtbar. Die Richtung oder auch Anstieg der topographiebedingten Phasendifferenzen (Zu-/Abnahme bzw. positiv/negativ) und damit auch der Farbzyklen wird bestimmt durch die Richtung der räumlichen Basislinie (positiv/negativ) sowie die Richtung des Höhenfehlers (zu niedrige/hohe Höhenwerte). Der Anstieg der Phasendifferenzen, der durch Bewegungen verursacht wird, ist dagegen nur abhängig von der Richtung der zeitlichen Basislinie ( $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$  bzw.  $\phi_2 - \phi_1$ ). Der Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Phasendifferenz in Abhängigkeit von der Aufnahmegeometrie (räumliche und zeitliche Basislinie) sowie den Ursachen (Bewegung, Höhenfehler) ist in Tab. 4.5 dargestellt.

**Tabelle 4.5.:** Zu- bzw. Abnahme der Phasendifferenzen in differentiellen Interferogrammen in Abhängigkeit der Richtung der zeitlichen und räumlichen Basislinie sowie dessen Ursache.

			<b>positive zeitliche Basislinie (+<math>\Delta t</math>) <math>\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2</math></b>	<b>negative zeitliche Basislinie (-<math>\Delta t</math>) <math>\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1</math></b>
<b>positive räumliche Basislinie (+<math>B_{\perp}</math>)</b>	Bewegung	Senkung	+	-
		Hebung	-	+
	Höhenfehler	DHM zu niedrig	-	-
		DHM zu hoch	+	+
<b>negative räumliche Basislinie (-<math>B_{\perp}</math>)</b>	Bewegung	Senkung	+	-
		Hebung	-	+
	Höhenfehler	DHM zu niedrig	+	+
		DHM zu hoch	-	-
Zunahme der Phasendifferenzen (+): cyan → blau → magenta → rot → gelb → grün → cyan → ...				
Abnahme der Phasendifferenzen (-): cyan → grün → gelb → rot → magenta → blau → cyan → ...				
Überschätzung von Bewegungen bei gleichem Phasenanstieg: (++) bzw. (--)				
Unterschätzung von Bewegungen bei entgegengesetzten Phasenanstieg: (+-) bzw. (-+)				

Da Phasen bzw. auch Phasendifferenzen relativ gemessene Werte zwischen  $-\pi$  und  $+\pi$  sind, ist die Verwendung der Begrifflichkeiten von „positiven und negativen Phasendifferenzen“ zur Beschreibung der Phasenänderung nicht ganz korrekt, jedoch als Synonym für die Richtung des Phasenanstiegs gültig und eindeutig. Positive Phasendifferenzen entsprechen somit einem positiven Phasenanstieg (Zunahme), negative einem negativen Phasenanstieg (Abnahme) (vgl. Abb. 4.7), unabhängig davon, ob es sich um eine zeitliche oder

räumliche Phasenänderung handelt. Die in der Praxis übliche und auch hier verwendete Farbkodierung ist in Abb. 4.7 dargestellt. Ein Farbzyklus entspricht einem Phasenzyklus. Ein Phasenzyklus entspricht wiederum einer vertikalen Verschiebung in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Sensors entsprechend Tab. 4.6.

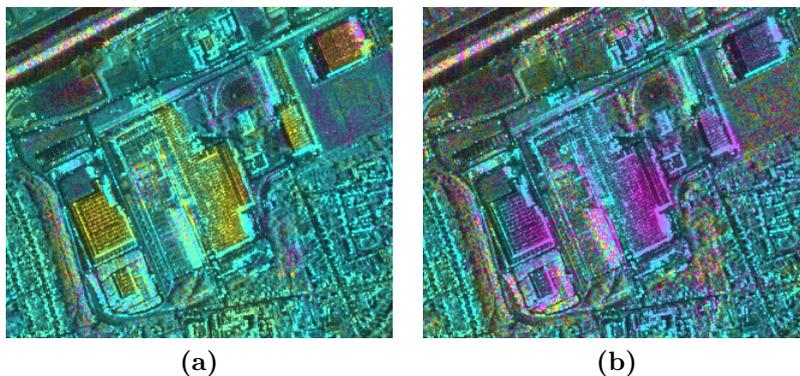


**Abbildung 4.7.:** Definition des Phasenanstiegs und der verwendeten Phasen-Farbkodierung am Beispiel eines Phasenzykluses. Dargestellt ist eine Abnahme der Phasendifferenz ( $\hat{=}$  negativen Phasenanstieg).

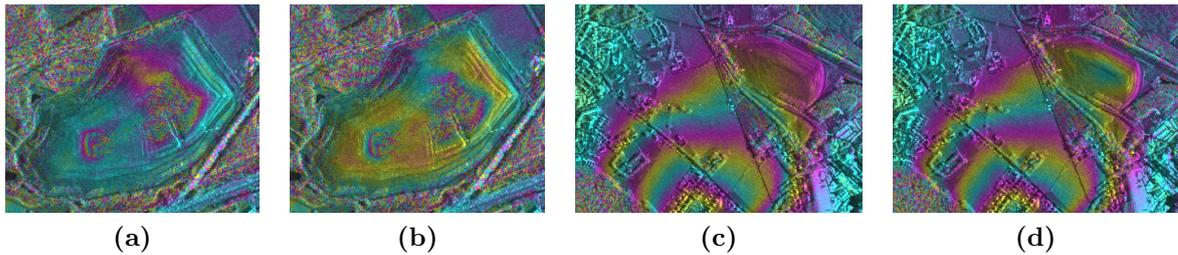
**Tabelle 4.6.:** Vertikale Verschiebung pro Phasenzyklus

Sensor	Einfallswinkel $\theta_i$ [°]	Vertikale Verschiebung [mm]
TerraSAR-X	41.08	20.6
Envisat ASAR	22.77	30.5
ALOS PALSAR	38.73	151.3

Zu niedrig angenommene Höhen, z.B. bei Verwendung eines DGMs statt des erforderlichen DOMs für die topographische Phasenkorrektur, bewirken in Interferogrammen mit positiven räumlichen Basislinien *immer* eine Abnahme der Phasendifferenzen (vgl. Abb. 4.8a), mit negativen Basislinien eine Zunahme der Phasendifferenzen (vgl. Abb. 4.8b). In Abhängigkeit von der Richtung der zeitlichen Basislinie führen abnehmende Phasendifferenzen bei Überlagerung mit Bodenbewegungen zur Unterschätzung von Senkungen bei  $+\Delta t$  (entgegengesetzter Phasenanstieg, hier: + und -) (vgl. Abb. 4.9 a-b) bzw. Überschätzung von Senkungen bei  $-\Delta t$  (gleicher Phasenanstieg, hier: - und -) (vgl. Abb. 4.9 c-d).



**Abbildung 4.8.:** Höhenfehlerbedingte Phasenfehler in TerraSAR-X Interferogrammen mit  $+\Delta t$ , deren topographische Phase mit einem „zu niedrigen DHM“ korrigiert wurde: (a)  $B_{\perp} = +197 \text{ m}$ , (b)  $B_{\perp} = -59 \text{ m}$



**Abbildung 4.9.:** Überlagerung von Bewegungen und Höhenfehlern in TerraSAR-X Interferogrammen mit  $+\Delta t$  (11 Tage). Beispiel 1 mit positiver Basislinie  $B_{\perp}=+153\text{ m}$  und Senkungen (a) ohne Höhenfehler, (b) DHM zu niedrig  $\rightarrow$  negativer Höhenfehler führt zur Abnahme der Phasendifferenzen und zur Unterschätzung der Senkungen; Beispiel 2 mit negativer Basislinie  $B_{\perp}=-108\text{ m}$  und Senkungen (c) ohne Höhenfehler, (d) DHM zu niedrig  $\rightarrow$  negativer Höhenfehler führt zu einer Zunahme der Phasendifferenzen und zur Überschätzung der Senkungen, was man insbesondere im nordöstlichen Senkungsbereich sieht. 1 Farbzklus entspricht einer vertikalen Bewegung von etwa 20.6 mm.

Da bei Umkehrung der interferometrischen Berechnung der Szenen 1-2 ( $+\Delta t$ ) zu 2-1 ( $-\Delta t$ ) sich gleichzeitig die Richtung der räumlichen Basislinien ändert, bleibt bei Überlagerung beider Phaseneinflüsse der Effekt der Unter- bzw. Überschätzung gleich. Dies hat zur Folge, dass nur unter Voraussetzung von bestimmtem Vorwissen (mindestens einer Ursachenrichtung!) und unter Berücksichtigung der Länge der räumlichen Basislinie Höhenfehler von Bewegungen unterscheidbar und quantifizierbar sind.

Da die Richtung der Phasenzyklen bei Bodenbewegungen unabhängig von der Richtung der Basislinie ist, können bei Betrachtung mehrerer Interferogramme mit wechselnder Richtung der räumlichen Basislinie, jedoch gleichbleibender Richtung der zeitlichen Basislinie, höhenfehlerbedingte Phasenfehler gut von Bodenbewegungen unterschieden werden. Eine Unterscheidung von atmosphärischen Störungen und Bewegungen basiert überwiegend auf räumlicher Korrelation. Da atmosphärenbedingte Phasendifferenzen ebenfalls wie bei Deformationen unabhängig von der Richtung der räumlichen Basislinie im Interferogramm auftreten, ist eine Trennung beider Phasenanteile unter bestimmten Bedingungen schwierig, insbesondere bei ähnlicher räumlicher Ausbreitung.

## 4.3. Geokodierungsanalysen

Im Vordergrund dieses Abschnittes steht die Beantwortung der Frage, inwieweit sich Höhenmodellfehler unmittelbar auf die Transformation des DHMs ins RDC-System bzw. die Geokodierungsgenauigkeit in abhängig vom Sensor und der Wahl des Höhenmodells auswirken. Desweiteren wird die Notwendigkeit der Feinregistrierung überprüft.

### 4.3.1. Initiale Geokodierungsfehler

Bei der initialen Geokodierung erfolgt die Transformation eines DHMs vom Kartenbezugs-system ins RDC-System zunächst nur durch Lösen der Distanz-Doppler-Gleichungen (vgl.

Kapitel 2.3.1). Gleichmäßige Offsets in Range-Richtung sind vor allem auf Orbitungenauigkeiten zurückzuführen, in Azimut-Richtung insbesondere auf Fehler bei der Azimutzeitbestimmung (Instrumenten „time tagging“ Verschiebung, siehe auch Breit et al. (2010)). Für die Auswertung der SAR-Daten wurden die präzisen Orbitdaten (vgl. Tab. 3.1) verwendet. Wie die Offset-Werte in Tab. 4.7 zeigen, konnten bei Verwendung des NEXTMap DSM bereits bei der initialen Geokodierung der TerraSAR-X und ALOS PALSAR Daten hohe Genauigkeiten für das Untersuchungsgebiet erreicht werden. Prinzipiell ist somit auch ohne Feinregistrierung eine je nach Anwendung ausreichend genaue Geokodierung bei diesen Sensoren möglich. Für den Einsatz als Messmethode im geodätischen Sinne ist dies hinsichtlich der exakten Transformation der radarinterferometrischen Messergebnisse in ein Kartenbezugssystem nicht ausreichend. Bezüglich der durch die Verschiebung der Höhendaten im RDC-System verursachten Höhenfehler bzw. topographischen Phasenfehler kommt es nur dann zu signifikanten Deformationsmessfehlern, wenn die Phasenfehler kleiner als das Phasenrauschen sind. Dies ist abhängig von der Basislinie (Betrag und Richtung), der Topographie und der Richtung des Lageversatzes.

**Tabelle 4.7.:** *Initiale Geokodierungsgenauigkeit [Pixel]*

Sensor	MEAN Range	STDDEV Range	MEAN Azimut	STDDEV Azimut
TerraSAR-X	-2.54	±0.72	-0.76	±0.44
Envisat ASAR	-8.98	±0.06	-1.05	±0.10
ALOS PALSAR 644	0.80	±0.60	-2.21	±0.52
ALOS PALSAR 645	1.13	±0.61	-2.02	±0.44

Abb. 4.10 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem Lageversatz (Shift) eines DHMs infolge einer inkorrekten Geokodierung ins RDC-System und den sich ergebenden Phasenfehlern, die je nach Richtung zu einer Fehlinterpretation von Hebungen und Senkungen bei der Bodenbewegungsmessung führen können (vgl. Tab. 4.5).



**Abbildung 4.10.:** *Veranschaulichung der Auswirkungen von DHM-Verschiebungen bei der Geokodierung auf die gemessenen Bodenbewegungen im Fall einer positiven zeitlichen Basislinie (vgl. Tab. 4.5)*

Ein Lageversatz in Richtung des Sensors (negativer Shift) bewirkt in Abhängigkeit vom Höhenanstieg eine ungenaue topographische Korrektur. Bei dem Sensor zugeneigten Flächen wird quasi zu viel Topographie korrigiert (=positive Differenz), während bei abgewandten Flächen das DHM zu niedrig ist (=negative Differenz). In Abhängigkeit von der Richtung der räumlichen und zeitlichen Basislinie kommt es, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, zu einer Zu- oder Abnahme der Phasendifferenzen im differentiellen Interferogramm, die als Hebung oder Senkung fehlinterpretiert werden können bzw. zur Über- und Unterschätzung von Bewegungen führen.

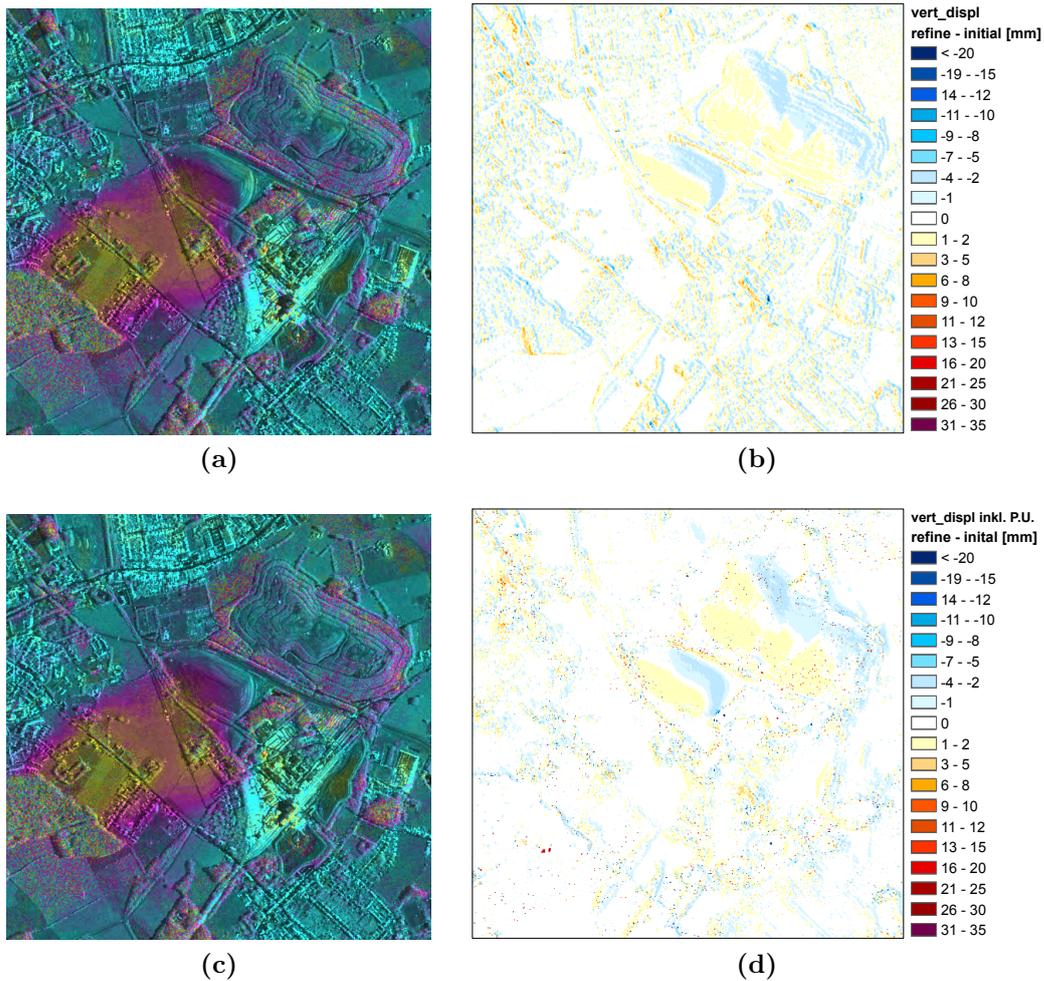
#### 4.3.1.1. Sensorabhängige initiale Fehler

Das Beispiel in Abb. 4.11 zeigt wie sich ein DHM-Lageversatz der initialen Geokodierung in einem TerraSAR-X differentiellen Interferogramm mit einer Basislinie  $B_{\perp} = +197$  m auswirkt. Dargestellt ist das differentielle Interferogramm mit einem korrekt geokodierten NEXTMap DSM (Abb. 4.11 a) und durch die initiale Geokodierung verschobenen DSM (Abb. 4.11 c).

Die sich ergebenden Phasenfehler sind vor allem an der südlichen Haldenflanke im Bereich der Senkungsmulde sichtbar (Abb. 4.11 c). Anhand der Differenzen der aufnahmebedingten Phasen beider Interferogramme kann der Fehler der Bodenbewegungsmessung (vertikal) simuliert werden (Abb. 4.11 b). Unberücksichtigt bleiben dabei die räumlichen Zusammenhänge, so dass einzelne Pixel Phasenfehler größer als  $2\pi$  aufweisen. Der reale Messfehler ergibt sich über die abgewickelten Phasenbilder und Differenzbildung (Abb. 4.11 d). Die Unterschiede zwischen den simulierten und realen Messfehlern sind auf die vor der Phasenabwicklung durchgeführte adaptive Filterung der Interferogramme und die Phasenabwicklung selbst zurück zu führen. Stark variierende Phasenfehler benachbarter Pixel, die teilweise zu Dekorrelationen führen, werden somit reduziert. Räumlich zusammenhängende Bereiche mit ähnlichen Phasenfehlern weisen letztendlich tatsächlich Messfehler auf. Wie das Beispiel in Abb. 4.11 d zeigt, wurden die Senkungen an der Südflanke der kleineren Halde um 1-2 mm bei einem Senkungsbetrag von maximal 14 mm unterschätzt.

Simulationen von Geokodierungsfehlern unterschiedlicher Richtung und Größe bewirken deutliche Phasenfehler in TerraSAR-X Interferogrammen, insbesondere bei relativ großen Basislinien. Abb. 4.12 zeigt die Auswirkungen von initialen Geokodierungsfehlern in Range und Azimut von  $-5 \times 0$  bzw.  $5 \times 0$  Pixel am Beispiel eines Interferogramms mit einer Basislinie von +197 m. Die Messfehler sind theoretisch nicht größer als  $\pm 1$  Phasenzyklus (Tab. 4.6), wie die Untersuchungen bestätigen. Einige einzelne Pixel weisen jedoch Phasenfehler von mehreren Phasenzyklen auf, was auf Phasenabwicklungsfehler zurückzuführen ist. Sie sind als Ausreißer detektierbar und treten insbesondere in dekorrelierten Bereichen auf (vgl. Abb. 4.12 f, links).

Initiale Geokodierungsfehler bei ALOS PALSAR Daten können aufgrund der relativ großen Wellenlänge auch bei kleinen Phasenfehlern zu großen Messfehlern bei der Umrechnung der abgewickelten Phasen in vertikale Verschiebungen führen (vgl. Abb. 3.3). Da kleine Phasenfehler im Interferogramm kaum sichtbar sind (vgl. Abb. 4.13), wird der Einfluss auf die Bodenbewegungsmessung vielfach unterschätzt. Beispielsweise entspricht

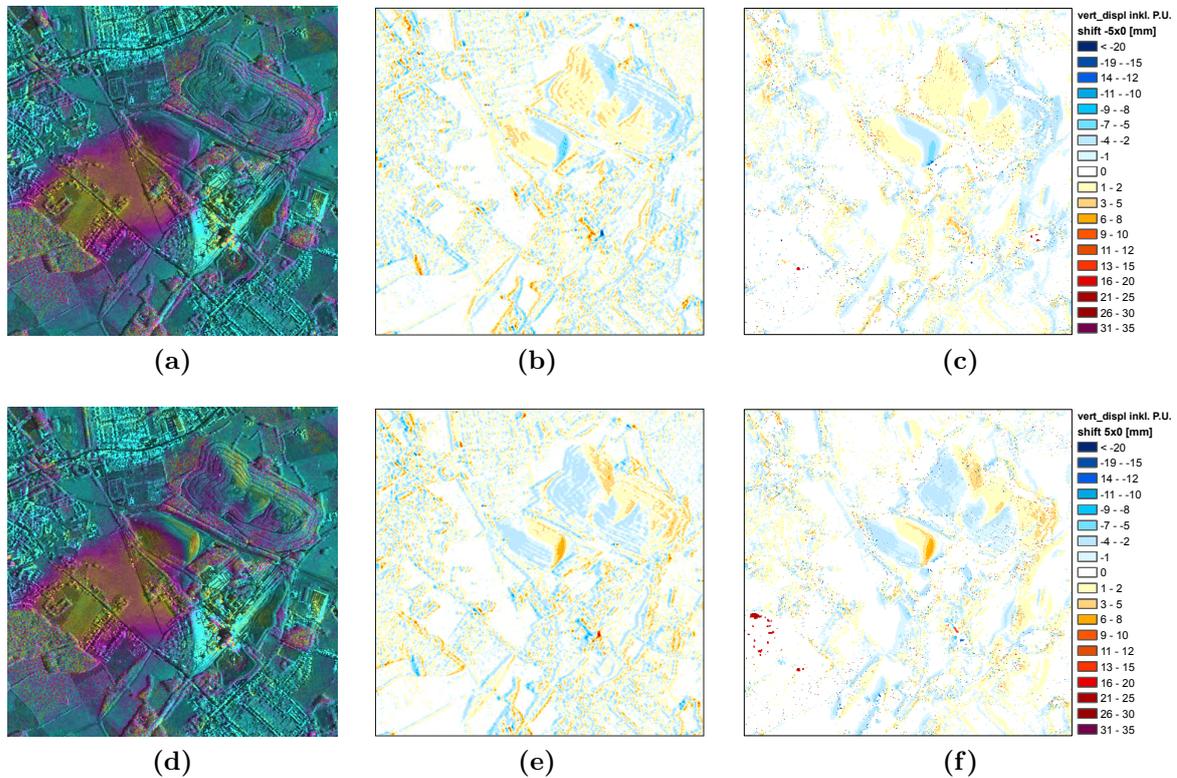


**Abbildung 4.11.:** TerraSAR-X DInSAR 02.03.2009 - 13.03.2009 ( $B_{\perp} = +197\text{ m}$ ,  $\Delta t = 11$  Tage); differentielle Interferogramme erstellt mit dem NEXTMap DSM bei (a) korrekter Geokodierung und (c) initialer Geokodierung mit  $-2.54 \times -0.76$  Pixel Lageversatz; (b) simulierte und (d) reale Messfehler in mm; Positive/Negative Werte = Unter-/Überschätzung von Senkungen; Sensorblickrichtung: von rechts.

ein Phasenfehler von  $50^{\circ}$  im Beispiel in Abb. 4.13 einem vertikalen Verschiebungsfehler von 21 mm. Die Simulation der Messfehler anhand der Differenzen der aufnahmebedingten Phasen zeigt in Abb. 4.13 b für viele Pixel sehr hohe Werte. Durch Filterung der Phasen vor der Phasenabwicklung können topographiebedingte Phasenfehler, die kleiner als das Rauschen sind, deutlich reduziert werden (Abb. 4.13 d). Das Rauschen beträgt etwa  $35^{\circ}$  bei diesem Beispiel, was einer vertikalen Verschiebung von etwa 15 mm entspricht (vgl. Abb. 4.14).

Die initiale Geokodierung des DSM bei Envisat ASAR zeigt eine Verschiebung des Höhenmodells um ca. 9 Pixel in Sensorrichtung, was signifikante Phasenfehler und Dekorrelationen im differentiellen Interferogramm bewirkt (Abb. 4.15). Diese sind vergleichbar mit kleinräumig atmosphärischen Störungen. Die gesamte Senkungsmulde wird durch die Lageverschiebung der Höhendaten stark verzerrt. Die Verzerrungen führen in den kohärenten

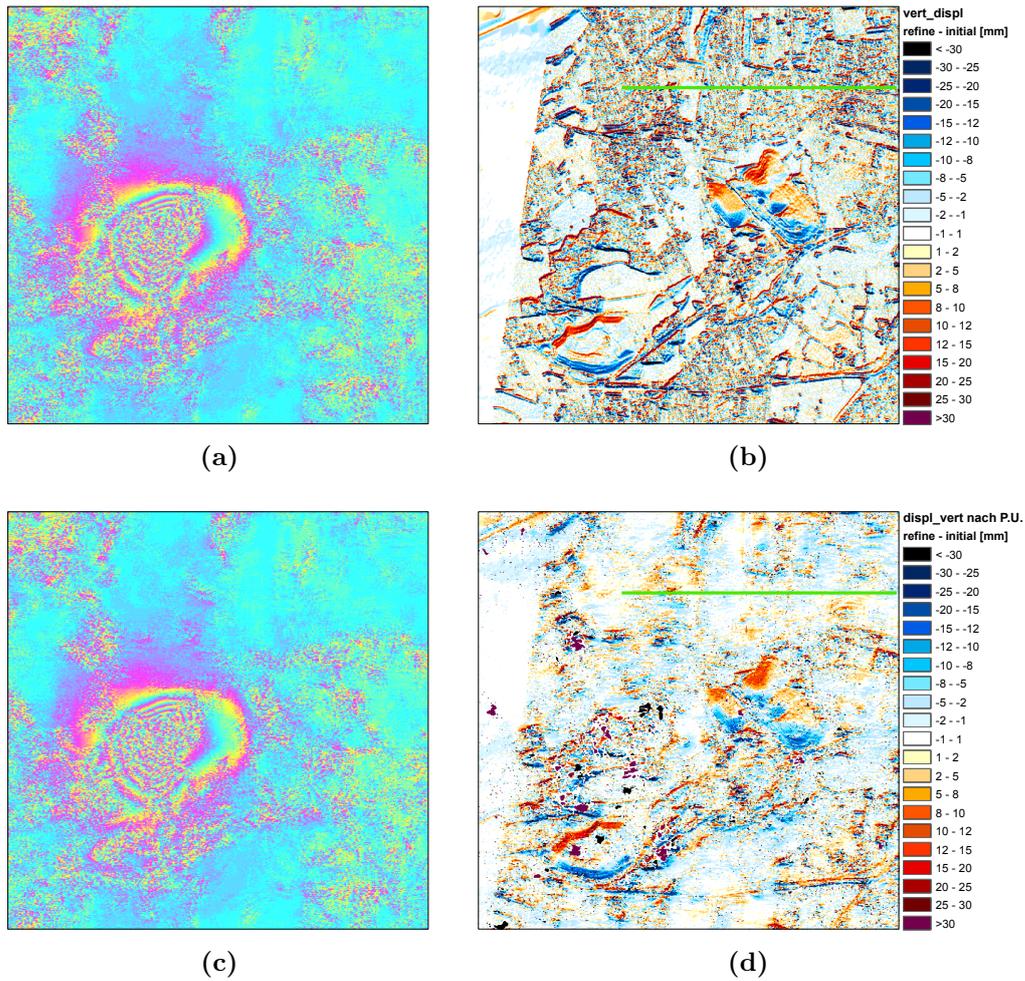
Bereichen zu signifikanten Senkungsmessfehlern (Abb. 4.15 c). Die Geokodierungsfehler zeigen deutlich die Notwendigkeit einer Feinregistrierung. Simulationen mit einem Lageversatz von  $-2 \times 0$  Pixel führen zu nicht vernachlässigbaren Messfehlern speziell im Bereich der Halden und an Waldgrenzen (östlicher und südwestlicher Senkungsmuldenbereich) (Abb. 4.16).



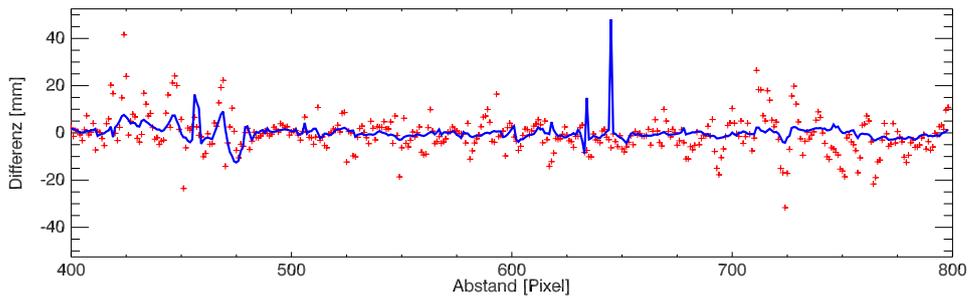
**Abbildung 4.12.:** TerraSAR-X DInSAR 02.03.2009 - 13.03.2009 ( $B_{\perp} = +197\text{m}$ ,  $\Delta t = 11$  Tage); differenzielle Interferogramme (links), simulierte Messfehler (Mitte) und reale Messfehler (rechts) in mm bei einem Geokodierungsfehler von  $-5 \times 0$  Pixel (a-c) und  $5 \times 0$  Pixel (d-f); Sensorblickrichtung: von rechts.

#### 4.3.1.2. Höhenmodellabhängige lokale Verzerrungen

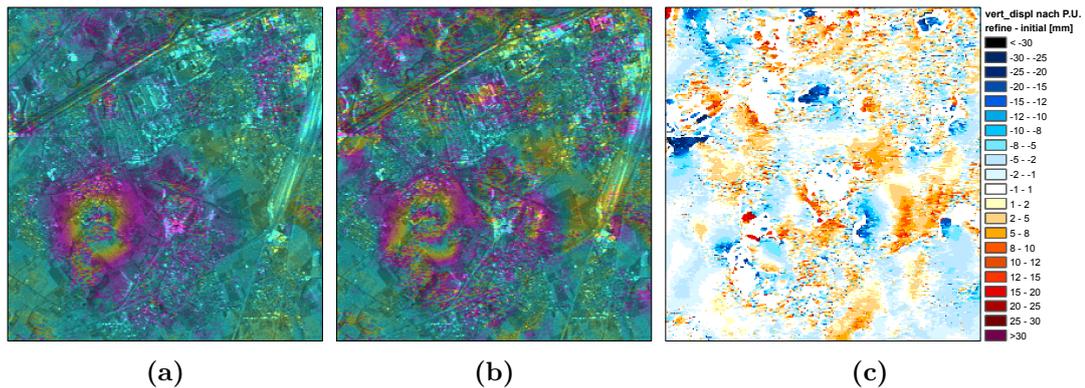
Neben den relativ gleichmäßigen Lage-Offsets, die bei der initialen Geokodierung vor allem durch Orbitfehler verursacht werden, treten zusätzlich lokale Verzerrungen bei der Transformation eines DHM ins RDC-System auf. Lokale Verzerrungen sind auf lokale Höhenfehler eines DHMs bezogen auf die tatsächliche Rückstreuoberfläche einer SAR-Aufnahme zurückzuführen. Bei Verwendung von DGM-Höhen (z.B. in Stadtbereichen) führen zu niedrige Höhenwerte zu fehlerhaften Lageverschiebungen der DHM-Pixel in *far-range* Richtung. Der Unterschied zwischen den zugewiesenen Positionen der DHM-Pixel im RDC-System bei Verwendung unterschiedlicher Höhenmodelle ist exemplarisch in Abb. 4.17 zu sehen. Negative Verschiebungsbeträge entsprechen Verschiebungen in *far-range*-Richtung. Beispielsweise in Waldbereichen liegen die DGM-Höhen niedriger



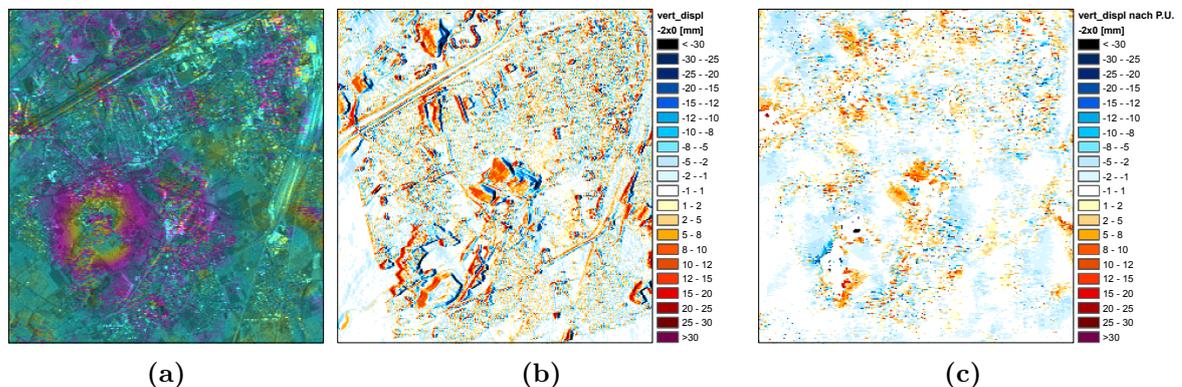
**Abbildung 4.13.:** ALOS PALSAR DInSAR 13.10.2008 - 28.2.2009 ( $B_{\perp}=1397\text{m}$ ,  $\Delta t=138$  Tage); differenzielle Interferogramme bei (a) korrekter Geokodierung und (c) initialer Geokodierung mit Versatz  $0.81 \times -2.21$  Pixel; (b) simulierte und (d) reale vertikale Verschiebungsdifferenzen in mm; Sensorblickrichtung: von links; grüne Profillinie siehe Abb. 4.14.



**Abbildung 4.14.:** Profil mit den simulierten und realen vertikalen Verschiebungsdifferenzen der initialen Geokodierung der ALOS PALSAR Daten entlang der grünen Profillinie in Abb. 4.13 b,d; simulierte Differenzen (rote +), reale Differenzen (blaue Linie). Durch die Filterung der Phasen vor der Phasenabwicklung reduzieren sich die Differenzen zwischen den aufnahmebedingten Phasen und den abgeleiteten vertikalen Verschiebungen.



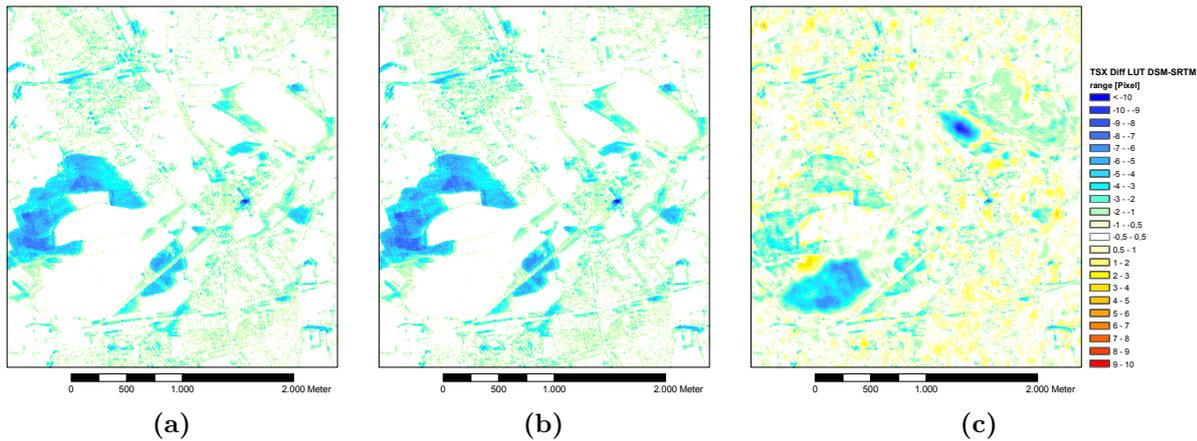
**Abbildung 4.15.:** Envisat ASAR DInSAR 7.12.2006 - 11.1.2007 ( $B_{\perp}=519\text{ m}$ ,  $\Delta t=35\text{ Tage}$ ); differentielle Interferogramme bei (a) korrekter Geokodierung und (b) initialer Geokodierung mit Versatz  $-8.95 \times -1.01\text{ Pixel}$ ; (c) reale Messfehler in mm, ausmaskierte dekorrelierte Bereiche (weiss); Sensorblickrichtung: von rechts.



**Abbildung 4.16.:** Envisat ASAR DInSAR 7.12.2006 - 11.1.2007 ( $B_{\perp}=519\text{ m}$ ,  $\Delta t=35\text{ Tage}$ ); differentielle Interferogramme bei (a) initialer Geokodierung mit simuliertem Versatz  $-2 \times 0\text{ Pixel}$ ; (b) simulierte und (d) reale Messfehler in mm; Sensorblickrichtung: von rechts.

als die DOM-Höhen, so dass negative lokale Verschiebungen der DHM-Pixel im RDC-System die Folge sind. Die SRTM-Höhen sind im Bereich der aufgeschütteten Halden nicht aktuell, so dass ebenfalls Verschiebungen in *far-range*-Richtung auftreten. In einigen bebauten Bereichen liegen dagegen die SRTM-Höhen zu hoch, was auf die niedrige Bodenauflösung zurückgeführt werden kann. Daraus resultieren lokale Verschiebungen in *near-range*-Richtung.

Die Range- und Azimut-Koordinaten für jeden Höhenwert sind in der Zuweisungstabelle LUT komplex gespeichert. Die Verschiebung ergibt sich anhand der Differenzen der LUT-Werte für jedes Pixel. Bei großen Höhenfehlern treten signifikante Lageverschiebungen, d.h. Fehlzugeweisungen ins falsche Range-Segment, auf. Bei TerraSAR-X Daten betragen die Unterschiede zwischen den Range-Koordinaten bezogen auf die Geokodierung mit dem NEXTMap DSM bei 99.99% der Pixel maximal etwa  $\pm 9.5\text{ Pixel}$  (vgl. Tab. 4.8), was einer Höhendifferenz von maximal etwa  $\pm 35\text{ m}$  bezogen auf das NEXTMap DSM entspricht.



**Abbildung 4.17.:** DHM-Lageverschiebungen in Range-Richtung [Pixel] bei der initialen Geokodierung von TerraSAR-X Daten vom DSK-Ruhr29 ins RDC-System mittels dem NEXTMap DTM im Vergleich zum NEXTMap DSM: (a) simulierte Lageverschiebung, (b) Reale LUT-Differenz; bzw. bei Verwendung des SRTM-XC im Vergleich zum NEXTMap DSM: (c) Reale LUT-Differenz.

Die Lageverschiebungen in Range- und Azimut-Richtung sind abhängig vom Blickwinkel, jedoch relativ unabhängig vom Sensor. Bei Umrechnung der in Tab. 4.8 dargestellten Verschiebungen von Pixel- in Meter-Werte unter Berücksichtigung der Pixelgröße und des Multilooking-Faktors (Tab. 4.2) ergeben sich vergleichbare Verschiebungsbeträge. Auf die Darstellung der lokalen Azimutverschiebungen wurde verzichtet, da diese bei allen Sensoren deutlich unter einem Pixel liegen.

Anhand Formel 3.9 können die Verschiebungen näherungsweise simuliert werden. Die Unterschiede zwischen den simulierten und realen Verschiebungen sind im Mittel sehr gering (vgl. Tab. 4.8). Ein Vergleich zwischen einer simulierten und realen LUT-Differenz ist in Abb. 4.17 a-b zu sehen.

Die Fehlzuordnung der DHM-Pixel in falsche Range-Segmente bei der initialen Geokodierung bewirkt Höhendifferenzen, vergleichbar mit denen in Abb. 4.11 bis Abb. 4.16. Die Fehlzuordnung wirkt sich insbesondere auch auf die Rückwärtstransformation der radarinterferometrischen Ergebnisse ins Kartenbezugssystem aus. Es entstehen Verzerrungen in den abgeleiteten Bodenbewegungskarten.

Anhand der LUT-Verschiebungen wurde u.a. auch getestet, wie stark sich Höhendatumsfehler (WGS84, MSL anstatt Bessel) auf die initiale Geokodierung auswirken. Die Höhenunterschiede zwischen den Bessel- und MSL-Höhen liegen im Untersuchungsgebiet zwischen  $-1.875$  m und  $-0.726$  m, die zwischen WGS84 und MSL zwischen 42 m und 45 m. Da das WGS84 Ellipsoid deutlich höher als das Bessel-Ellipsoid und MSL liegt, wird das WGS84-DHM um etwa 12 Pixel relativ gleichmäßig in *near-range* Richtung verschoben (vgl. Tab. 4.8). Solche gleichmäßigen Offsets können problemlos bei der Feinregistrierung der Geokodierung korrigiert werden. Die lokalen Verzerrungen, die aufgrund der Höhenunterschiede zwischen Bessel und MSL entstehen, sind relativ gering und führen zu keinen signifikanten Unterschieden gegenüber der Verwendung des korrekten Höhendatums.

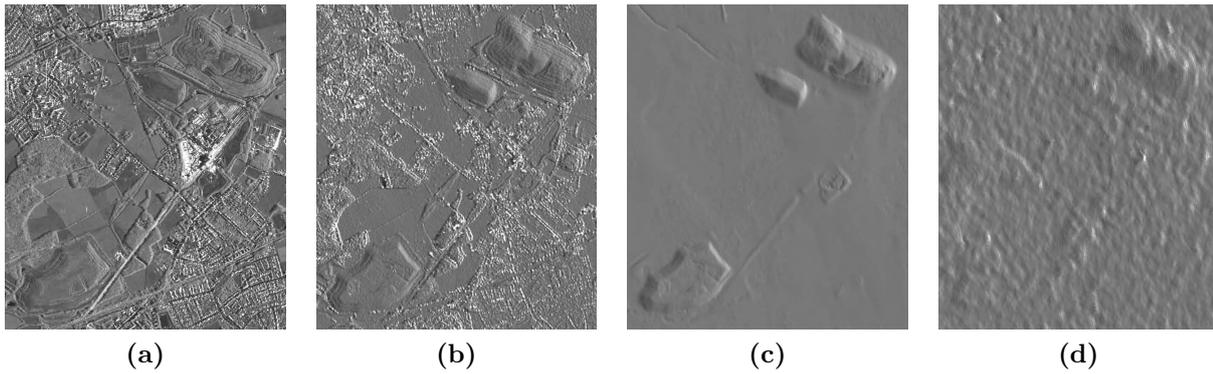
**Tabelle 4.8.:** Höhenmodellverschiebungen in Range-Richtung [Pixel] bei Nutzung eines vom NEXTMap DSM verschiedenen DHMs für die initiale Geokodierung vom DSK-Ruhr29 ins RDC-System; Statistik für 99.99% der Pixel

Differenzen	MIN	MAX	MEAN	±1 Pixel [%]
<b>TerraSAR-X</b>				
DSM - DTM	-9.499	8.024	-0.459	89.58
Simulation DSM - DTM	-9.487	3.610	-0.432	90.30
DSM - SRTM	-8.499	8.492	-0.007	87.64
Simulation DSM - SRTM	-8.496	7.978	-0.010	88.64
DSM - RAG-DGM	-9.499	8.024	-0.418	90.18
Simulation DSM - RAG-DGM	-9.487	3.727	-0.394	90.83
<b>TerraSAR-X Datumsfehler</b>				
DSM - SRTM MSL	-8.499	8.499	0.271	87.14
DSM - SRTM WGS84	0.000	19.500	12.287	—
DSM - DSM WGS84	0.000	12.495	12.328	—
<b>Envisat SAR</b>				
DSM - DTM	-4.491	3.718	-0.2246	95.95
Simulation DSM - DTM	-4.496	1.650	-0.2070	96.26
<b>ALOS PALSAR</b>				
DSM - DTM	-5.500	2.082	-0.263	95.38
Simulation DSM - DTM	-5.481	2.110	-0.250	95.69

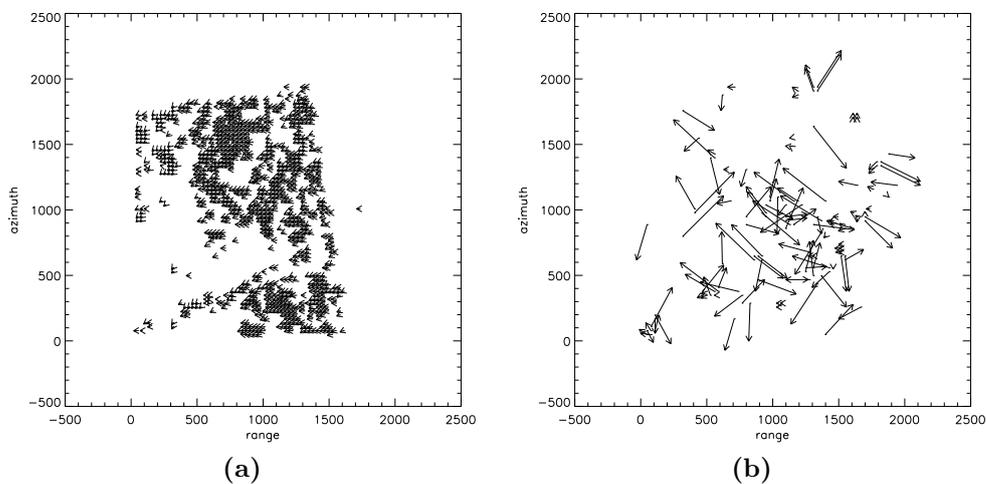
### 4.3.2. Feinregistrierung

Zur Verbesserung der initialen Geokodierung wird eine Feinregistrierung durchgeführt, d.h. ein Matching zwischen dem realen Intensitätsbild und einem anhand des DHM simulierten Intensitätsbildes (vgl. Kapitel 2.3.2). Voraussetzung ist eine genügend hohe Anzahl und gleichmäßige Verteilung von Pixeln mit hohen SNR-Werten, die als Verknüpfungspunkte dienen. Ein aus einem DOM simuliertes Intensitätsbild weist gewöhnlich genügend topographische Merkmale auf (Abb. 4.18 b), um entsprechend viele Verknüpfungspunkte zu erhalten und hohe Genauigkeiten bei der Feinregistrierung zu erreichen. Sowohl bei TerraSAR-X als auch bei den niedriger aufgelösten ASAR und PALSAR Szenen erweist sich das hochauflösende NEXTMap DSM als sehr gut geeignet für die Feinregistrierung. Die korrigierten initialen Lage-Offsets (Abb. 4.19 a) besitzen sehr kleine Standardabweichungen (Tab. 4.7), was zeigt dass die lokalen Verzerrungen minimal sind.

Bei Verwendung eines DGM (Abb. 4.18 c) für die Geokodierung hochauflösender SAR-Daten reduziert sich die Anzahl geeigneter Verknüpfungspunkte deutlich (Abb. 4.19 b). Zusätzlich kommt es zu Fehlern bei der Zuweisung zwischen den Pixeln im realen und simulierten Intensitätsbild. Trotz Ableitung und Anwendung eines Offset-Polynoms bei der Feinregistrierung können initiale Geokodierungsfehler, sowie die durch die Höhenfehler verursachten lokalen Verzerrungen, nicht ausreichend korrigiert werden. Ein zusätzlicher Höhenfehler wird erzeugt, der sich in der topographischen Phasenkorrektur widerspie-



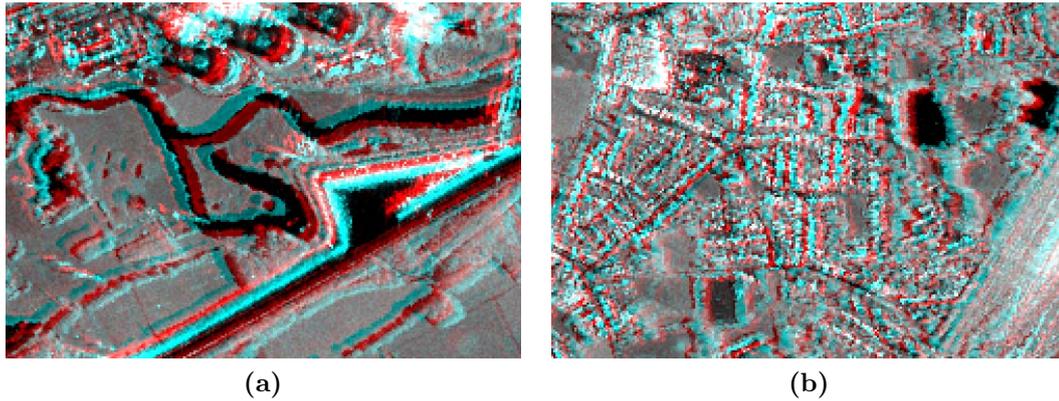
**Abbildung 4.18.:** Ausschnitt mittleres Intensitätsbild TerraSAR-X (a) im Vergleich zu den simulierten Intensitätsbildern der Geokodierung: (b) NEXTMap DSM, (c) NEXTMap DTM, (d) SRTM-XC



**Abbildung 4.19.:** Lage-Offsets (10fach, Pixel) der initialen Geokodierung, die durch die Feinregistrierung ermittelt wurden; Geokodierung mit dem (a) NEXTMap DSM bzw. (b) NEXTMap DTM für den Untersuchungsbereich in den TerraSAR-X Aufnahmen ( $2000 \times 2000$  Pixel)

gelt. Durch Nutzung von Interferogrammen mit kleinen Basislinien sind die Einflüsse auf die Phasen minimierbar. Gravierender sind dagegen die sich ergebenden Geokodierungsfehler bei der Rückwärtstransformation der radarinterferometrischen Ergebnisse ins Kartenbezugssystem. Abb. 4.20 zeigt die durch die Feinregistrierung hervorgerufenen lokalen Verzerrungen bei Nutzung des NEXTMap DTMs am Beispiel des georeferenzierten mittleren TerraSAR-X Intensitätsbildes. Im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes (Abb. 4.20 a) findet eine Verzerrung nach Nordwesten, dagegen im östlichen Bereich nach Südosten statt (Abb. 4.20 b).

Zur Überprüfung der Feinregistrierung können beispielsweise auch topographische Karten oder Corner-Reflektoren genutzt werden. Vergleichbare Verzerrungen treten auch bei der Feinregistrierung im Zusammenhang mit PALSAR Daten sowie bei Verwendung des RAG-DGMs auf. Aufgrund der schlechten Auflösung des SRTM-DHMs weisen die Pixel des simulierten Intensitätsbildes (Abb. 4.18 d) nur geringe SNR-Werte auf, was die Detektion

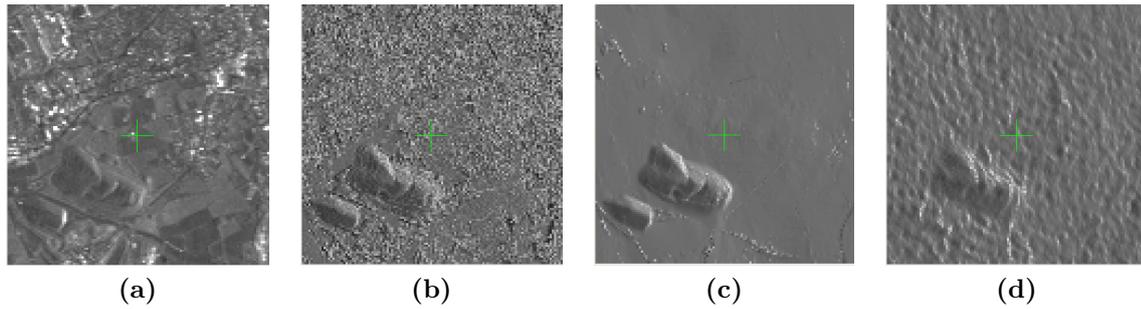


**Abbildung 4.20.:** Auswirkungen von Feinregistrierungsfehlern auf die Geokodierung bei Verwendung des NEXTMap DTM (rot) im Vergleich zur korrekten Geokodierung mit dem NEXTMap DSM (blau). Darstellung der ins DSK-Ruhr29 System transformierten mittleren TerraSAR-X Intensitätsbilder mit Bildverzerrungen nach Nordwesten im westlichen Bildausschnitt (a) und nach Südosten im östlichen Bildausschnitt (b).

geeigneter Verknüpfungspunkte stark reduziert. Die Folge sind wiederum starke lokale Verzerrungen bei der Feinregistrierung bei TerraSAR-X und ALOS PALSAR mit den bereits genannten Auswirkungen.

Bei der DHM Geokodierung mit Envisat ASAR Daten gelingt die Feinregistrierung sehr gut auch mit hochauflösenden aktuellen DGMs wie dem NEXTMap DTM unter der Voraussetzung, dass zumindest geringe Geländevariabilitäten im gesamten Bildbereich auftreten (Abb. 4.21 c). Hochauflösende DHMs ( $\leq 5$  m) sind bei SAR-Daten mit geringerer Auflösung (Envisat ASAR) für die topographische Phasenkorrektur zwar nicht erforderlich, haben jedoch den Vorteil, dass die Geokodierungsgenauigkeit erhöht werden kann und im Bereich der Auflösung des verwendeten DHMs liegt. Hochauflösende DOMs wie das NEXTMap DSM eignen sich, aufgrund der sich durch die Höhenvariabilitäten ergebenden Abbildungseffekte (Layover, Schatten), speziell in städtisch bebauten Bereichen, nur bedingt für die Geokodierung von Envisat Daten (Abb. 4.21 b). Ähnlich Probleme treten auch bei hochauflösenden ALS-DHMs auf. Eine Überprüfung der Genauigkeit der Geokodierung ist in diesen Bereichen kaum möglich. Problematisch sind außerdem mosaikierte DHMs, bei denen ein hochauflösendes DHM wie das NEXTMap DSM/DTM mit z.B. SRTM-Daten kombiniert wird. Dies kann zu signifikanten Verzerrungen bei der Feinregistrierung führen. Das SRTM-DHM (Abb. 4.21 d) eignet sich grundsätzlich gut für die Geokodierung von Envisat-Daten, jedoch mit der Einschränkung, dass maximale Lagegenauigkeiten in der Größenordnung von 20-30 m erreichbar sind und bei zu geringer Aktualität oder Geländevariabilität lokale Verzerrungen auftreten können.

Aufgrund der bei Verwendung der DGMs bzw. des SRTM-DHMs sich ergebenden Verzerrungen bei der Feinregistrierung und der somit unzureichenden Korrektur initialer Geokodierungsfehler wurden zur weiteren Untersuchung topographiebedingter Phasenfehler die Zuweisungstabellen des NEXTMap DSMs aus der Feinregistrierung zur DHM-Geokodierung ins RDC-System genutzt. Somit kann der Einfluss von Geokodierungsfehlern auf die Bodenbewegungsmessung im Weiteren ausgeschlossen werden.



**Abbildung 4.21.:** Ausschnitt aus dem realen Envisat ASAR Intensitätsbild (a) im Vergleich zu den simulierten Intensitätsbildern abgeleitet aus (b) dem NEXTMap DSM, (c) NEXTMap DTM und (d) SRTM-XC DHM.

## 4.4. Einflüsse verschiedener DHM-Qualitätsparameter auf die topographische Phasenkorrektur

Wie in Kapitel 3 beschrieben, wirken sich Höhenfehler in Abhängigkeit vom Sensor unterschiedlich auf die Genauigkeit der Bodenbewegungsmessung aus. Der entscheidende Einflussfaktor bei satellitengetragenen SAR-Sensoren ist allein die durch die Aufnahmegeometrie bedingte senkrechte Basislinie  $B_{\perp}$ . Würden alle SAR-Sensoren vergleichbare kleine räumliche Basislinien im Orbit einhalten, wie z.B. TerraSAR-X, würden die topographiebedingten Messfehler ähnlich klein sein. Der Zusammenhang wird in Formel 4.1 ersichtlich, die sich nach Formel 2.19, 2.21 und 2.30 ergibt:

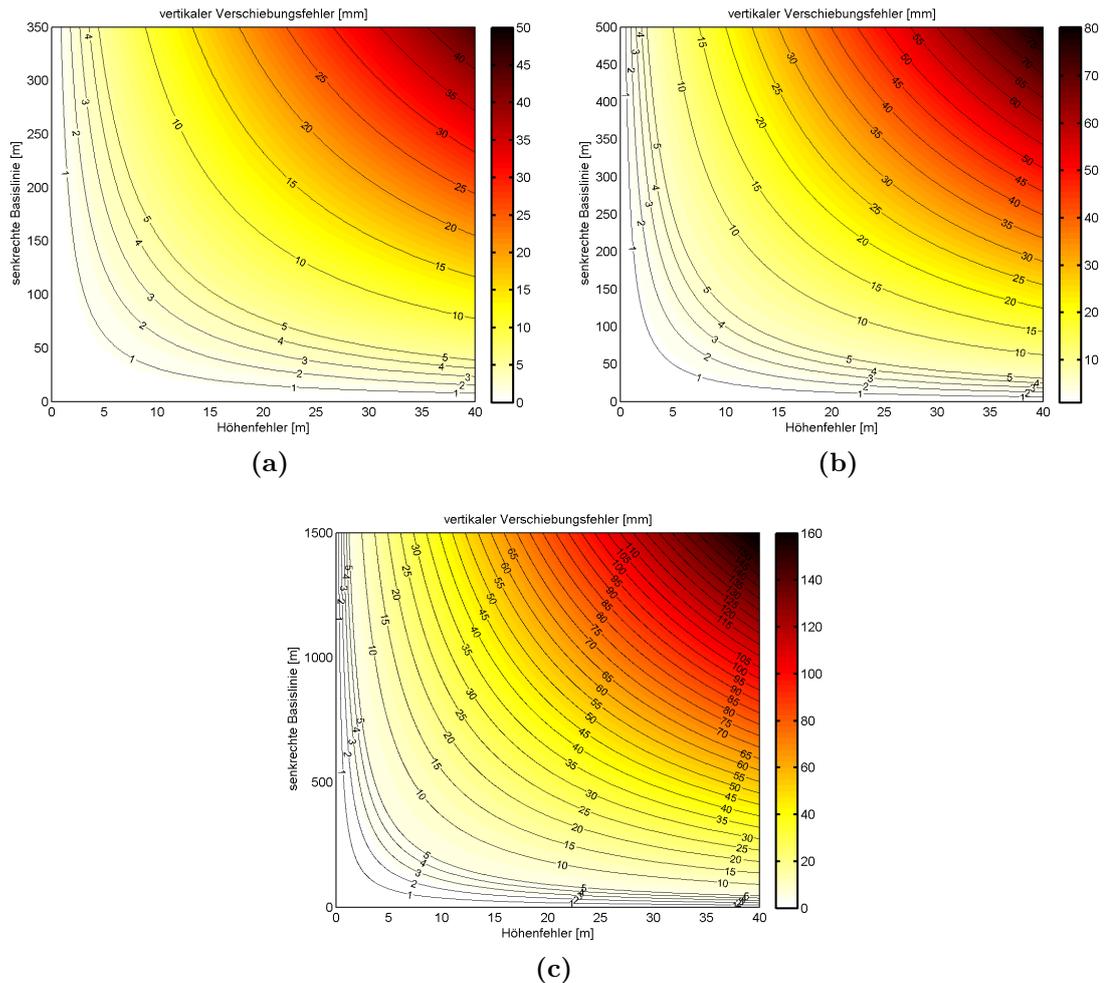
$$\partial\Delta r_z = \frac{B_{\perp} \cdot \partial h \cdot 1000}{R \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta_i} \quad [\text{mm}] \quad (4.1)$$

Beispielsweise beträgt  $\partial\Delta r_z$  für die verwendeten Daten von TerraSAR-X ( $3.2 \cdot 10^{-3} \cdot B_{\perp} \cdot \partial h$ ), bei den ASAR Daten ( $4.0 \cdot 10^{-3} \cdot B_{\perp} \cdot \partial h$ ) und ALOS PALSAR ( $2.7 \cdot 10^{-3} \cdot B_{\perp} \cdot \partial h$ ).

Unter Berücksichtigung der realen maximalen Basislinien von Interferogrammen mit guten Kohärenzen, die zur Ableitung von Bodenbewegungen geeignet sind (Tab. 4.2), können in Abb. 4.22 für verschiedene Sensoren die theoretischen Messfehler für die vertikalen Verschiebungen in Abhängigkeit vom Höhenfehler und der Basislinie abgelesen werden. Messfehler, die größer als  $\pm 1$  Phasenzyklus sind, sollten aufgrund der Mehrdeutigkeitsmessung zwar theoretisch nicht auftreten, sind aber praktisch möglich (vgl. Kapitel 4.3.1.1). Für ALOS wurden die Messfehler nur für maximale Basislinien von 1500 m dargestellt, da bei längeren Basislinien Phasenfehler größer einem Phasenzyklus ( $\hat{=} 151 \text{ mm}$ ) auftreten.

### 4.4.1. Zeitliche Höhenänderungen der Geländeoberfläche

In dicht besiedelten Gebieten treten ständig topographische Veränderungen auf, die sich jedoch meistens auf Objekte an der Erdoberfläche beziehen und durch den Menschen verursacht werden z.B. Bebauung (ausgenommen Kurzzeitereignisse wie Erdbeben). Verände-

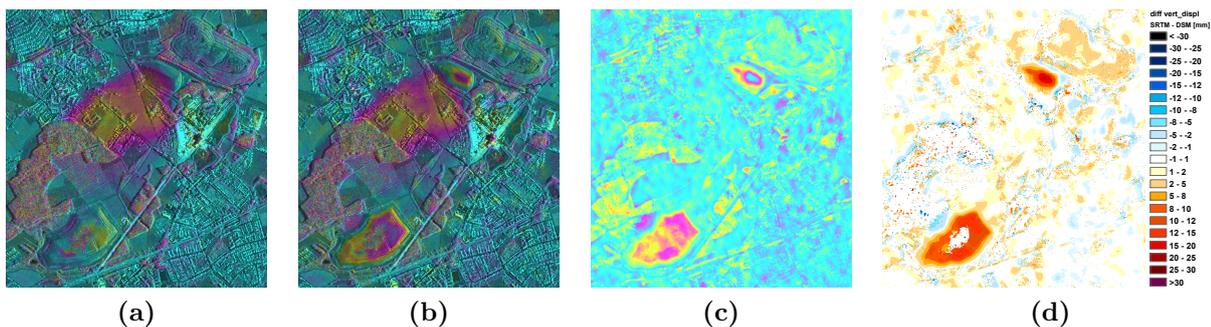


**Abbildung 4.22.:** Messfehler der vertikalen Verschiebungen in Abhängigkeit vom Höhenfehler und der senkrechten Basislinie; (a) TerraSAR-X mit  $B_{\perp} \leq 350$  m, (b) Envisat ASAR mit  $B_{\perp} \leq 500$  m, (c) ALOS PALSAR mit  $B_{\perp} \leq 1500$  m.

rungen der gewachsenen Geländeoberfläche sind im Vergleich dazu seltener und können sowohl durch natürliche als auch anthropogene Prozesse verursacht werden und mit sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten auftreten. Bergbaulich geprägte Gebiete weisen meist sehr schnelle Veränderungen auf. Im untertägigen Steinkohlenbergbau sind Senkungsraten an der Tagesoberfläche von bis zu einem Meter pro Monat keine Ausnahme. Durch den fortschreitenden Abbau verschieben sich räumlich die Senkungsschwerpunkte, so dass zeitlich nichtlineare Bewegungsverläufe auftreten. Da sich die Geländeoberfläche in Bergbaugebieten bis zu mehrere Meter pro Jahr absenken kann (vgl. Abb. 4.2) sowie landschaftlich häufig zusätzlich neu gestaltet wird (z.B. durch Halden oder wie in Tagebaugebieten durch Seen) sind aktuelle DHMs für Radarauswertungen erforderlich. Die Erfassung von Bodenbewegungen durch die radarinterferometrische Auswertung von großen SAR-Datenstapeln (über 5 Jahre) mit nur einem Höhenmodell und Schätzung *eines* Höhenfehlers pro Pixel, wie z.B. bei einer PSI-Analyse mit 80 Envisatszenen ( $\hat{=}$  mindestens 8 Jahre), kann zu topographiebedingten Messfehlern führen.

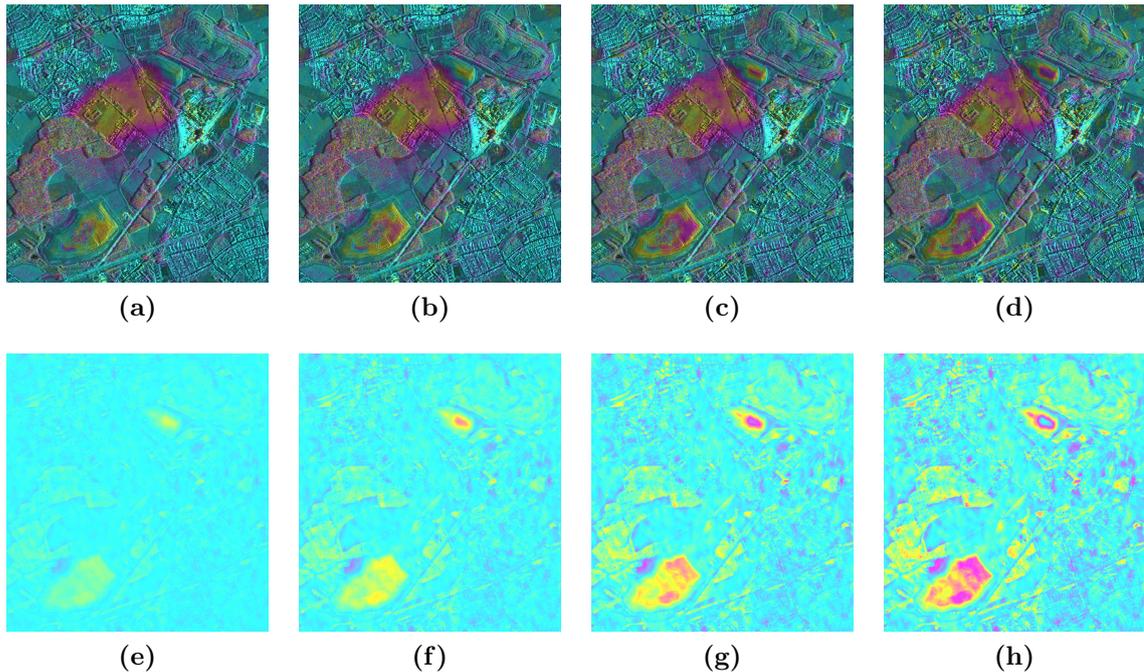
Die größten zeitlich topographischen Veränderungen treten im Testgebiet im Bereich der Halden auf, was im Differenzhöhenmodell des NEXTMap DSM (2006) im Vergleich zum SRTM-DHM (2000) zu sehen ist (vgl. Abb. 4.5b). Der maximale Höhenunterschied beträgt etwa 37 m an der kleineren Halde (Bildmitte, Abb. 4.5b). Im nordöstlichen Stadtbereich müssen vereinzelte größere Gebäude ( $h \approx 15$  m) neu gebaut worden sein (Abb. 4.5 b).

Das TerraSAR-X Beispiel in Abb. 4.23 zeigt sehr anschaulich, welche negativen Auswirkungen die Verwendung des SRTM-DHMs auf die Bodenbewegungsmessung haben kann. Durch Überlagerung der Senkungen mit dem DHM-Fehler kommt es aufgrund der positiven Basislinie ( $B_{\perp} = +197$  m) zu einer Unterschätzung der Bewegungen im Bereich der kleinen Halde von maximal 20 mm (Abb. 4.23 d). Da die Bewegung im Haldenbereich deutlich kleiner als 20 mm ist, ergibt sich eine Hebung. Im Bereich der größeren südlichen Halde zeigt sich nicht nur, dass die SRTM-Daten veraltet sind, sondern auch das NEXT-Map DSM, da die Halde auch zwischen 2006 und 2009 weiterhin aktiv in Schüttung war. Da das Interferogramm Bewegungen im März 2009 zeigt, ist das DSM zu niedrig, weshalb in Abb. 4.23a die Abnahme der Phasendifferenzen als Hebung interpretiert werden müssen. Im SRTM Interferogramm ist der Hebungseffekt verstärkt durch die noch geringen DHM-Höhen. Die Differenzen der topographischen Phasenanteile, die mittels dem NEXTMap DSM und SRTM-DHM simuliert wurden, sind in Abb. 4.23c zu sehen.

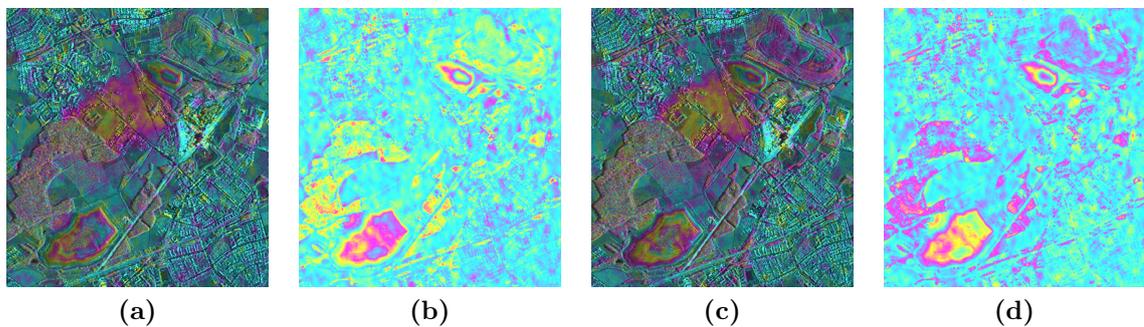


**Abbildung 4.23.:** Auswirkungen von topographischen Phasenkorrekturen mit veralteten SRTM-Höhen am Beispiel des TerraSAR-X Interferogramms 02.03.2009 - 13.03.2009 mit  $B_{\perp} = +197$  m; (a) DInSAR mit NEXTMap DSM, (b) DInSAR mit SRTM-XC, (c) Differenz der topographischen Phasen beider Höhenmodelle (1 Farbzzyklus  $\hat{=}$  1 Phasenzzyklus), (d) Differenz der gemessenen vertikalen Bodenbewegungen in [mm], positive/negative Werte = Unter-/Überschätzung von Senkungen; dekorrelierte Bereiche  $< 0.5$  wurden beim Phase Unwrapping ausmaskiert

Anhand der Senkungen und des SRTM-Höhenfehlers in Abb. 4.23 wurde untersucht, wie stark sich topographiebedingte Phasenfehler in Interferogrammen mit unterschiedlichen Basislinien auswirken (Abb. 4.24 und 4.25). Bei einer Basislinie von 50 m sind kaum Änderungen im Interferogramm sichtbar (Abb. 4.24 a) und würden selbst von erfahrenen Anwendern nur schwierig von anderen Fehlereinflüssen unterschieden werden. Ab einer Basislinie von 100 m (Abb. 4.24 c-d und Abb. 4.25a) werden die Einflüsse im Interferogramm deutlich sichtbar. Aufgrund der räumlichen Korrelation zwischen den den DHM-Höhen und Phasenzyklen, sowie vorhandenes Vorwissen (Hebung der Halde ist 100% ausgeschlossen), ist es möglich die topographiebedingten Fehlereinflüsse richtig einzuschätzen und zu interpretieren. Bei negativen Basislinien sind in Senkungsgebieten topographische



**Abbildung 4.24.:** Auswirkungen von SRTM-Höhenfehlern in einem TerraSAR-X differentiellen Interferogramm bei unterschiedlichen Basislinien: Simulierte differentielle Interferogramme mit (a)  $B_{\perp}=+50\text{ m}$ , (b)  $B_{\perp}=+100\text{ m}$ , (c)  $B_{\perp}=+150\text{ m}$  und (d)  $B_{\perp}=+200\text{ m}$ . Darstellungen (e-h): Differenzen der aus dem DSM und SRTM simulierten topographischen Phasen (1 Farbzklus  $\hat{=}$  1 Phasenzyklus) in Abhängigkeit von den Basislinien entsprechend (a-d).

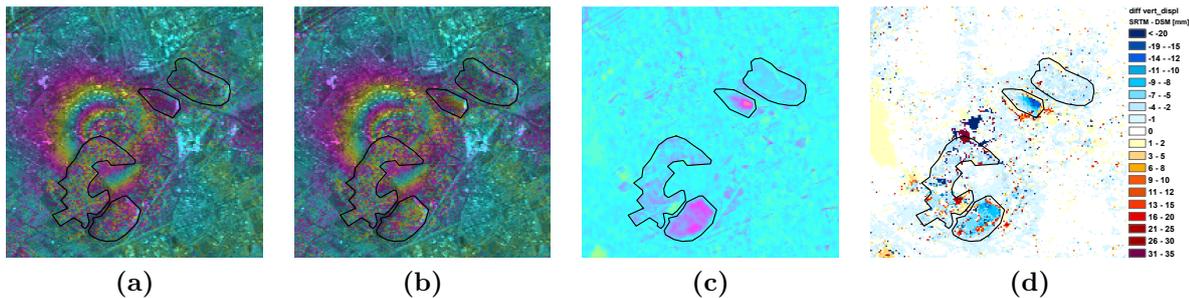


**Abbildung 4.25.:** Entsprechend Abb. 4.24; Darstellung der simulierten TerraSAR-X differentiellen Interferogramme (a,c) und der topographischen Phasendifferenzen DSM - SRTM (b,d) in Abhängigkeit von der Basislinien (a-b)  $B_{\perp}=+250\text{ m}$ , (c-d)  $B_{\perp}=-250\text{ m}$ .

Phasenfehler deutlich schwieriger zu ermitteln, da es zu einer Überschätzung der Senkungen kommt. Bei relativ großen negativen Basislinien ( $\leq -150\text{ m}$ ) sind SRTM-Höhenfehler grundsätzlich gut sichtbar, u.a. auch in städtischen Bereichen wo keine Bewegungen auftreten (vgl. Abb. 4.25 c).

In Envisat ASAR Interferogrammen sind topographische Phasenfehler visuell recht schwierig zu detektieren, zum einen aufgrund der schlechteren Bodenauflösung, aber auch stärkerer Dekorrelationen. Nur bei sehr kleinen Basislinien besteht die Möglichkeit, dass topogra-

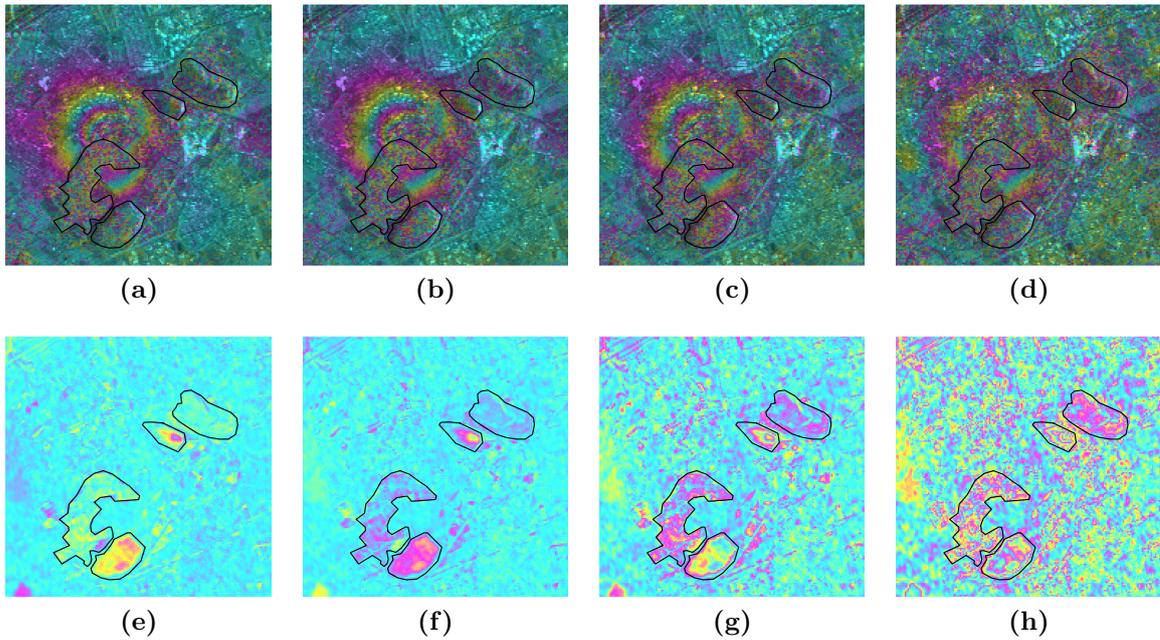
phiebedingte Phasenfehler wie im Beispiel in Abb. 4.26 erkennbar werden. Im Bereich der Halden kommt es zur Überlagerung von Senkungen und Höhenfehlern infolge der veralteten SRTM-Daten (Abb. 4.26 b), was aufgrund der negativen Basislinie zur Überschätzung der Senkungen von bis 29 mm führt (Abb. 4.26 d). Bei Simulationen mit positiven Basislinien werden die Senkungen im Bereich der Halden dagegen unterschätzt (vgl. Beispiel in Abb. 4.27 a). Am westlichen Senkungsrand kommt es im NEXTMap DSM Interferogramm zu einer Unterschätzung der Senkungen (vgl. Abb. 4.26), da an dieser Stelle nur Geländehöhen aus dem NEXTMap DTM (vgl. Abb. 4.5 b) vorliegen und somit das SRTM-Modell an dieser Stelle korrekter ist.



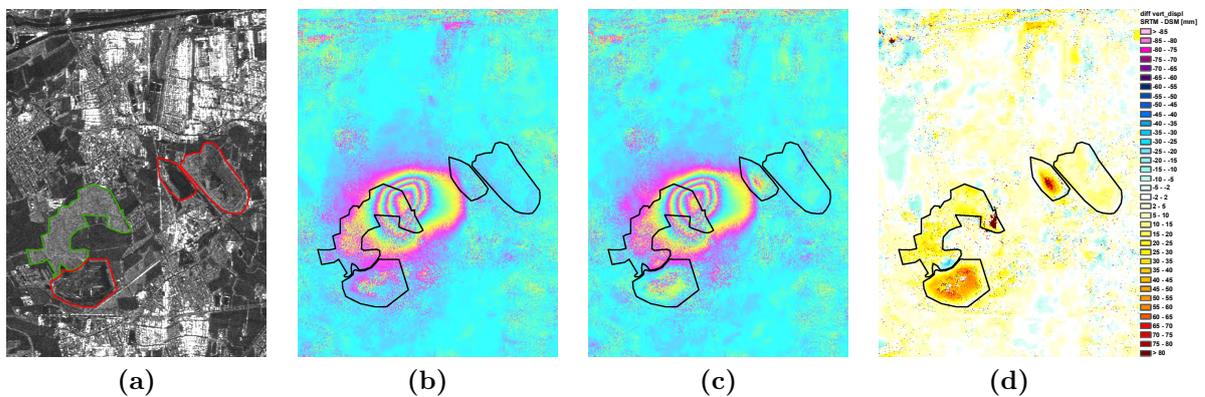
**Abbildung 4.26.:** Auswirkungen von topographischen Phasenkorrekturen mit veralteten SRTM-Höhen am Beispiel des Envisat ASAR Interferogramms 11.01.2007 - 22.03.2007 mit  $B_{\perp} = -111$  m; (a) DInSAR mit NEXTMap DSM, (b) DInSAR mit SRTM-XC, (c) Differenz der topographischen Phasen beider Höhenmodelle (1 Farbzyklus  $\hat{=}$  1 Phasenzyklus), (d) Differenz der gemessenen vertikalen Bodenbewegungen in [mm], positive/negative Werte = Unter-/Überschätzung von Senkungen

Die Vergrößerung der Senkungsmulde nach Westen in Abb. 4.27 a stimmt nicht mit der Realität überein, sondern ergibt sich bei der Simulation mit einer größeren Basislinien allein durch die Annahme, dass das NEXTMap DSM die korrekte Rückstreuoberfläche widerspiegelt. Je größer die Basislinie wird, umso größer sind die Dekorrelationen, insbesondere bei Zunahme der topographiebedingten Phasenfehler (vgl. Abb. 4.27 b-d). Bei Basislinien über 500 m sind die Effekte in ASAR Interferogrammen gravierend. Da externe DHMs nie zu 100% die Höhe der Phasenzentren wiedergeben, können die sehr starken Dekorrelationen in Abb. 4.27 d auch durch das hochauflösende NEXTMap DSM verursacht worden sein. Die Differenzen der simulierten topographischen Phasen zwischen dem NEXTMap DSM und SRTM (Abb. 4.27 e-h) sollen die Auswirkungen höherer Basislinien auf die räumlichen Kohärenzen verdeutlichen. Bei ASAR Interferogrammen vor 2005 zeigt sich sehr deutlich, dass die zu hohe Aktualität der NEXTMap Daten im Bereich der südlichen Halde. Positive Basislinien sowie ein zu hohes DHM führt wie im Beispiel in Abb. 4.31 b-c zu einer Überschätzung der Senkungen, wobei die SRTM-Daten wiederum zu niedrige Höhen aufweisen und zu Hebungen im Bereich der Halde führen (Abb. 4.31 d).

Relative kleine Höhenfehler bewirken bei PALSAR-Auswertungen hohe Messfehler, aufgrund der meist sehr großen Basislinien. Aufgrund der großen Wellenlänge werden Höhenfehler in ALOS PALSAR Interferogrammen jedoch kaum sichtbar, auch nicht wenn diese relativ groß sind. Das Beispiel in Abb. 4.28 zeigt, dass aufgrund der Höhenunterschiede von durchschnittlich +1.2 m zwischen dem NEXTMap DSM und SRTM DHM Differenzen von etwa 4 mm bei der Erfassung der vertikalen Bodenbewegungen resultieren.



**Abbildung 4.27.:** Auswirkungen von SRTM-Höhenfehlern in einem Envisat ASAR differentiellen Interferogramm bei unterschiedlichen Basislinien: Simulierte differentielle Interferogramme mit (a)  $B_{\perp} = +200$  m, (b)  $B_{\perp} = -200$  m, (c)  $B_{\perp} = -400$  m und (d)  $B_{\perp} = -700$  m. Darstellungen (e-h): Differenzen der aus dem DSM und SRTM simulierten topographischen Phasen (1 Farbzyklus  $\hat{=}$  1 Phasenzyklus) in Abhängigkeit von den Basislinien entsprechend (a-d).



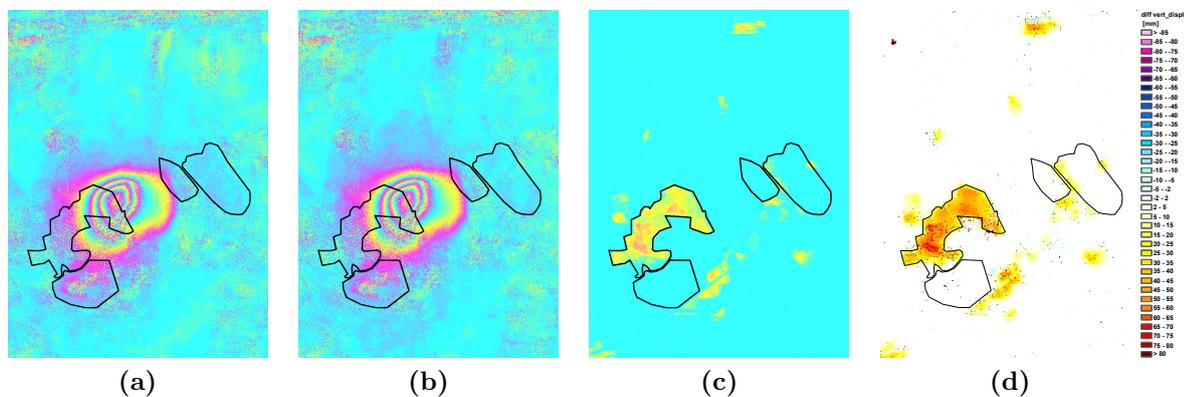
**Abbildung 4.28.:** Auswirkungen von topographischen Phasenkorrekturen mit veralteten SRTM-Höhen am Beispiel des ALOS PALSAR Interferogramms 28.11.2008 - 28.02.2009 mit  $B_{\perp} = +1020$  m; (a) Intensitätsbild mit Halden (rot) und Wald (grün), (b) DInSAR mit NEXTMap DSM, (c) DInSAR mit SRTM-XC, (d) Differenz der gemessenen vertikalen Bodenbewegungen in [mm], positive/negative Werte = Unter-/Überschätzung von Senkungen

Die Höhenfehler in den SRTM-Daten im Bereich der Halden führen innerhalb des Betrachtungszeitraums von 3 Monaten zur Unterschätzung von Senkungen (kleine Halde,  $\Delta r_z = -15$  mm,  $\partial \Delta r_z = +90$  mm im Bereich des maximalen Höhenfehlers) und Setzungen (südwestliche Halde,  $\Delta r_z = -100$  mm,  $\partial \Delta r_z = +50$  mm), so dass teilweise Hebungen gemessen werden (vgl. Abb. 4.28).

### 4.4.2. Vegetationsbedingte Höhenfehler

Die Rückstreuoberfläche bei SAR-Aufnahmen beschreibt die Höhe der Phasenzentren, die sich aufgrund der unterschiedlichen Eindringtiefe hauptsächlich in Abhängigkeit vom verwendeten Frequenzband ergibt. Speziell in Vegetationsbereichen führen jahreszeitliche Änderungen zusätzlich zu Höhenschwankungen der Phasenzentren, weshalb es meist zu Dekorrelationen in Interferogrammen insbesondere bei Sensoren mit hohen Frequenzen kommt. Da Radarstrahlen mit niedrigeren Frequenzen deutlich tiefer in Vegetation eindringen können und unempfindlicher gegenüber kleineren Veränderungen sind, bleibt auch die Höhe der Phasenzentren relativ stabil. Externe Höhenmodelle, unabhängig davon ob sie die Gelände- und Oberflächenhöhe repräsentieren, sind grundsätzlich ungeeignet für die topographische Phasenkorrektur und führen zu Phasenfehlern insbesondere bei Vegetation. Ein aus einem Interferogramm abgeleitetes Höhenmodell repräsentiert prinzipiell am besten die Rückstreuoberfläche, besitzt aber auch in Vegetationsbereichen nur eine eingeschränkte zeitliche Gültigkeit.

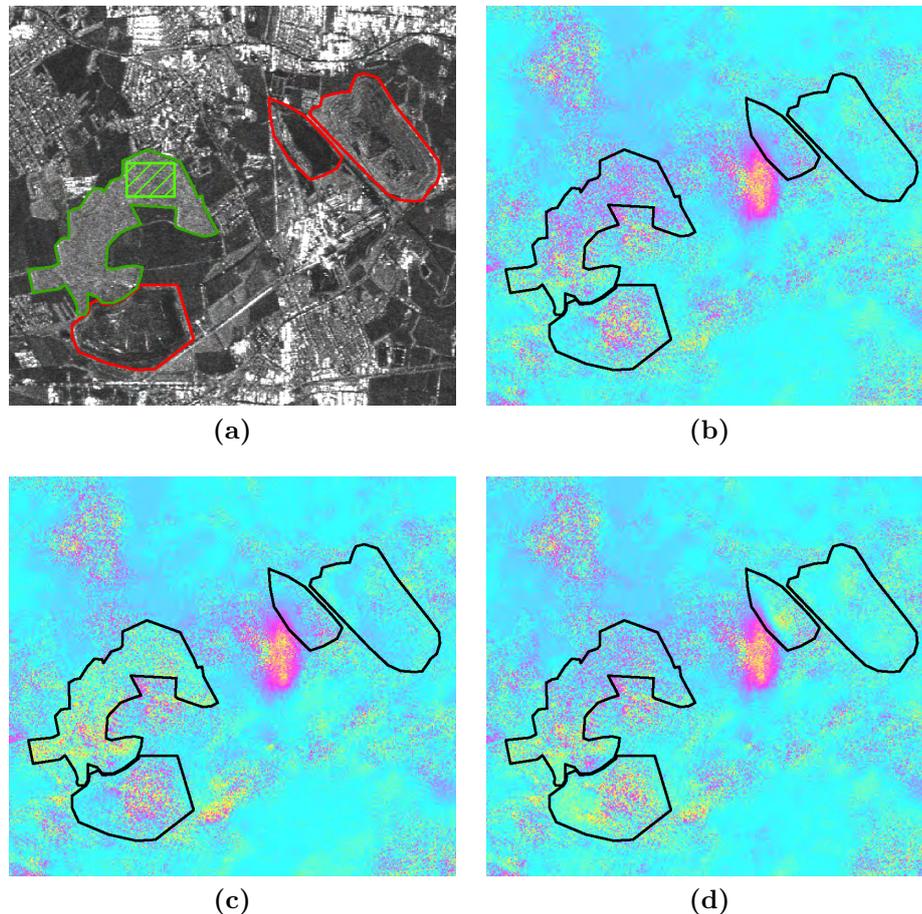
Bei TerraSAR-X, wie auch anderen X-Band Repeat-Pass-Interferogrammen, kommt es bei Wäldern grundsätzlich zu Dekorrelationen, wie im Beispiel in Abb. 4.23 zu sehen ist. Somit sind Bodenbewegungen mit dem X-Band in diesen Bereichen nicht erfassbar, höchstens an vereinzelt Rückstreuern mittels der PSI-Methode. ALOS PALSAR Interferogramme weisen dagegen meist auch hohe Kohärenzen in Waldgebieten auf, auch in Sommer-Interferogrammen. Vergleicht man die Interferogramme in Abb. 4.28 b-c mit dem in Abb. 4.29 a im südwestlichen Bereich des markierten Waldgebietes, sieht man recht deutlich eine Veränderung der Phasen.



**Abbildung 4.29.:** Vegetationsbedingte Höhenfehler am Beispiel des ALOS PALSAR Interferogramms 28.11.2008 - 28.02.2009 mit  $B_{\perp} = +1020\text{ m}$ ; (a) DInSAR mit NEXTMap DTM, (b) DInSAR mit NEXTMap DSM und DTM-Wald-Höhen, (c) Topographische Phasendifferenzen im Wald zwischen dem NEXTMap DSM und DTM (1 Farbzzyklus  $\hat{=}$  1 Phasenzzyklus), (d) Differenz der gemessenen vertikalen Bodenbewegungen in [mm], positive/negative Werte = Unter-/Überschätzung von Senkungen

Bei Nutzung des NEXTMap DSM für die topographische Phasenkorrektur kommt es zu einer sichtbaren Überschätzung der Senkungen im Waldbereich, da die Höhen zu stark korrigiert wurden. Dies führt bei einer positiven Basislinie zu einer Zunahme der Phasendifferenz (vgl. Tab. 4.5). Beim NEXTMap DTM Interferogramm (Abb. 4.29 a) ist eine

Verkleinerung der Senkungsmulde nach Südwesten erkennbar, was den Schluss zulässt, dass die Senkungen unterschätzt werden. Ursache dafür sind die Höhendifferenzen zwischen der tatsächlichen Rückstreuoberfläche und der Geländehöhe. Das Interferogramm-Beispiel in Abb. 4.30 veranschaulicht sehr gut die Auswirkungen von Höhenfehlern im Wald zu einem Zeitpunkt, wo keine Bewegungen in diesem Bereich stattgefunden haben.

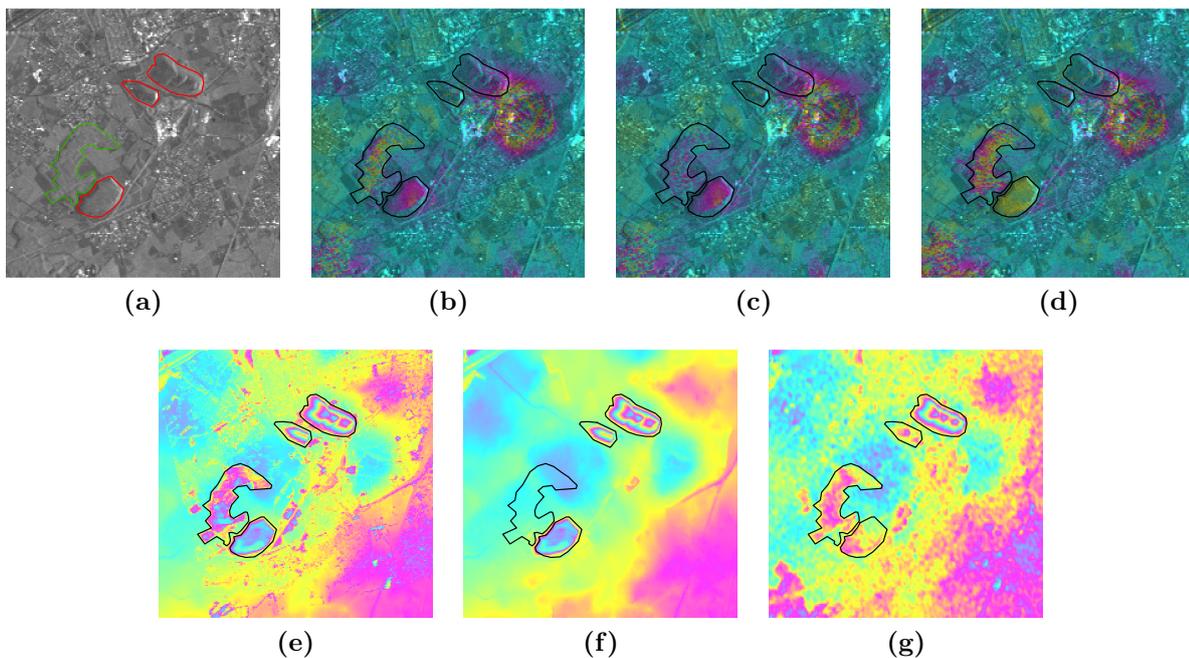


**Abbildung 4.30.:** Vegetationsbedingte Höhenfehler am Beispiel des ALOS PALSAR Interferogramms 28.10.2007 - 28.01.2008 mit  $B_{\perp} = +740$  m; (a) Intensitätsbild mit Halden (rot), Wald (grün) und einem Detailbereich (grün schraffiert), (b) DInSAR mit NEXTMap DSM, (c) DInSAR mit NEXTMap DTM, (d) DInSAR mit SRTM-XC

Die Korrektur mittels SRTM-Höhen zeigt in beiden Beispiel-Interferogrammen (Abb. 4.28c und 4.30 d), dass die Phasenfehler etwas kleiner als beim NEXTMap DSM sind. Die SRTM-Höhen liegen in diesem Bereich meist 5-10 m niedriger als das NEXTMap DSM. Anhand der Phasendifferenzen im NEXTMap DSM und DTM Interferogramm wurde die mittlere Höhe der tatsächlichen Rückstreuoberfläche in dem in Abb. 4.30a schraffiert dargestellten Bereich ermittelt. Die tatsächliche Rückstreuoberfläche weicht im Mittel um 14.1 m von der DSM-Höhe und 9.1 m von der SRTM-Höhe ab, bzw. liegt ca. 5.3 m über der Geländehöhe im DTM. Die mittlere absolute Höhe des betrachteten Ausschnittes

beträgt im NEXTMap DSM 71.3 m, im DTM 51.9 m und SRTM-DHM 66.4 m. Damit zeigt sich, dass auch die SRTM-Höhen ungeeignet für die topographische Korrektur in Vegetationsbereichen sind. Die geringsten topographiebedingten Phasenfehler weisen die mit dem NEXTMap DTM korrigierten Interferogramme auf. Da jedoch in städtischen Bereichen mit Bebauung nur DOMs für die Höhenkorrektur geeignet sind, wurden beim NEXTMap DSM mittels des Wald-Layers der TK25 die DSM-Höhen in Vegetationsbereichen mit den NEXTMap DTM-Höhen ersetzt. Das resultierende Interferogramm ist in Abb. 4.29 b zu sehen. Die korrigierten Phasendifferenzen (Abb. 4.29 c) führten zu einer Verbesserung der abgeleiteten Bodenbewegungen von z.B. etwa 38 mm in dem Wald-Ausschnitt (Abb. 4.30 a). Auch bei geringeren Waldhöhen oder auch bei landwirtschaftlichen Flächen, bei denen die Eindringtiefe aufgrund der Volumenabnahme steigt, eignet sich ein DTM am besten für die topographische Phasenkorrektur bei ALOS PALSAR Interferogrammen.

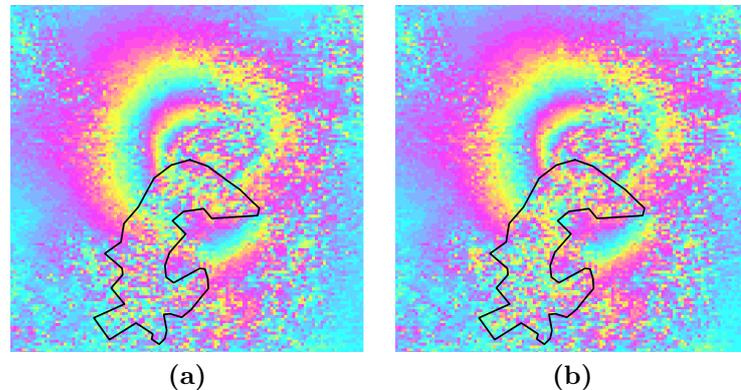
Im Gegensatz zum L-Band ist die Eindringtiefe bei Envisat Aufnahmen geringer. Jedoch zeigen die Beispiele in Abb. 4.31 und 4.32, dass deutlich bessere Interferogramm-Ergebnisse mit höheren Kohärenzen im Wald bei Verwendung des NEXTMap DTM im Vergleich zum DSM erzielbar sind.



**Abbildung 4.31.:** Auswirkungen von Höhenfehlern am Beispiel des Envisat ASAR Interferogramms 18.12.03-22.01.04 mit  $B_{\perp} = +288$  m; (a) Intensitätsbild mit Halden und Wald; Differenzielle Interferogramme erstellt mit (b) dem NEXTMap DSM, (c) dem NEXTMap DTM und (d) dem SRTM-XC DHM; Simulierte topographische Phasen (e) NEXTMap DSM, (f) NEXTMap DTM, (g) SRTM-XC.

Bei Verwendung des NEXTMap DSM und SRTM-DHM treten große topographiebedingte Phasendifferenzen auf, die zu Dekorrelationen führen (Abb. 4.31 c-d). Die simulierten topographischen Phasen in Abb. 4.31 e-g sollen verdeutlichen, wie groß die Auswirkungen der unterschiedlichen Höhenmodelle auf die Phasenkorrektur bei relativ kleinen Basislinien

sind. Die Bestimmung der tatsächlichen Höhe der Rückstreuoberfläche war anhand der Envisat Daten nicht möglich, aufgrund zu starker Dekorrelationen bei Verwendung der DGMs und der ungenauen Kenntnis bzgl. möglicher Bodenbewegungen.



**Abbildung 4.32.:** Bei Verwendung (a) des NEXTMap DTM zur topographischen Korrektur weisen deformationsbedingte Phasendifferenzen höhere Kohärenzen in Waldgebieten auf (mit Erhalt der Phasenmuster) im Vergleich zum (b) NEXTMap DSM Ergebnis.

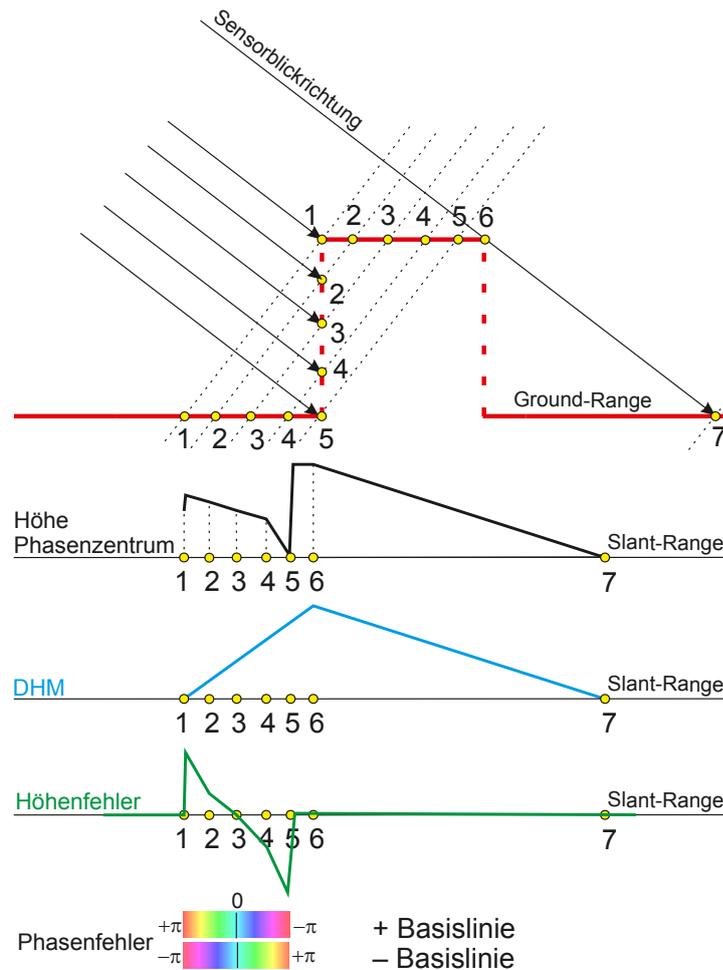
#### 4.4.3. Auswirkungen von Höhenfehlern in bebauten Gebieten

In städtischen Bereichen, insbesondere bei dichter und hoher Bebauung, können verstärkt topographiebedingte Phasenfehler auftreten, auch bei Verwendung von Oberflächenmodellen. Diese sind zum einen auf die geometrischen SAR-Effekte Layover, Schatten sowie Mehrfachreflexionen oder auch Einfachreflexionen an Gebäudedächern zurückzuführen. Zum anderen zeigen sich in Stadtbereichen meist größere Höhenmodellfehler infolge der begrenzten Bodenauflösung sowie Lage- und Höhengenaugigkeit und der Unvollständigkeit eines 2.5D-Modells bzgl. der Höheninformation an senkrechten Flächen.

Da die topographiebedingte Phase abhängig ist von der Höhe aller Objekte innerhalb einer Auflösungszelle, kommt es insbesondere bei Gebäuden zu charakteristischen Phasenprofilen, die abhängig sind von der Gebäudegeometrie (z.B. Dachform, Gebäudehöhe) sowie der Beleuchtungsrichtung. Details dazu siehe z.B. Thiele et al. (2010).

Anhand der Skizze in Abb. 4.33 werden die Auswirkungen bei einer einfachen Gebäudegeometrie kurz erläutert.

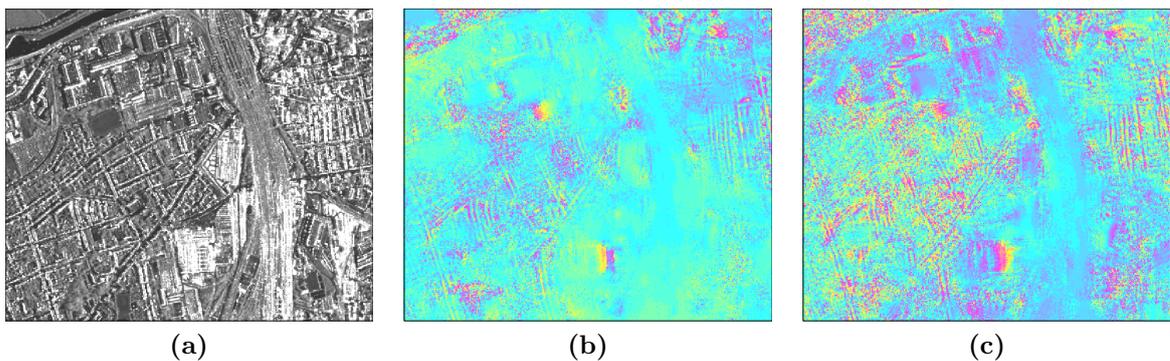
Durch die Überlagerung der Signale zwischen der Position 1-5 kommt es zu hohen Signalintensitäten, deren Maximum an Position 5, dem so genannten (*Corner*) auftritt. Für jede Position ergibt sich im Layover-Bereich die Höhe der Phasenzentren in Abhängigkeit von der Dominanz der einzelnen Streuer innerhalb der jeweiligen Slant-Range Distanz. Ist die Rückstreuung der Signale am Boden sowie an der Hauswand ähnlich, tritt der so genannte „front-porch“-Effekt auf (Bickel et al., 1997), der zu einer Abnahme der Höhe der Phasenzentren mit größerer Entfernung vom Sensor zum Corner führt. Bei der Darstellung der Höhe der Phasenzentren wurde außerdem angenommen, dass auch die



**Abbildung 4.33.:** Auswirkungen von Layover-Effekten auf die Höhe der Phasenzentren sowie die Höhenfehler, die sich nach der DHM-Korrektur ergeben und Phasenfehler in den differentiellen Interferogrammen verursachen. In Abhängigkeit von der Richtung der Basislinie kommt es zu einer Zu- bzw. Abnahme der Phasendifferenzen in Layover-Bereichen in Richtung Sensor.

Dachpunkte das Signal mit beeinflussen. Da die Gebäudelänge relativ kurz ist, ergeben sich nur für den Bereich zwischen Position 5 und 6 homogene Phasen im Slant-Range Bild, die die tatsächliche Gebäudehöhe wiedergeben. Der Bereich zwischen Position 6 und 7 liegt im Schatten. Da Layover- und Schatten-Bereiche bei der Geokodierung der DHM-Höhen gewöhnlich ausmaskiert werden und zwischen benachbarten DHM-Werten meist interpoliert wird, kommt es zu Fehlern bei der topographischen Phasenkorrektur, die sich im differentiellen Interferogramm als Phasenrampen im Vordergrund des Gebäudes widerspiegeln. Bei Interferogrammen mit positiven Basislinien kommt es zur Abnahme der Phasendifferenzen, bei negativen zur Zunahme. Die Anzahl der Phasenzyklen ist abhängig von der Objektgeometrie, speziell der Gebäudehöhe (Thiele et al., 2009), dem Blickwinkel, d.h. große Blickwinkel führen zu großen Phasenanstiegen (Thiele et al., 2007), sowie der Basislinienlänge. Werden Layover-Bereiche nicht ausmaskiert, kann dies zu zusätzlichen Phasenfehlern führen, aufgrund von Fehlzuzuweisungen der Höhenwerte ins korrekte Range-Segment.

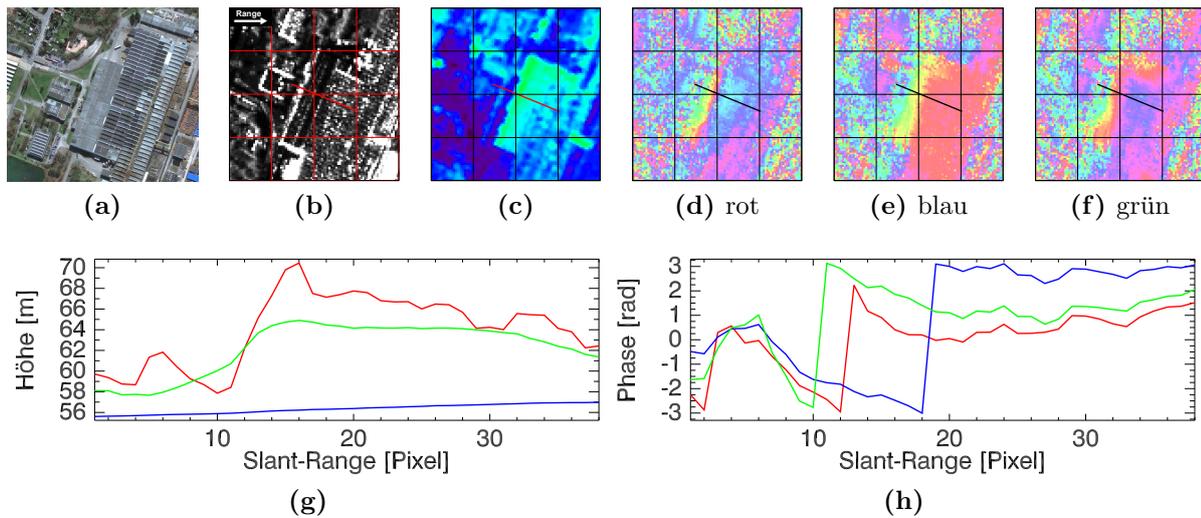
Layover-bedingte topographische Phasenfehler treten hauptsächlich bei SAR-Sensoren mit höherer Bodenaufösung auf und werden speziell bei kleinen Wellenlängen und steilen Blickwinkeln in Abhängigkeit von der Basislinie schneller sichtbar (vgl. Formel 2.19). Die Effekte werden insbesondere bei parallel zur Flugrichtung in gewissen Abständen verlaufenden Gebäudereihen sichtbar. Bei sehr enger Bebauung kommt es zur starken Überlagerung der Effekte einzelner Gebäude und infolge dessen zu nur schwer differenzierbaren Phasenfehlern. Räumliche Dekorrelationen sind die Folge. Abb. 4.34 verdeutlicht am Beispiel von TerraSAR-X Interferogrammen mit unterschiedlichen Basislinien die Effekte für einen städtischen Bereich mit durchschnittlichen Gebäude-Höhen von 10-15 m. Gebäudebedingte Phasenfehler werden in TerraSAR-X Interferogrammen bereits ab Basislinien von 50 m deutlich sichtbar, unabhängig vom verwendeten Höhenmodell (ausgenommen direkt aus den InSAR-Daten abgeleitete DHMs). Die sich ergebenden Fehler bei der Deformationsmessung sind relativ klein, können jedoch bei objektspezifischen Untersuchungen zu starken Fehlinterpretationen führen. Speziell bei PSI-Analysen können Fehler bei der Schätzung der Höhenfehler und Bewegungen in Layover-Bereichen auftreten, wenn die Anzahl der dominanten Rückstreuer  $\geq 2$  pro Auflösungszelle ist (Adam et al., 2005).



**Abbildung 4.34.:** Auswirkungen von Layover auf die differentiellen Phasen in TerraSAR-X Interferogrammen deren Topographie mit dem NEXTMap DSM korrigiert wurde. (a) Mittlere Intensität; Diff. Interferogramm (b) 2.3.2009 - 24.3.2009 mit  $B_{\perp} = +211$  m, (c) 15.12.2008 - 2.3.2009 mit  $B_{\perp} = -250$  m. Sensorblickrichtung: von rechts

Die Verwendung unterschiedlicher DHMs zur topographischen Phasenkorrektur hat Auswirkungen auf den Phasenanstieg im Layover-Bereich, und führt meistens zu relativ homogenen Offsets bei Dachflächen, in Abhängigkeit von u.a. der Dachgeometrie. Am Beispiel eines in Azimut ausgerichteten langen Gebäudes mit einem (flachen) Satteldach in Abb. 4.35 lassen sich die Effekte im Layover-Bereich (Pixel 5-13) sowie im Dachbereich (Pixel 14 bis etwa 27) gut beschreiben. Die Höhenwerte entlang des Profils sind in Abb. 4.35 g dargestellt, die Phasen der differentiellen Interferogramme in Abb. 4.35 h. Die reale Gebäudehöhe und -lage ist unbekannt.

Die Dachfläche beginnt vermutlich ab Pixel 14-16 im Profil. Die vordere Layover-Linie weist sehr hohe Intensitäten auf (Abb. 4.35 b, Quadrant [2.2]-[2.3]), während die Corner-Linie (Gebäudefußpunkt) deutlich schwächer ist (Abb. 4.35 b, Quadrant [3.2]-[2.3]) ist. Das NEXTMap DSM weist im Bereich der ersten Layover-Linie etwas größere Höhenwerte



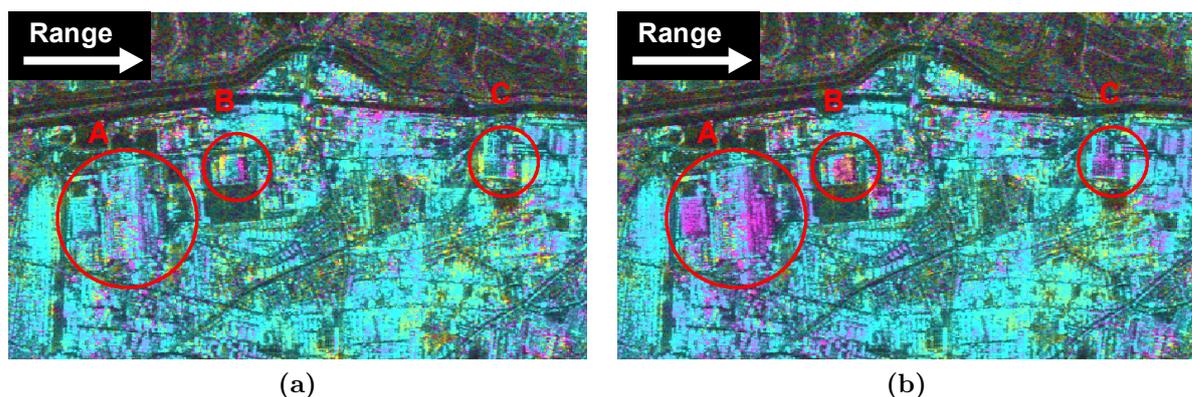
**Abbildung 4.35.:** Auswirkungen von Layover bei Verwendung unterschiedlicher Höhenmodelle für die topographische Phasenkorrektur am Beispiel vom TerraSAR-X Interferogramm 6.4.2008 - 2.3.2009 mit  $B_{\perp} = -335$  m; (a) Google Earth Bild, (b) Mittlere Intensität, (c) NEXTRMap DSM, (d) DInSAR mit NEXTRMap DSM, (e) DInSAR mit NEXTRMap DTM, (f) DInSAR mit SRTM-XC; (g) Höhen [m] und (h) Differentielle Phasen [rad] entlang der in (b-f) eingezeichneten Profillinie für unterschiedliche Höhenmodelle NEXTRMap DSM (rot), NEXTRMap DTM (blau), SRTM-XC (grün); Beleuchtungsrichtung von links.

auf (Abb. 4.35 c+g (rot)), was vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass das Höhenmodell aus InSAR-Daten abgeleitet wurde. Der Höhenanstieg im DSM führt zu einer Zunahme der differentiellen Phasen in Richtung Sensor (Abb. 4.35 h (rot)). Da die Höhenwerte der verwendeten DHMs bis Pixel 12 relativ ähnlich sind, treten in den mit unterschiedlichen DHMs berechneten Interferogrammen vergleichbare Phasen auf. Der Phasenanstieg ist charakteristisch für Objekte mit relativ flachem Satteldach (Thiele et al., 2010). Zwischen Pixel 12 (Bildmitte) und 16 im Profil findet mit dem DSM eine stärkere Höhenkorrektur statt, die zu einem starken Phasenanstieg in Richtung Sensor führt. Im Dachbereich findet eine relativ homogene Höhenkorrektur statt. Im mittleren Dachbereich deuten die Phasenwerte (etwa Null) auf eine gute Höhenkorrektur hin. Im östlich anschließenden Gebäudekomplex mit sehr komplexer Dachstruktur ist das DSM zu niedrig, so dass es zu einer Zunahme der differentiellen Phasen vergleichbar mit einer Senkung kommt. Bei der Korrektur mit dem NEXTRMap DTM (Abb. 4.35 e) ergibt sich dagegen im Dachbereich ein positiver Phasenoffset von etwa einem halben Phasenzyklus ( $\hat{=}$  10 mm vertikale Verschiebung). Solche topographiebedingten Höhenoffsets bei Dachflächen sind typisch bei Nutzung von DGMs und können bei Basislinien ab etwa 50 m in TerraSAR-X Interferogrammen meist gut identifiziert werden (vgl. Abb. 4.8). Bei Überlagerung von Höhenfehlern und Bewegungen kann es bei positiver Basislinie, wie im Beispiel in Abb. 5.7, zu Unterschätzungen der quasi unbekanntenen Senkungen kommen.

Bei Verwendung des SRTM-Modells zur Höhenkorrektur zeigt sich am Beispiel in Abb. 4.35 f welche Auswirkungen die geringe Bodenauflösung und Höhengenaugigkeit hat. Im mittleren Dachbereich ist das DHM zu niedrig und führt zu einem positiven Offset der

Phasendifferenzen. Wie auch beim NEXTMap DSM sind die verwendeten Höhenwerte für das dahinterliegende Gebäude ebenfalls zu niedrig. Längs der Gebäudeachse wird außerdem deutlich, dass auch am nördlichen Giebel das DHM stark nach unten geglättet ist und es zu einem positiven Anstieg der Phasenfehler führt.

In Envisat ASAR Interferogrammen sind Layover-bedingte Phasendifferenzen aufgrund der geringen Bodenauflösung nicht zu beobachten. Größere Höhenfehler führen schnell zu Dekorrelationen, wie bereits in dem vorherigen Kapitel gezeigt werden konnte. Da ALOS Interferogramme auch bei großen Basislinien sehr gute Kohärenzen aufweisen können, speziell im Stadtbereich, sind Layover-bedingte differentielle Phasen zu beobachten (Abb. 4.36). Aufgrund der Bodenauflösung des PALSAR-Sensors von etwa  $15\text{ m} \times 5\text{ m}$  werden diese jedoch nur bei höheren Gebäuden und Bereichen mit weniger dichter Bebauung, in denen geringere Signalüberlagerungen, stattfinden deutlich sichtbar. Bei negativen Basislinien (Abb. 4.36 a, Bereich B-C) nehmen die Phasendifferenzen in Richtung Sensor im Layover-Bereich zu. An der gegenüberliegenden Gebäudeseite treten positive Phasenoffsets im Bereich B-C auf, da die Höhen des NEXTMap DSM an dieser Stelle der Geländeoberfläche entsprechen. Ursache dafür könnten Schattenbereiche in den NEXTMap InSAR Daten gewesen sein, die zu fehlerhaft abgeleiteten DSM-Höhen führten. Die Höhe vom Gebäude A beträgt etwa 15 m, vom Gebäude B etwa 18 m und vom Gebäude C 10 m (Abb. 4.36).



**Abbildung 4.36.:** Auswirkungen von Layover und DGM-bedingten Höhenfehlern auf das ALOS PALSAR Interferogramm (Track 645) 12.06.2007 - 30.01.2009 mit  $B_{\perp} = -1950\text{ m}$ ; DInSAR mit (a) NEXTMap DSM, (b) NEXTMap DTM; Bereich B-C: Gebäude mit Layover- (links) und DHM-bedingten Phasenfehlern (rechts); Bereich A-C: Deutliche Zunahme der Phasendifferenzen bei Nutzung des DTM.

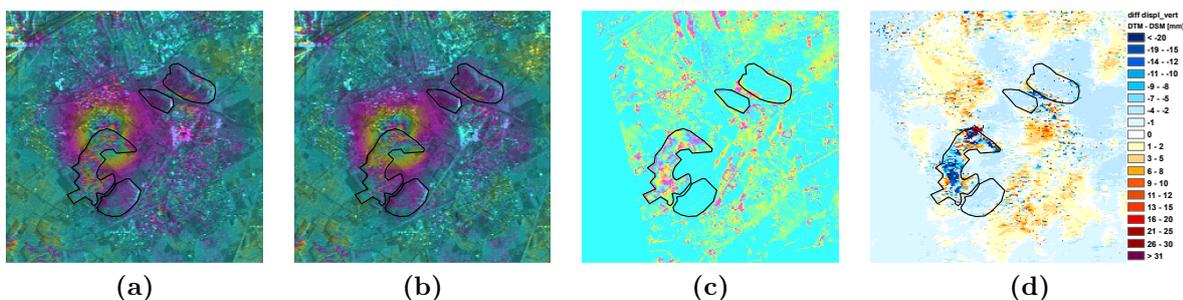
Bei Verwendung des NEXTMap DTM kommt es entsprechend zu topographischen Phasenfehlern, die zu Fehlern bei der Erfassung der vertikalen Bodenbewegungen in der Größenordnung von etwa 80 mm führen würden. Vergleichbare maximale Höhenfehler treten auch im Layover-Bereich auf. Um vertikale Messgenauigkeiten von mindestens 20 mm in städtischen Bereichen mit Gebäudehöhen von durchschnittlich 15 m zu erreichen, sollten nur Interferogramme mit maximalen Basislinien von etwa 500 m für DInSAR- und Stacking-Auswertungen verwendet werden (Abb. 4.22).

Großflächig höhenbedingte Phasenfehler treten meist ausschließlich in städtischen Bereichen auf und sind entweder auf großflächige Höhenmodellfehler, d.h. z.B. durch Verwen-

dung eines DGMs statt DOMs, zurückzuführen oder auf gleichmäßige Layover-Effekte in dicht bebauten Gebieten. Voraussetzung bei Layover-Fehlern ist jedoch, dass die Basislinien eine gewisse Länge nicht überschreiten, so dass ausreichend hohe Kohärenzen für die räumliche Phasenabwicklung vorhanden sind (vgl. z.B. Abb. 4.34 b). Die Verwendung von Geländemodellen zur topographischen Phasenkorrektur führt, unabhängig vom SAR-Sensor, in bebauten Gebieten immer zu Phasenfehlern, deren Größe und Sichtbarkeit abhängig ist von der Basislinie.

Bei der Erfassung von Bodenbewegungen in städtischen Bereichen müssen grundsätzlich Oberflächenmodelle für die Höhenkorrektur verwendet werden. Erfolgt dies nicht, kommt es in Abhängigkeit von der Richtung der Basislinie zur Über- oder Unterschätzung der Bewegungen. Das PALSAR-Beispiel in Abb. 4.29 a zeigt deutlich eine Unterschätzung der Senkungen im nördlichen Senkungsmuldenbereich bei Verwendung des NEXTMap DTM. Die Phasenfehler korrelieren mit der Bebauung. Bei PALSAR Interferogrammen mit Basislinien unter 1000 m werden solche topographiebedingten Phasenfehler kaum sichtbar, da diese entsprechend Formel 2.19 maximal  $6.1 \cdot 10^{-3} \cdot B_{\perp} \cdot \partial h$  [°] ( $R_1 \approx 883$  km,  $\theta_i = 34.3^\circ$ ) entsprechen. Bei einer Basislinie von 740 m (Beispiel siehe Abb. 4.30) und einem Höhenfehler von 15 m ergibt sich somit ein Phasenfehler von etwa  $68^\circ$ , was etwa einem Farbverlauf von cyan nach hellblau entspricht. Bei Envisat Interferogrammen würde ein solcher Phasenfehler bereits bei einer Basislinie von etwa 95 m auftreten, unter der Annahme  $R_1 = 840$  km und  $\theta_i = 18.7^\circ$ ; bei TerraSAR-X bei einer Basislinie von 80 m ( $R_1 = 670$  km und  $\theta_i = 37.9^\circ$ ).

Am Beispiel in Abb. 4.37 zeigt sich wie sich die Höhenfehler bei Verwendung des NEXTMap DTMs auf die differentiellen Phasen auswirken. Aufgrund der positiven Basislinie von  $B_{\perp} = +519^\circ$  kommt es zur Unterschätzung der Senkungen im nördlichen und südöstlichen Bereich der Senkungsmulde in der Größenordnung von meist 3-5 mm (vgl. Abb. 4.37 d).



**Abbildung 4.37.:** Auswirkungen von Höhenfehlern im Envisat ASAR Interferogramm vom 7.12.2006 - 11.1.2007 mit  $B_{\perp} = +519$  m; DInSAR mit (a) NEXTMap DSM, (b) NEXTMap DTM, (c) Differenz der topographischen Phasen von DSM und DTM (1 Farbzyklus  $\hat{=}$  1 Phasenzyklus), (d) Differenz der vertikalen Bodenbewegungen [mm]; positive/negative Werte = Unter-/Überschätzung von Senkungen.

---

# Validierung mit terrestrischen Daten

---

Ziel der Validierung ist die Untersuchung der Genauigkeitsunterschiede, die sich bei Nutzung verschiedener Höhenmodelle für die topographische Phasenkorrektur ergeben. Die Validierung der radarinterferometrischen Ergebnisse erfolgt entlang der Beobachtungslinien BL1 und BL2. Die Linie BL1 wurde zwischen April 2006 und Juli 2009 etwa alle 3 Monate nivellistisch eingemessen (15 Messungen), die Linie BL2 zwischen Juli 2007 bis März 2009 (6 Messungen). Weitere Vergleiche werden entlang selbstgewählter Profillinien ohne terrestrische Daten durchgeführt, um Messdifferenzen zwischen verschiedenen DInSAR-Ergebnissen an markanten Objekten (z.B. Halden) zu verdeutlichen.

Aufgrund der zeitweise hohen Senkungsgeschwindigkeiten (starke nichtlineare Bewegungen) ist für eine sinnvolle Validierung eine zeitlich gute Überstimmung von nur wenigen Tagen zwischen den Nivellements (Niv) und den SAR-Aufnahmen erforderlich. Dies führt zu starken Einschränkungen bei der Wahl geeigneter Interferogramme. Letztendlich werden für die Vergleiche mit den terrestrischen Daten nur Interferogramme genutzt, welche zu einem Mindest-Basislinien (TSX:  $>100$  m, ASAR:  $>100$  m, PALSAR  $>500$  m) aufweisen und dementsprechend signifikante Messunterschiede aufgrund der unterschiedlichen DHMs zu erwarten sind, zum anderen gute Kohärenzen besitzen, um eine erfolgreiche Phasenabwicklung in zumindest weiten Bereichen durchführen zu können. Ausreichend hohe Kohärenzen weisen nur Interferogramme mit Basislinien von maximal etwa 350 m bei Envisat ASAR bzw. etwa 2100 m bei ALOS PALSAR auf. Alle TerraSAR-X Interferogramme (max.  $B_{\perp}=335$  m) verfügen über ausreichend hohe Kohärenzen. Interferogramme mit starken atmosphärischen Störungen sind nicht nutzbar für eine präzise Validierung.

Die Ergebnisse der Vergleiche zwischen den Nivellements und den radarinterferometrisch gemessenen Bodenbewegungen sind in Tab. 5.1 dargestellt. Zusätzlich zum Mittelwert MEAN und dem Genauigkeitswert RMSE (Kapitel 2.4.2) wird auch die Anzahl der zur Berechnung der statistischen Kennwerte verwendeten Differenzen mit angegeben. Auf die einzelnen statistischen Werte wird in den folgenden Kapiteln näher eingegangen. Aufgrund der unterschiedlichen Wellenlängen sind unterschiedliche Messgenauigkeiten mit den Sensoren TerraSAR-X, Envisat ASAR und ALOS PALSAR erreichbar, wie die Standardabweichungen (RMSE-Werte) deutlich zeigen. Vergleichbare bzw. fast identische Genauigkeiten konnten bereits in einem benachbarten Gebiet mit teilweise gleichen SAR-Daten erzielt werden (Walter et al., 2009). Die berechneten Standardabweichungen entsprechen durchschnittlich einem Phasenrauschen von etwa  $52^\circ$  bei TerraSAR-X ( $\pm 3$  mm),  $59^\circ$  bei Envisat ASAR ( $\pm 5$  mm) und  $33^\circ$  bei ALOS PALSAR ( $\pm 14$  mm). Die Ergebnisse in Tab. 5.1 beziehen sich nur auf Vergleiche mit Interferogrammen mit den angegebenen Basislinien. Bei den in den folgenden Abschnitten dargestellten differentiellen Interferogrammen entspricht ein Farbzyklus jeweils einem Phasenzyklus. Ein Phasenzyklus entspricht wiederum einer relativen vertikalen Verschiebung wie in Tab. 4.6 angegeben.

**Tabelle 5.1.:** Statistische Werte der Validierung abgeleitet aus den Differenzen „Niv - DInSAR“  
(# - Anzahl der Differenzwerte)

	TerraSAR-X <sup>1</sup>			Envisat ASAR <sup>2</sup>			ALOS PALSAR <sup>3</sup>		
	#	MEAN [mm]	RMSE [mm]	#	MEAN [mm]	RMSE [mm]	#	MEAN [mm]	RMSE [mm]
DSM B+	22	0.0	$\pm 2.9$	66	0.9	$\pm 4.8$	118	2.9	$\pm 12.7$
DSM B-	36	-0.1	$\pm 3.4$	40	0.3	$\pm 3.7$	47	-2.3	$\pm 15.0$
DSM Stack	19	1.1	$\pm 3.2$						
Gesamt DSM	77	0.2	$\pm 3.3$	106	0.7	$\pm 4.4$	165	1.4	$\pm 13.6$
DTM B+	24	-0.2	$\pm 3.5$	66	-1.6	$\pm 6.8$	118	1.4	$\pm 14.4$
DTM B-	35	0.9	$\pm 3.2$	40	1.0	$\pm 4.0$	48	8.9	$\pm 14.1$
DTM Stack	19	1.1	$\pm 3.4$						
Gesamt DTM	78	0.6	$\pm 3.4$	106	-0.6	$\pm 6.0$	166	3.6	$\pm 14.7$
SRTM B+	24	0.1	$\pm 3.7$	66	-2.7	$\pm 6.8$	118	2.2	$\pm 12.3$
SRTM B-	36	-2.2	$\pm 5.8$	39	-0.6	$\pm 3.6$	48	6.7	$\pm 16.7$
SRTM Stack	19	2.0	$\pm 3.3$						
Gesamt SRTM	79	-0.5	$\pm 5.0$	105	-1.9	$\pm 5.9$	166	3.5	$\pm 13.9$

<sup>1</sup> Verwendete Basislinien TSX: +140m, -72m, -190m, Stack siehe Abb. 5.3

<sup>2</sup> Verwendete Basislinien ASAR: +105m, +269m, +323m, -293m, -326m

<sup>3</sup> Verwendete Basislinien PALSAR: +740m, +971m, +1020m, +1548m, +1986m -1729m, -1840m, -2059m

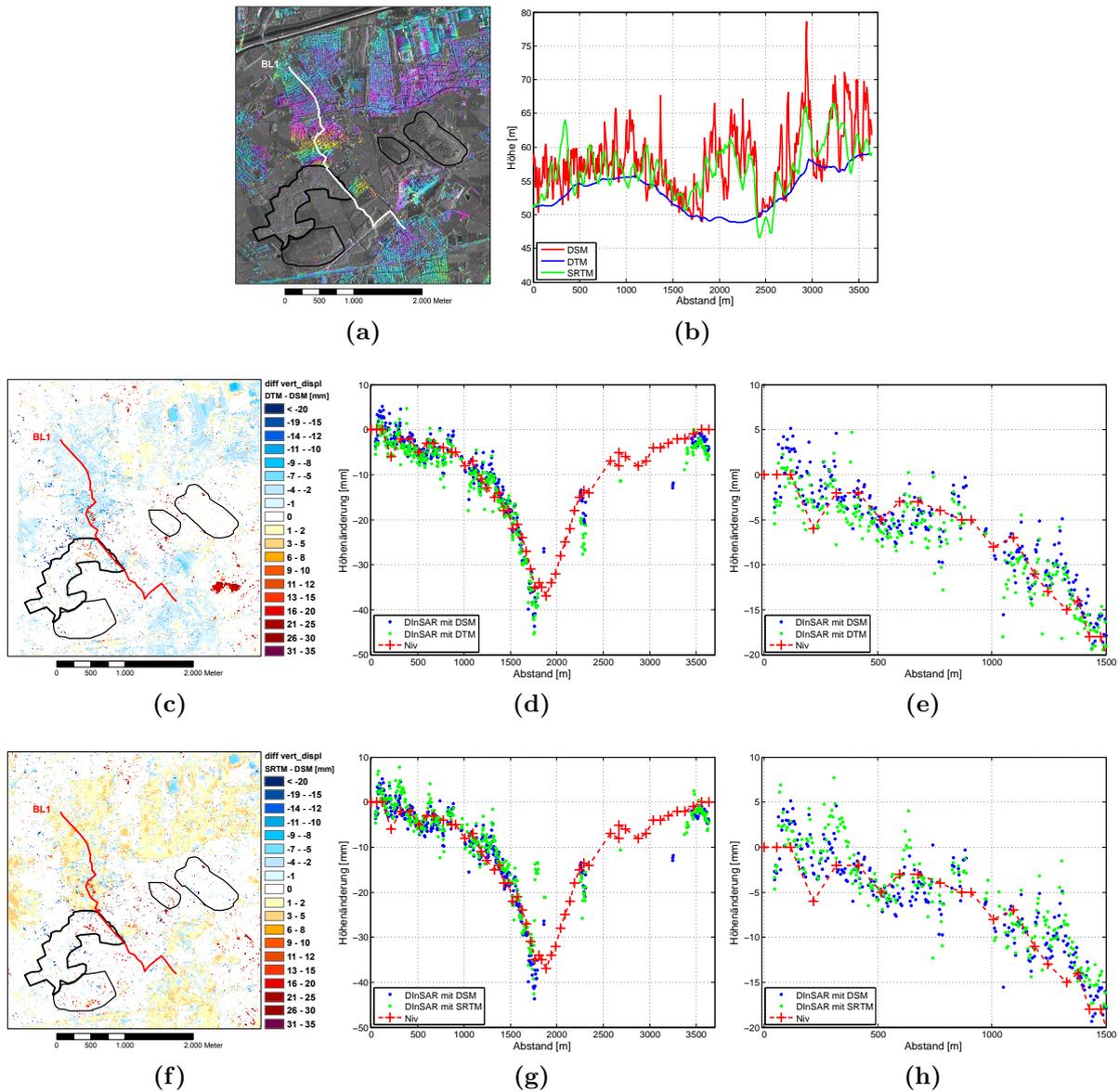
Die in Tab. 5.1 zusammengefassten Ergebnisse verdeutlichen einerseits, dass sich die Mittelwerte in Abhängigkeit der Richtung der Basislinie verändern, d.h. Offsets entstehen, während andererseits die RMSE-Werte relativ stabil bleiben, unabhängig von der Basislinie. Jedoch zeigt sich auch, dass bei Verwendung eines für die topographische Phasenkorrektur weniger geeigneten Höhenmodells, wie dem NEXTMap DTM und SRTM-XC, es, aufgrund der Zunahme der topographie-bedingten Dekorrelationen, zu einer Verschlechterung der RMSE-Werte bei allen verwendeten Sensoren kommt. Die Validierungsergebnisse

stimmen gut mit den Erwartungen bzgl. der Über- oder Unterschätzung der zu erfassenden Bodenbewegungen überein. Bei Verwendung von Interferogrammen mit positiven Basislinien (B+) werden Senkungen in Gebieten mit zu niedrigen Höhenwerten (DTM) mittels DInSAR unterschätzt (im Mittel negative Differenzen), während es bei negativen Basislinien (B-) eher zu einer Überschätzung der Senkungen kommt (im Mittel positive Differenzen).

## 5.1. TerraSAR-X Ergebnisse

Die maximalen Basislinien der Interferogramme, die zeitlich gut zum Nivellement passen und somit für die Validierung geeignet sind, betragen +140 m bzw. -190 m. Entsprechend Formel 2.19 ergeben sich bei  $B_{\perp} = -190$  m Phasenfehler von  $(10.7 \cdot \partial h)$  [°]. Bei einem Phasenrauschen von etwa  $50^{\circ}$  müssen die Höhenfehler größer als 4.7 m sein, um topographische Phasenfehler zu detektieren. Da die Höhenunterschiede zwischen den Höhenmodellen entlang von BL1 und BL2 nur geringfügig darüber liegen (siehe vorheriger Abschnitt), werden die Unterschiede in den Messergebnissen kaum sichtbar. Aufgrund der Filterung der Interferogramme vor der Phasenabwicklung (Kapitel 2.2.4) müssen die Höhenfehler sogar deutlich größer als 4.7 m sein, um sie anhand der Messergebnisse zu identifizieren. Das Beispiel in Abb. 5.1 verdeutlicht dies sehr gut entlang der Linie BL1. Im nördlichen städtischen Bereich betragen die Höhenunterschiede zwischen dem NEXT-Map DSM (rot) und DTM (blau) meist etwa 5 m, was nach Formel 4.1 einer Messdifferenz von theoretisch 3 mm entspricht. Durch die Filterung sind die Differenzen in der Realität etwas niedriger, wie die Ergebnisse in Abb. 5.1 c-e zeigen. Die mittlere Differenz zwischen dem DSM und DTM Ergebnis beträgt im Bereich von 0-1200 m etwa 1.2 mm. Die Senkungen werden bei Verwendung des NEXTMap DTM aufgrund der negativen Basislinie um etwa 1.5 mm überschätzt (Abb. 5.1 e, Position 500 m). In den SRTM-XC Ergebnissen treten vor allem stärkere Streuungen der Messwerte auf (Abb. 5.1 f-h). Im Bereich von etwa 250-350 m, in denen die SRTM-Daten höher als das DSM liegen (Abb. 5.1 b), ist eine deutliche Unterschätzung der Senkungen zu beobachten (Abb. 5.1 h). Im gesamten Gebiet werden bei Verwendung von SRTM-XC die Bewegungen leicht um meist 1-2 mm unterschätzt (Abb. 5.1 f). In unbebauten Gebieten können entlang von BL1 keine Bewegungen abgeleitet werden, aufgrund der geringen Kohärenzen. Gewöhnlich dekorrelieren TerraSAR-X Interferogramme bereits ab 22-33 Tagen in ländlichen Bereichen (hier: 143 Tage). Da die Linie BL1 am Waldrand verläuft, weisen DSM und SRTM deutlich größere Höhen als das DTM auf (Abschnitt 1700-2400 m). Demnach zeigt sich im DTM-Ergebnis bei 2300 m (Abb. 5.1 d) eine deutliche Überschätzung der Senkungen. In Wäldern weisen die TerraSAR-X Phasendifferenzen sehr niedrige Kohärenzen auf, was die Ableitung von Bewegungen meist vollständig verhindert (Bereich 1700-2400 m).

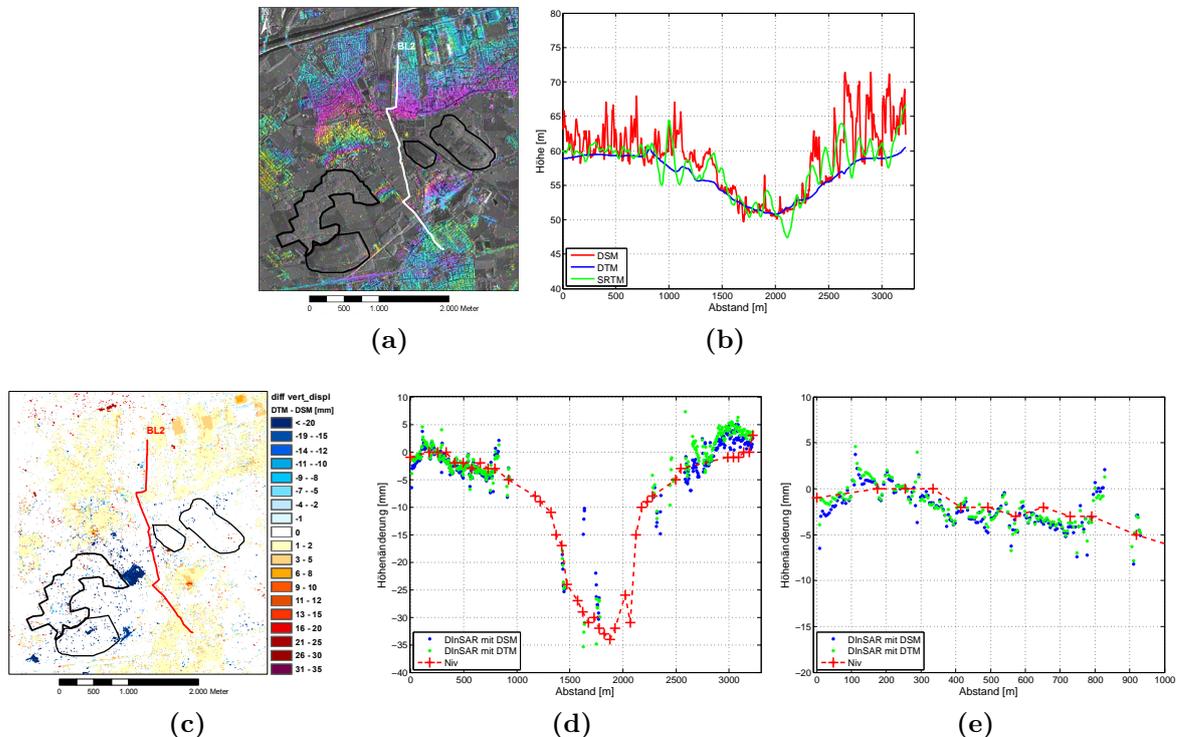
Ähnliche Ergebnisse wie bei BL1 sind auch entlang der Linie BL2 erzielbar (Abb. 5.2). Da die Linie hauptsächlich durch ländlichen Raum verläuft, können nur für die Senkungsrandbereiche Bewegungen abgeleitet werden. Aufgrund der positiven Basislinie ( $B_{\perp} = +140$  m) kommt es zu einer Unterschätzung der Senkungen, d.h. die DTM-Ergebnisse liegen im Vergleich zu den DSM-Ergebnissen um etwa 1 mm höher (Abb. 5.2 c-e). Die Ergebnisse stim-



**Abbildung 5.1.:** Vergleich der radarinterferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen mit Nivellements (18.4.2008 - 26.8.2008) entlang der Linie BL1; TerraSAR-X 6.4.2008 - 27.8.2008,  $B_{\perp} = -190$  m (a) Differentielles Interferogramm, (b) Höhen, (c) Messdifferenz DInSAR (DTM - DSM), (d) Gesamtprofil BL1 von Nord nach Süd mit DInSAR DSM (blau), DInSAR DTM (grün), Nivellement (rot), (e) Teilprofil BL1 0-1500 m DInSAR (DSM, DTM, Niv), (f) Messdifferenz DInSAR (SRTM - DSM), (g) Gesamtprofil BL1 mit DInSAR DSM (blau), DInSAR SRTM (grün), Nivellement (rot), (h) Teilprofil BL1 0-1500 m DInSAR (DSM, SRTM, Niv)

men sehr gut mit dem Nivellement überein, trotz der Zeitdifferenz zwischen dem Nivellement und den DInSAR-Ergebnissen von insgesamt 17 Tagen. Im südlichen Bereich (2500-3700 m) zeigen sich deutliche Unterschätzungen der Senkungen bei den DTM-Ergebnissen, aufgrund der größeren Höhenfehler (Abb. 5.2b). Die Abweichungen zum Nivellement in diesem Bereich deuten auf Nivellementfehler hin, da atmosphärische Störungen ausgeschlossen werden können. Räumlich isolierte kohärente Bereiche weisen teilweise Phasen-

abwicklungsfehler um ein Vielfaches von 20.6 mm auf, aufgrund der Relativmessung und des fehlenden Anschlusses zum Referenzpunkt (blauer Bereich in Abb. 5.2 c). Der Unterschied zwischen den DSM- und SRTM-Ergebnissen ist relativ gering und weist nur im Süden etwas größere Streuungen auf, so dass auf die Darstellungen verzichtet wurde.



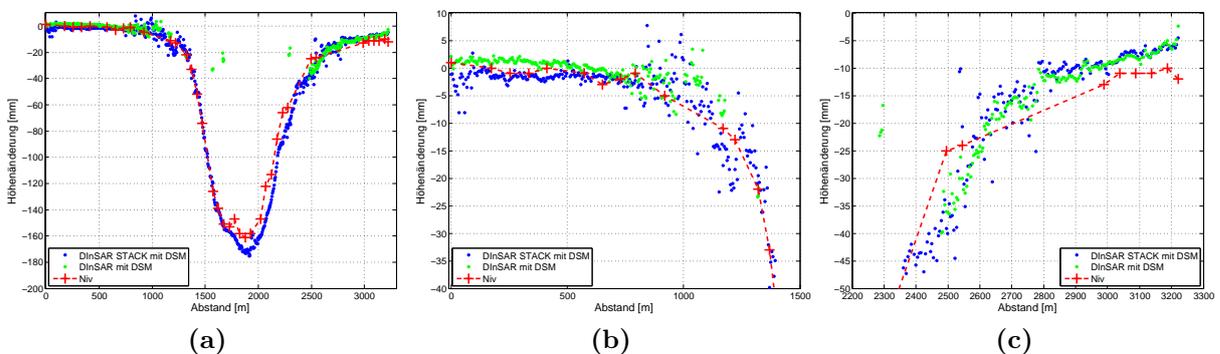
**Abbildung 5.2.:** Vergleich der radarinterferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen mit Nivellements (12.6.2008 - 28.11.2008) entlang der Linie BL2; TerraSAR-X 11.6.2008 - 12.11.2008,  $B_{\perp} = +140$  m (a) Differenzielles Interferogramm, (b) Höhen, (c) Messdifferenz DInSAR (DTM - DSM), (d) Gesamtprofil BL2 von Nord nach Süd mit DInSAR DSM (blau), DInSAR DTM (grün), Nivellement (rot), (e) Teilprofil BL2 0-1000 m DInSAR (DSM, DTM, Niv)

Aufgrund fast identischer Mess- bzw. Aufnahmezeitpunkte des Nivellements (12.11.2008, 25.3.2009) und des TerraSAR-X Sensors (12.11.2008, 24.3.2009) erfolgt, trotz kleiner Basislinie ( $B_{\perp} = -59$  m), ein Vergleich entlang BL1 für diesen Zeitraum. Die Ergebnisse zeigen signifikante Abweichungen zum Nivellement am nördlichen Senkungsmuldenrand, unabhängig vom verwendeten Höhenmodell, so dass zusätzlich ein Stack aus 9 Interferogrammen (Abb. 5.3 a-i) gerechnet wurde. Der Vergleich zwischen dem Nivellement und dem Stacking-Ergebnis bzw. DInSAR-Ergebnis ist in Abb. 5.4 dargestellt. Das unabhängig gerechnete Stacking-Ergebnis weist eine hohe Übereinstimmung zum Einzel-Interferogramm-Ergebnis auf. Somit kann davon ausgegangen werden, dass das Nivellement fehlerhaft ist. Nachträgliche Recherchen ergaben, dass sowohl die Messung vom 25.3.2009 entlang BL1 als auch einige weitere Messungen ungeeignet für die Validierung sind, aufgrund des zeitlich nicht immer korrekten Einhängens der Linien ins übergeordnete Nivellementnetz und der veränderten Anschlusshöhen und Anschlusspunkte. Für einzelne Messzeitpunkte kann außerdem nicht ausgeschlossen werden, dass grobe Messfehler in den Daten enthalten sind, wenn diese ohne Rückweg gemessen wurden. Eine Anga-



chen Zugewinn an Messinformationen (Abb. 5.4 b), was die Erfassung hoher räumlicher Bewegungsgradienten ermöglicht. Im südlichen Bereich liegen keine verwendbaren Nivellementsergebnisse vor, die für einen Vergleich nützlich wären (Abb. 5.4 c). Die Unterschiede zwischen den Stacking-Ergebnissen bei Verwendung unterschiedlicher Höhenmodelle sind im Anhang in Abb. E.1 zu sehen. Aufgrund der wechselnden Richtung der räumlichen Basislinien bei den Stacking-Interferogrammen gleichen sich Höhenfehler bei Verwendung der DTM-Daten (Abb. E.1 a-c) und SRTM-Daten (Abb. E.1 d-f) weitestgehend aus.

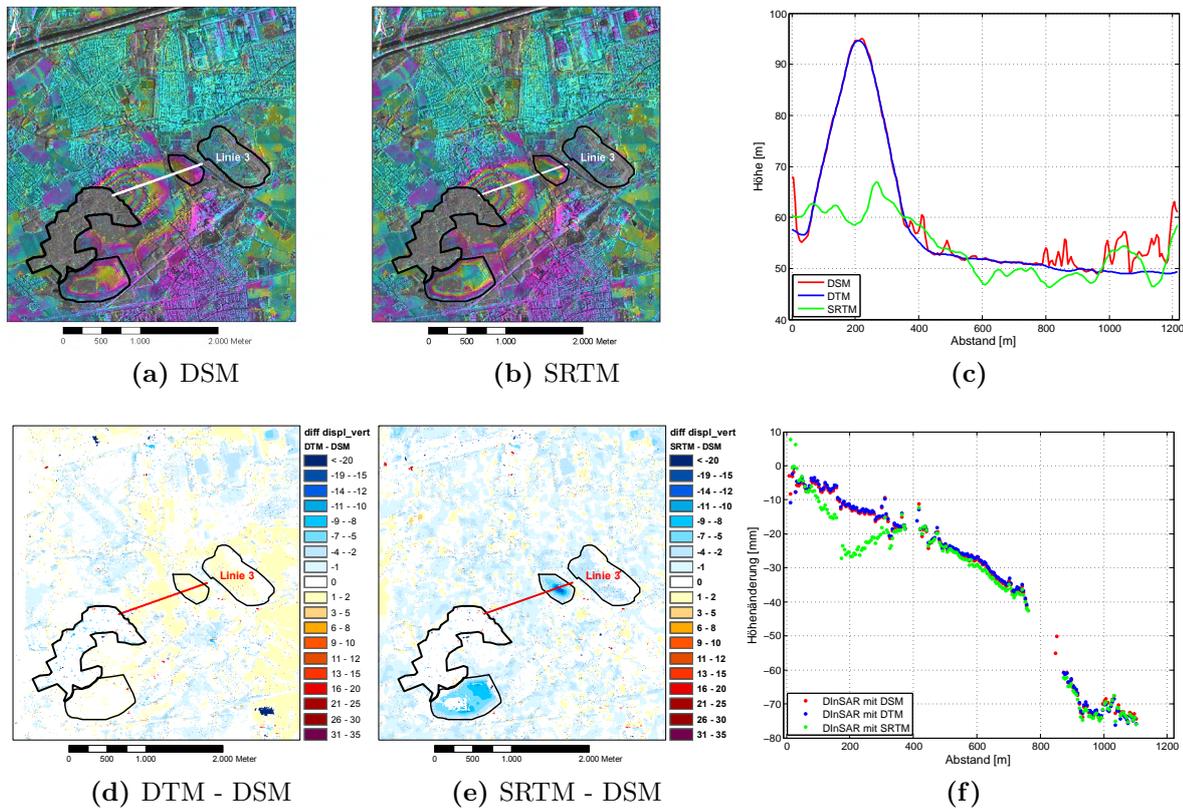
Zusätzlich zur Linie BL1 konnte ein Vergleich entlang BL2 (28.11.08, 16.3.2009) mit einem DInSAR-Stack aus 7 bzw. 8 Interferogrammen (12.11.2008/15.12.08 - 13.3.2009) erfolgen. Die Ergebnisse im Anhang in Abb. E.2 zeigen große Abweichungen zwischen dem Nivellement und dem Stacking-Ergebnis, aufgrund der großen zeitlichen Differenzen der Betrachtungszeiträume und der schnellen Bewegungen. Die Messunterschiede zwischen dem Stacking- und Einzel-Interferogramm-Ergebnis betragen etwa 3-5 mm in den Muldenrandbereichen. Deutliche bessere Ergebnisse liefert der Vergleich zum Stack vom 15.12.08 - 13.3.2009 (Abb. 5.5), trotz des zeitlich kürzeren Betrachtungszeitraums. Da Senkungen in DInSAR-Ergebnissen bei sehr schnellen Bewegungen gewöhnlich unterschätzt statt überschätzt werden, wird vermutet, dass das Nivellement unzuverlässig ist. Recherchen ergaben, dass die Nivellements (28.11.2008, 16.3.2009) an unterschiedliche Referenzpunkte angeschlossen worden sind und eine zur Beurteilung der Messgenauigkeit erforderliche Rückmessung ausgelassen wurde. Die Stacking-Ergebnisse entlang BL2 zeigen wie bei BL1 bei Verwendung unterschiedlicher Höhenmodelle minimale Differenzen von 1-2 mm (vgl. im Anhang Abb. E.3).



**Abbildung 5.5.:** Vergleich des Stacking- und Einzelinterferogramm-Ergebnisses (15.12.2008 - 13.3.2009) mit dem Nivellement entlang der Linie BL2 (28.11.2008 - 16.3.2009); (a) Gesamtprofil BL2 von Nord nach Süd mit DInSAR DSM Stack (blau), DInSAR DSM (grün), Nivellement (rot), (b) Teilprofil BL2 0-1500 m, (c) Teilprofil BL1 2200-3300 m.

Wie bereits im Kapitel 4 gezeigt wurde, weist das SRTM-DHM große Höhenfehler im Bereich einiger Halden auf. Entlang der Profillinie 3 (von Ost nach West!) in Abb. 5.6 zeigen sich dadurch große Messfehler, die sich in Abhängigkeit der gegebenen Basislinie von  $B_{\perp} = -126$  m auch deutlich als Phasenfehler im Interferogramm widerspiegeln (Abb. 5.6 b). Der maximale Höhenfehler entlang des Profils beträgt 37 m (Abb. 5.6 c). Die geringen Unterschiede zwischen den Messergebnissen bei Verwendung des NEXTMap DSM und DTM (Abb. 5.6 d+f) sind auf die Wahl des Referenzpunktes zurückzuführen, da die Höhen im

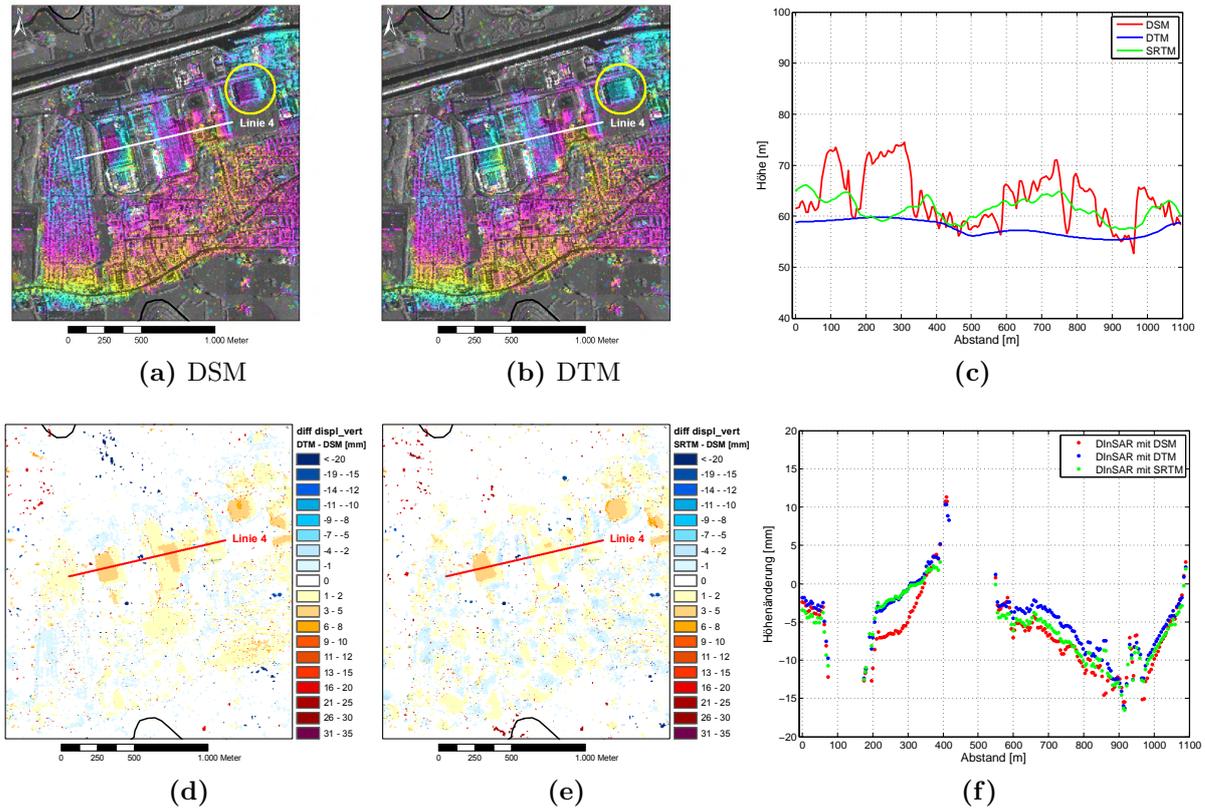
Bereich der Halde identisch sind. Bei Verwendung des SRTM-DHMs werden die Senkungen der Halde deutlich, jedoch maximal um 15 mm entlang der Linie 3, überschätzt (Abb. 5.6 e-f). Dies ergibt sich aufgrund des zu niedrigen Höhenmodells in Kombination mit einer negativen Basislinie. Im westlichen Bereich treten geringe Differenzen zwischen den Ergebnissen auf, aufgrund einzelner Gebäude und Vegetation.



**Abbildung 5.6.:** Beispiel Halde: Vergleich der interferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen entlang Linie 3 von Ost nach West bei Verwendung unterschiedlicher Höhenmodelle; TerraSAR-X 26.12.2008 - 17.1.2009,  $B_{\perp} = -126$  m; DInSAR mit (a) NEXTMap DSM, (b) SRTM-XC, (c) Höhen entlang Linie 3, (d) Messdifferenz DInSAR (DTM - DSM), (e) Messdifferenz DInSAR (SRTM - DSM), (f) Gesamtprofil Linie 3 mit DInSAR DSM (blau), DInSAR DTM (grün), DInSAR SRTM-XC (rot).

Bei der Überlagerung von Bewegungen mit Höhenfehlern in städtischen Bereichen können große Messfehler auftreten, auch bei Verwendung sehr genauer Oberflächenmodelle wie dem NEXTMap DSM. Das Beispiel in Abb. 5.7 verdeutlicht dies. Die Profillinie 4 verläuft durch einen Senkungsmuldenrand. Im westlichen Bereich zeigen sich geringe Senkungen (Abb. 5.7, 0-70 m), die bei Verwendung des NEXTMap DTMs unterschätzt und bei Nutzung des SRTM-DHMs überschätzt werden, aufgrund der Höhenunterschiede (Abb. 5.7 c) und der positiven Basislinie. Im weiteren Verlauf der Linie nach Westen (70-200 m) kommt es zu Fehlern an der Vegetationsgrenze, aufgrund von Höhenfehlern. Das Gebäude im Bereich (200-400 m) weist mit hoher Sicherheit starke thermische Deformationen auf (Abb. 5.7 a), die aufgrund des Fehlens des Gebäudes in den DTM und SRTM-Daten deutlich unterschätzt werden. Am östlichen Gebäuderand treten Layover-Effekte auf, die eine Phasenabnahme in Richtung Sensor (nach Osten) verursachen, die sich wiederum

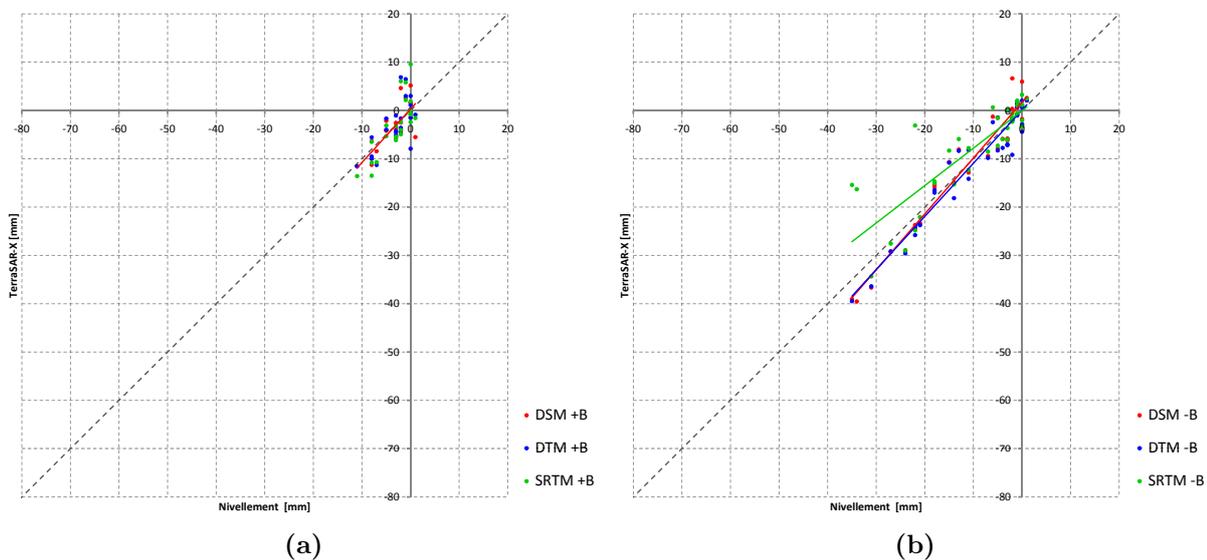
aufgrund der positiven Basislinie als Hebung widerspiegelt. Weiterer Layover mit gleichen Auswirkungen zeigt sich im Bereich von etwa 850 m und 1050 m. Vermutlich infolge eines Höhenfehlers (zu niedrige Höhe) entsteht im zentralen Bereich der Senkungsmulde entlang der Linie 4 (ca. 950 m) ein Messfehler in der Größenordnung von etwa 5-7 mm. Dies entspricht einem Höhenfehler von mindestens 12-17 m. An den Muldenrändern finden bei Verwendung des DTM starke Unterschätzungen der Senkungen statt.



**Abbildung 5.7.:** Beispiel Stadtbereich: Vergleich der interferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen bei Verwendung unterschiedlicher Höhenmodelle entlang der Linie 4 von West nach Ost; TerraSAR-X 11.2.2008 - 21.11.2009,  $B_{\perp} = +134$  m; DInSAR mit (a) NEXTMap DSM, (b) NEXTMap DTM, (c) Höhen entlang Linie 4, (d) Messdifferenz DInSAR (DTM - DSM), (e) Messdifferenz DInSAR (SRTM - DSM), (f) Gesamtprofil Linie 4 mit DInSAR DSM (blau), DInSAR DTM (grün), DInSAR SRTM-XC (rot).

Für die Validierung wurden weitere Interferogramme ausgewertet und Vergleiche mit den Nivellements entlang der Linien BL1 und BL2 durchgeführt. Für kohärente Bereiche in denen keine Phasenabwicklungsfehler auftraten, wurden statistische Werte aus den Differenzen der Nivellements und DInSAR-Messungen abgeleitet (Tab. 5.1). Zusätzlich erfolgte die Erstellung von Streudiagrammen getrennt nach Richtung der Basislinie (Abb. 5.8). Da nur sehr wenige Interferogramme mit größeren Basislinien für den Vergleich zur Verfügung standen, ergaben sich analog dazu wenige Messwerte im Streudiagramm. Größere Bewegungen ( $> 40$  mm) konnten in den ausgewählten Interferogrammen nicht erfasst werden, aufgrund starker zeitlicher Dekorrelationen und der Lage der Senkungsmuldenzentren im ländlichen Bereich. Anhand der Streudiagramme werden die Unterschiede in den DInSAR-

Ergebnissen bei Verwendung unterschiedlicher DHMs kaum sichtbar. Die Statistik zeigt jedoch (Tab. 5.1), dass bei Verwendung positiver Basislinien und einem zu niedrigen DHM wie dem NEXTMap DTM die DInSAR-Ergebnisse leicht über dem Nivellement liegen (im Mittel negative Differenzen Niv - DInSAR), aufgrund der sich durch den Höhenfehler ergebenden negativen Phasendifferenzen. Der umgekehrte Effekt wird sichtbar bei negativen Basislinien, so dass es bei Verwendung des DTM zur Überschätzung der Senkungen kommt (im Mittel positive Differenzen Niv - DInSAR). Beim Stacking gleichen sich Höhenfehler aus, so dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mittelwerten beim DSM und DTM entstehen. Bei Verwendung der DTM-Daten nehmen die Streuungen der Messergebnisse außerdem leicht zu (vgl. RMSE-Werte). Bei Verwendung der SRTM-Daten treten deutlich größere Messunterschiede im Vergleich zu den DSM-Ergebnissen auf. Insbesondere bei negativen Basislinien werden Senkungen stark unterschätzt, was darauf hin deutet, dass die SRTM-Höhen häufiger zu hoch sind (Abb. 5.8 b). Ursache dafür könnte die schlechtere Bodenauflösung sein. Die Streuung ist bei den SRTM-Ergebnissen am stärksten (Tab. 5.1, RMSE).



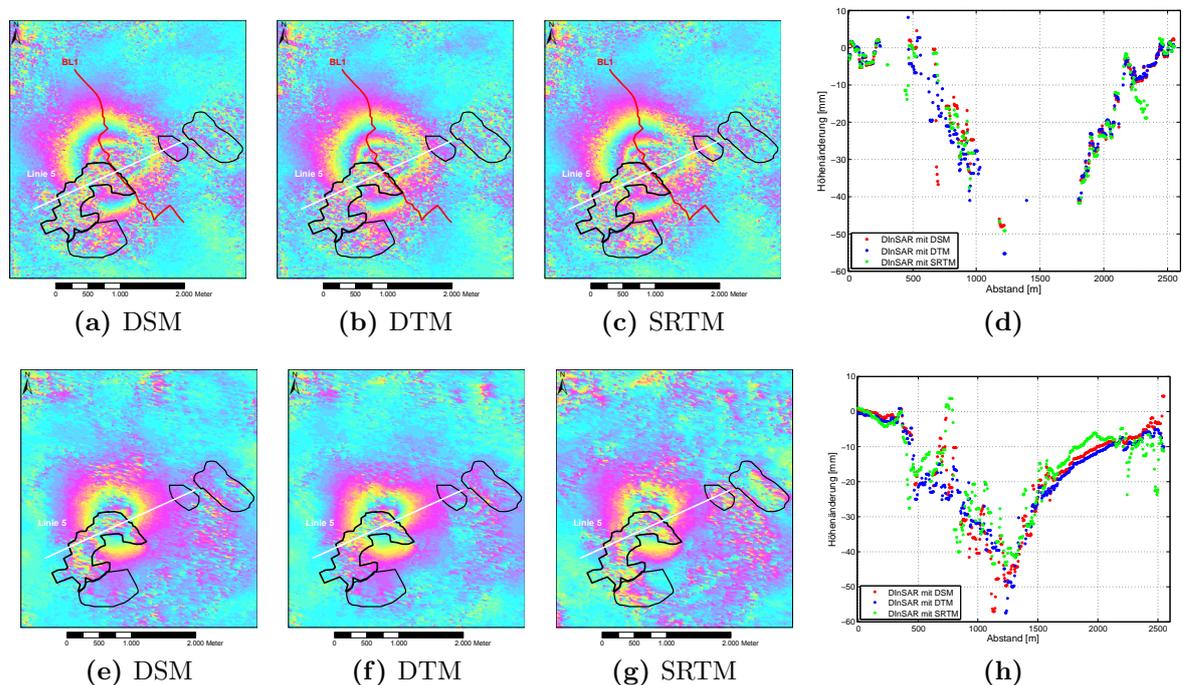
**Abbildung 5.8.:** Streudiagramme der Bodenbewegungen abgeleitet aus den Nivellements (X-Achse) und TerraSAR-X DInSAR-Messungen (Y-Achse) bei Verwendung unterschiedlicher DHMs zur topographischen Korrektur: NEXTMap DSM (rot), NEXTMap DTM (blau), SRTM-XC (grün); Unterscheidung der Ergebnisse bei Nutzung von Interferogrammen (a) mit positiver und (b) negativer räumlicher Basislinie. Für einige Datensätze ist die lineare Regressionskurve mit dargestellt, wenn dies sinnvoll erschien.

Allgemein kann anhand der Messergebnisse in Tab. 5.1 gezeigt werden, dass bei Verwendung des NEXTMap DSM die höchsten Genauigkeiten bei der Auswertung von TerraSAR-X Interferogrammen erzielbar sind. D.h. im Mittel liegen die Ergebnisse nur 0.2 mm unterhalb der Nivellements mit einer Standardabweichung von 3.3 mm. Bei Verwendung des NEXTMap DTM und SRTM-XC DHMs verschlechtern sich die Messergebnisse, jedoch nur sehr geringfügig bei Basislinien bis 200 m. Die größten Streuungen treten bei den SRTM-Ergebnissen im Vergleich zu den Nivellements auf.

## 5.2. Envisat ASAR Ergebnisse

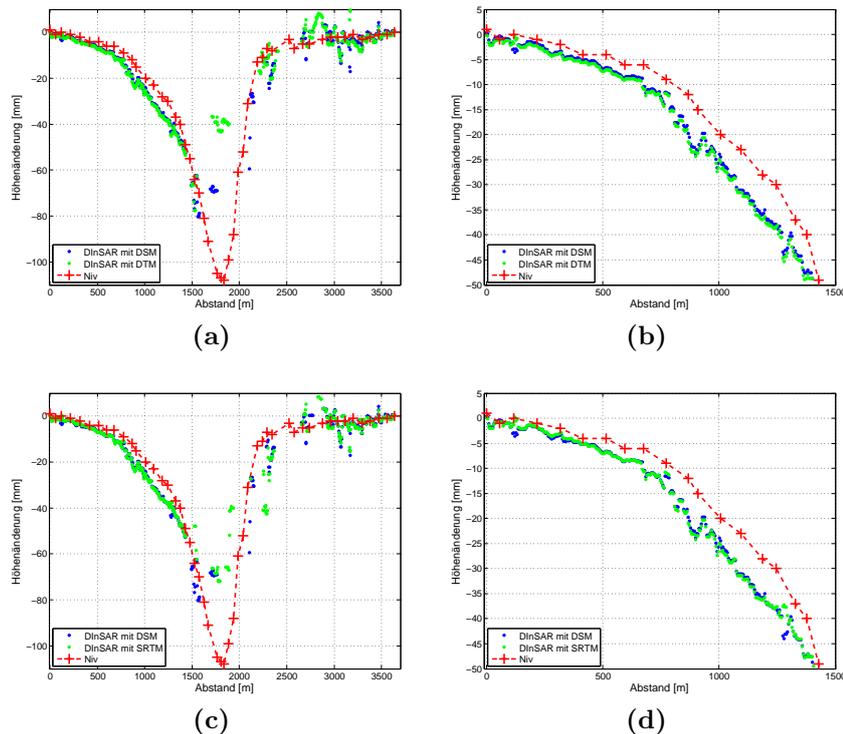
Im Gegensatz zu den TerraSAR-X Auswertungen weisen deutlich mehr ASAR Interferogramme eine hohe zeitliche Übereinstimmung zum Nivellement auf und können so für eine Validierung genutzt werden. Die verwendeten Interferogramme besitzen Basislinien von maximal 350 m. Bei größeren Basislinien sind die Dekorrelationen zu stark, was u.a. auf Höhenfehler zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 4).

Anhand des Beispiels in Abb. 5.9 wird zunächst gezeigt, wie stark die Auswirkungen von Höhenfehlern in Vegetationsbereichen sowie im Bereich der bisher mehrfach betrachteten Halde sein können. Bei Interferogrammen mit negativen Basislinien kommt es bei Verwendung von zu niedrigen Höhenwerten zur Überschätzung von Senkungen. Dies ist u.a. im Bereich der Halde bei Verwendung von SRTM-Daten zu beobachten (Abb. 5.9 a-d, 2200-2450 m). Bei positiven Basislinien kommt es dagegen eher zu Hebungen. Im Fall zu großer Basislinien, nehmen die Dekorrelationen, wie im Beispiel in Abb. 5.9 e-h zu sehen ist, deutlich zu und führen zu starkem Messrauschen. Westlich der Halde sind die SRTM-Höhen um etwa 3-4 m niedriger als die NEXTMap Daten (vgl. die Höhenwerte entlang der Linie 5 in Abb. 5.15), so dass die Senkungen theoretisch um 6-8 mm (Formel 4.1) unterschätzt werden sollten. Die Ergebnisse in Abb. 5.9 h (1700-2000 m) bestätigen dies.



**Abbildung 5.9.:** Beispiel Vegetation und Halde: Vergleich der radarinterferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen bei Verwendung unterschiedlicher Höhenmodelle entlang der Linie 5 von West nach Ost; Beispiel 1 (a-d): Envisat ASAR 11.1.2007 - 22.3.2007 mit  $B_{\perp} = -111$  m; Beispiel 2 (e-h): Envisat ASAR 7.12.2006 - 11.1.2007 mit  $B_{\perp} = +519$  m; (a,e) DInSAR mit NEXTMap DSM, (b,f) DInSAR mit NEXTMap DTM, (c,d) DInSAR mit SRTM-XC, (d,h) Gesamtprofil Linie 5 mit DInSAR DSM (blau), DInSAR DTM (grün), DInSAR SRTM-XC (rot).

Im Bereich von Vegetation (Abb. 5.9 d+h, 350-1400 m) zeigen sich in beiden Beispielen verstärkt Streuungen der Messergebnisse bei gleichzeitiger guter Wiedergabe der Senkungsverläufe. Dass die Interferogramme, die mit dem NEXTMap DTM berechnet wurden, etwas bessere Kohärenzen im Wald aufweisen (Abb. 5.9 b+f), lässt sich auch anhand der Profile nachweisen. Die NEXTMap DSM Ergebnisse zeigen ähnlich große Messfehler in Vegetationsbereichen wie bei Verwendung von SRTM-XC. Das DTM erweist sich somit als das geeignetere Höhenmodell in Vegetationsbereichen bei der topographischen Korrektur von ASAR Interferogrammen. Eine Bewertung der Zuverlässigkeit der Messergebnisse erfolgt durch den Vergleich der DInSAR-Ergebnisse in Abb. 5.9 a-c mit den Nivellementwerten der Linie BL1 (Abb. 5.10).



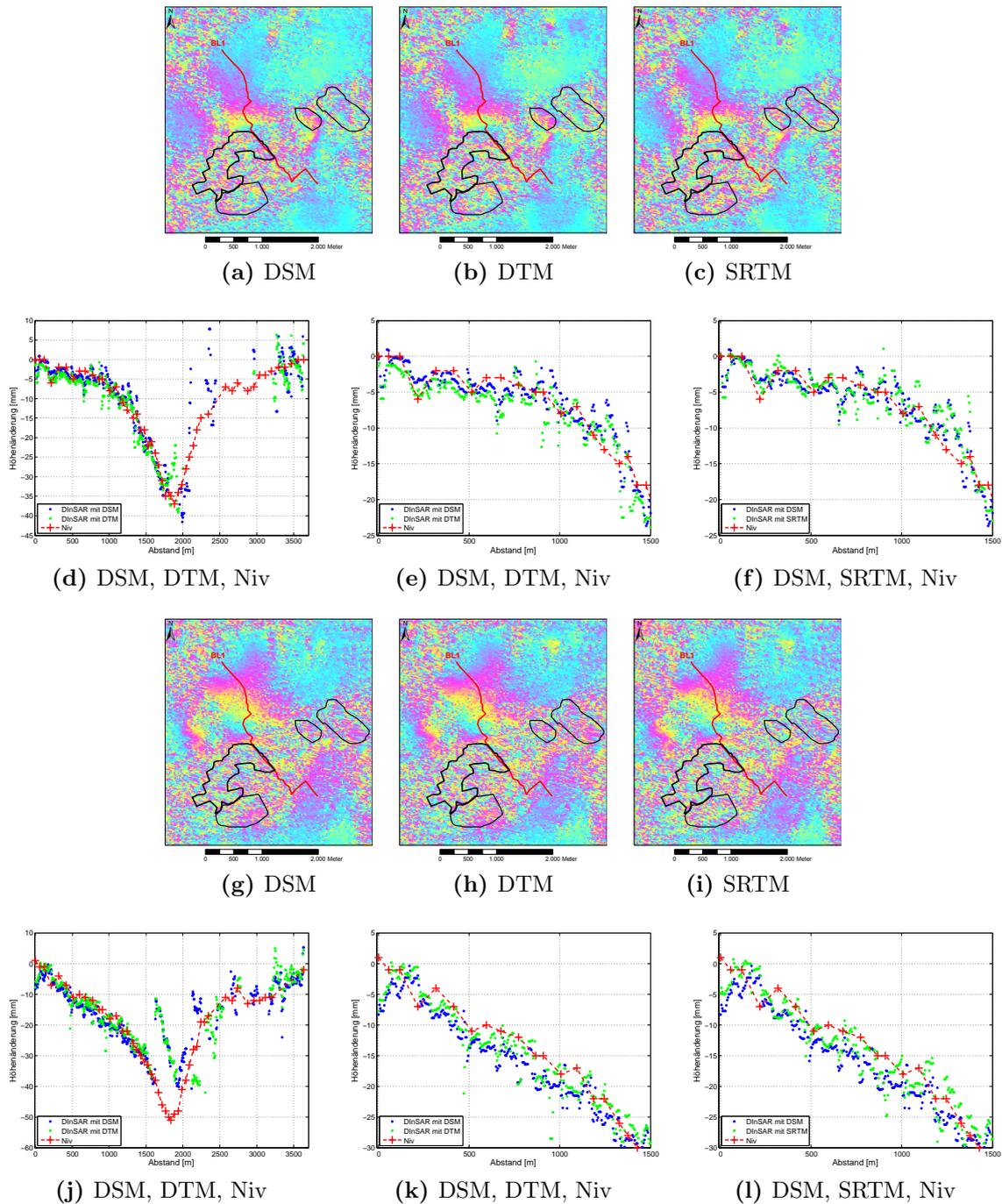
**Abbildung 5.10.:** Vergleich der interferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen mit Nivellements (3.1.2007 - 1.3.2007) entlang der Linie BL1; Envisat ASAR 11.1.2007 - 22.3.2007,  $B_{\perp} = -110$  m (a) Gesamtprofil BL1 von Nord nach Süd mit DInSAR DSM (blau), DInSAR DTM (grün), Nivellement (rot), (b) Teilprofil BL1 0-1500 m (DSM, DTM, Niv), (c) Gesamtprofil BL1 mit DInSAR DSM (blau), DInSAR SRTM (grün), Nivellement (rot), (d) Teilprofil BL1 0-1500 m (DSM, SRTM, Niv).

Da BL1 auch durch bebaute Bereiche führt, kommt es bei Verwendung des DTM zu leichten Überschätzungen der Senkungen im nördlichen (0-1500 m) und südlichen Bereich (2700-3700 m) (Höhen siehe Abb. 5.1 b). Aufgrund der relativ großen zeitlichen Differenzen (DInSAR-Zeitraum ist 13 Tage länger!) weisen die DInSAR-Ergebnisse teilweise deutlich höhere Senkungen um etwa 5-10 mm auf. Durch die relativ kleine Basislinie ( $B_{\perp} = -111$  m) und die geringen Höhenabweichungen zwischen dem DSM und dem SRTM Höhenmodell sind keine signifikanten Differenzen zwischen den Messergebnissen zu sehen (Abb. 5.10 c-d). Im Senkungsmuldenzentrum treten bei allen Ergebnissen Phasenabwicklungsfehler auf, die bei den verwendeten Daten einer vertikalen Verschiebung von 30.5 mm entsprechen.

Der Vergleich der DInSAR-Ergebnisse in Abb. 5.11 soll zum einen zeigen wie präzise radarinterferometrische Messungen mit Envisat ASAR sein können, trotz geringerer Bodenaufösung im Vergleich zu den neueren Sensoren, zum anderen die Unterschiede der Auswirkungen von Höhenfehlern bei Nutzung unterschiedlich gerichteter Basislinien nochmals verdeutlichen. In Bereichen mit guten Kohärenzen betragen die Höhenunterschiede zwischen dem NEXTMap DSM und DTM meist etwa 5 m (Abb. 5.1 b). Bei Basislinien von 269 m bzw. 293 m können somit Messfehler von theoretisch ca. 5.5 mm bei Verwendung von Geländemodellen auftreten. Aufgrund der Filterung vor der Phasenabwicklung werden die Fehler reduziert und betragen meistens 2-3 mm wie die Beispiele zeigen. Bei negativen Basislinien (Abb. 5.11 a-f) werden die Senkungen in den DTM-Ergebnissen sichtbar überschätzt, während die DSM-Ergebnisse die geringsten Differenzen zum Nivellement aufweisen (Abb. 5.11 d-e). Die Unterschiede zwischen den DSM- und SRTM-Ergebnissen sind dagegen wieder sehr gering, zeigen jedoch zum Teil eine größere Streuung bei Verwendung des SRTM DHMs. Außerdem werden die Senkungen im Bereich der kleinen Halde überschätzt bzw. führen zu Dekorrelationen bei Verwendung von SRTM. Bei positiven Basislinien liegen die Messwerte der vertikalen Verschiebungen von den DTM-Ergebnissen über denen der DSM-Ergebnisse, und stimmen somit augenscheinlich besser mit dem Nivellement überein. Die Differenz-Berechnung zeigt jedoch, dass die DSM Ergebnisse um  $2.6 \text{ mm} \pm 3.4 \text{ mm}$  im Bereich von 0-1600 m vom Nivellement abweichen, währenddessen die DTM-Ergebnisse um  $-6.5 \text{ mm} \pm 5.3 \text{ mm}$  differieren. Die stärkere Streuung, vermutlich aufgrund der Höhenfehler, ist deutlich im Bereich 500-800 m erkennbar (Abb. 5.11 k). Die Differenzen von etwa 3 mm zum Nivellement könnten wiederum auf die Abweichungen der zeitlichen Betrachtungsräume (DInSAR 8 Tage länger!) zurückzuführen sein. Bei Verwendung von SRTM-Daten kommt es zu stärkeren Dekorrelationen im Interferogramm, was sich auch im Profillinien-Diagramm widerspiegelt (Abb. 5.11 l).

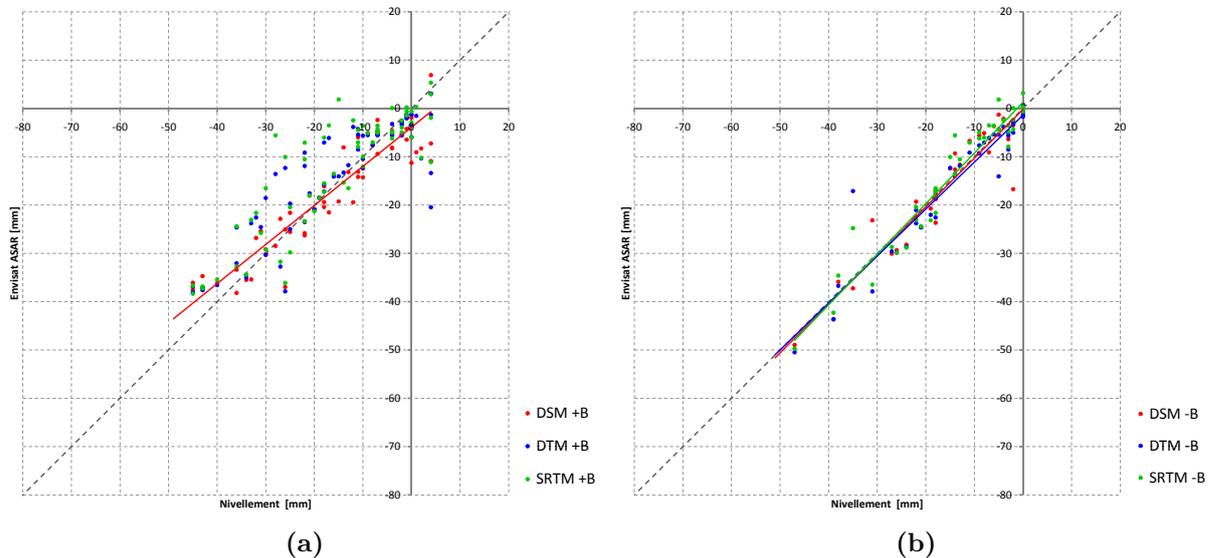
Für die Ableitung statistischer Kennwerte wurden Vergleiche entlang BL1 für fünf Interferogramme durchgeführt. Die Ergebnisse in Tab. 5.1 lassen gleiche Schlußfolgerungen wie bei den TerraSAR-X Ergebnissen zu. D.h. bei Verwendung positiver Basislinien liegen die abgeleiteten Bodenbewegungen oberhalb vom Nivellement (im Mittel negative Differenzen  $\text{Niv} - \text{DInSAR}$ ) bei Nutzung eines Geländemodells wie dem NEXTMap DTM (vgl. auch Abb. 5.12), und bei negativen Basislinien liegen die Werte unterhalb, d.h. Senkungen werden überschätzt. Die Messdifferenzen zwischen den DInSAR-Ergebnissen und Nivellements sind relativ klein, besitzen jedoch größere Standardabweichungen im Vergleich zu TerraSAR-X in der Größenordnung von etwa  $\pm 5 \text{ mm}$  auf. Die SRTM-Ergebnisse zeigen mit  $-1.9 \text{ mm} \pm 5.9 \text{ mm}$  die größten Abweichungen zum Nivellement, was auch in den Beispielen sichtbar wurde. Die größere Streuung der Messwerte bei positiven Basislinien (Abb. 5.12 a) ergibt sich durch die Qualität der ausgewählten Interferogramme. Grundsätzlich zeigen die Streudiagramme, dass bei Verwendung des NEXTMap DTMs und SRTM DHMs größere Streuungen auftreten.

Die Ergebnisse veranschaulichen, dass bei der radarinterferometrischen Erfassung von Bodenbewegungen mittels Envisat ASAR Daten das NEXTMap DSM am besten für die topographische Phasenkorrektur geeignet ist. Die Untersuchungen zeigen, dass Genauigkeiten von  $\pm 4.4 \text{ mm}$  bei einer mittleren Abweichung von  $0.7 \text{ mm}$  möglich sind. Die Beispiele in Abb. 5.9 verdeutlichen andererseits, dass in Vegetationsbereichen ein Geländemodell,



**Abbildung 5.11.:** Vergleich der radarinterferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen mit Nivellements anhand von zwei Envisat ASAR Beispielen entlang der Linie BL1. Beispiel 1 (a-f) DInSAR 10.4.2008 - 28.8.2008 mit  $B_{\perp} = -293$  m im Vergleich zum Nivellement vom 18.4.2008 - 26.8.2008; Beispiel 2 (g-l) 18.10.2007 - 28.8.2008 mit  $B_{\perp} = +269$  m im Vergleich zum Nivellement vom 14.10.2007 - 26.8.2008; (a,g) DInSAR mit NEXTMap DSM, (b,h) DInSAR mit NEXTMap DTM, (c,i) DInSAR mit SRTM-XC, (d,j) Gesamtprofil BL1 mit DInSAR DSM (blau), DInSAR DTM (grün), Nivellement (rot), (e,k) Teilprofil BL1 0-1500 m DInSAR (DSM, DTM, Niv), (f,l) Teilprofil BL1 0-1500 m DInSAR (DSM, SRTM, Niv)

wie z.B. das NEXTMap DTM, genauere Ergebnisse liefert. Auswertungen in Vegetationsbereichen sind jedoch nur möglich in Wintermonaten, wenn die Flächen weitestgehend laubfrei sind, so dass die Höhe der Phasenzentren stark sinkt, d.h. größere Eindringtiefen möglich sind.

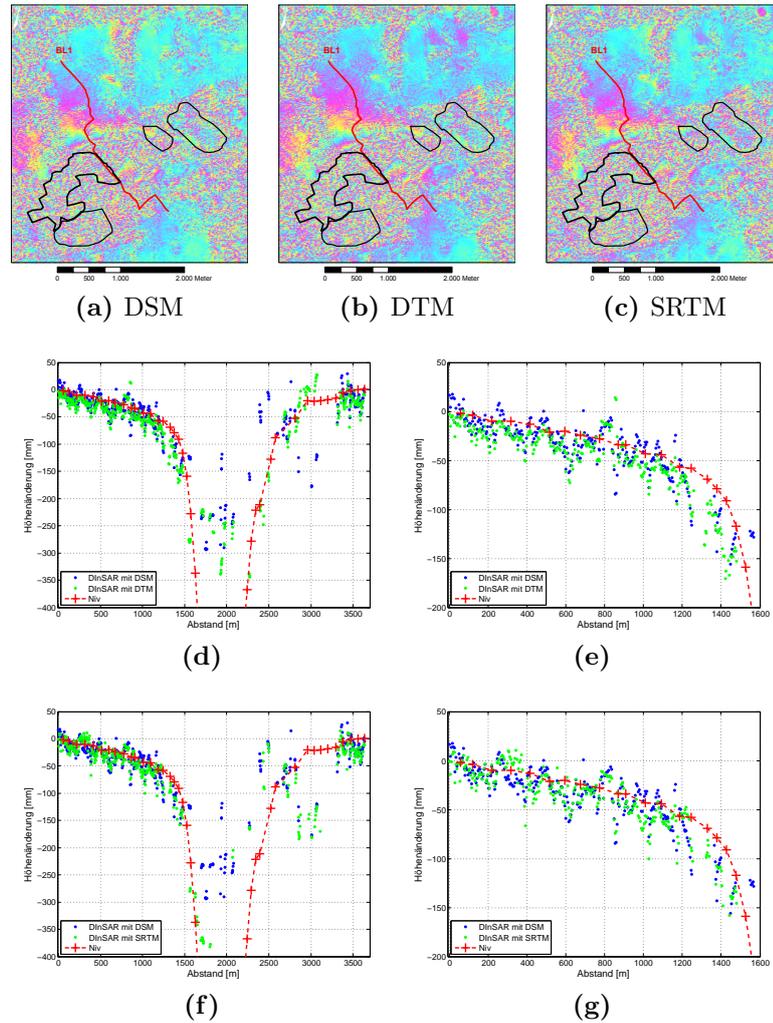


**Abbildung 5.12.:** Streudiagramme der Bodenbewegungen abgeleitet aus den Nivellements (X-Achse) und Envisat ASAR DInSAR-Messungen (Y-Achse) bei Verwendung unterschiedlicher DHMs zur topographischen Korrektur: NEXTMap DSM (rot), NEXTMap DTM (blau), SRTM-XC (grün); Unterscheidung der Ergebnisse bei Nutzung von Interferogrammen (a) mit positiver und (b) negativer räumlicher Basislinie. Für einige Datensätze ist die lineare Regressionskurve mit dargestellt, wenn dies sinnvoll erschien.

### 5.3. ALOS PALSAR Ergebnisse

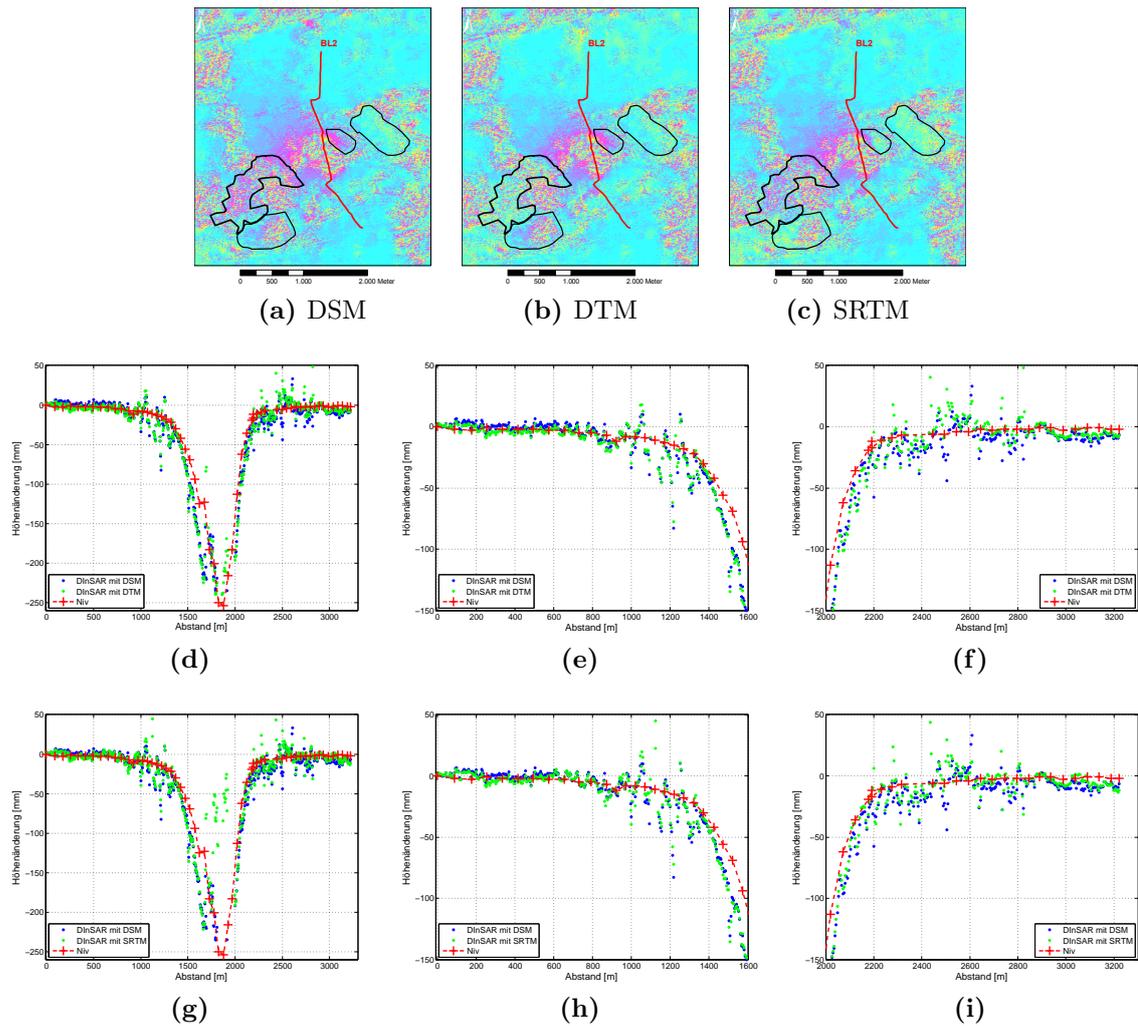
Für die Validierung von L-Band Messungen stehen Daten von zwei Tracks des ALOS PALSAR Sensors zur Verfügung, deren Aufnahmezeitpunkte häufig mit denen des Nivellements übereinstimmen. Aufgrund der meistens guten Kohärenzen, auch bei sehr großen zeitlichen sowie räumlichen Basislinien, konnten 8 Interferogramme mit Basislinien von 740-2059 m für die Validierung genutzt werden.

Höhenfehler führen zu Dekorrelationen (Rauschen) in Interferogrammen in Abhängigkeit von der Basislinie. Wie das Beispiel in Abb. 5.13 zeigt, weisen die abgeleiteten Bodenbewegungen aus Interferogrammen mit Basislinien ab etwa 1500 m sehr große Streuungen (10-20 mm) auf. Je kleiner die Basislinien werden, umso kleiner sind grundsätzlich auch die Streuungen; vgl. das Beispiel in Abb. 5.14 mit einer Streuung von 5 mm im Abschnitt 0-800 m. Unterschiede bzgl. der Streuung bei Verwendung verschiedener Höhenmodelle werden in den Profillinien-Diagrammen kaum sichtbar. Jedoch zeigt die Statistik in Tab. 5.1 eine geringe Zunahme der Streuungen bei Verwendung des NEXTMap DTMs und SRTM DHMs im Gegensatz zur Nutzung eines Oberflächenmodells wie dem NEXTMap DSM.



**Abbildung 5.13.:** Vergleich der radarinterferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen mit Nivellements (19.7.2007 - 27.7.2009) entlang der Linie BL1; ALOS PALSAR Track 645 28.7.2007 - 2.8.2009,  $B_{\perp} = -1729$  m; Differentielle Interferogramme bei Verwendung (a) des NEXTMap DSM, (b) des NEXTMap DTM und (c) des SRTM-XC DHMs für die topographische Phasenkorrektur; (d) Gesamtprofil BL1 von Nord nach Süd mit DInSAR DSM (blau), DInSAR DTM (grün), Nivellement (rot), (e) Teilprofil BL1 0-1600 m DInSAR (DSM, DTM, Niv), (f) Gesamtprofil BL1 mit DInSAR DSM (blau), DInSAR SRTM (grün), Nivellement (rot), (g) Teilprofil BL1 0-1600 m DInSAR (DSM, SRTM, Niv).

Gleichmäßige Höhenfehler, wie sie bei städtischen Bereichen und Verwendung eines Geländemodells auftreten, zeigen sich wie auch bei TerraSAR-X und Envisat ASAR als typische Phasenoffsets in den Interferogrammen, was sich wiederum in den abgeleiteten Bodenbewegungen deutlich widerspiegelt. Bei negativen Basislinien, wie im Beispiel in Abb. 5.13 d-e, werden die Senkungen bei Verwendung des DTMs um durchschnittlich 10 mm im Abschnitt 0-1200 m (Höhendifferenz DSM-DTM  $\approx 5$  m) überschätzt. Nach Berechnungen entsprechend Formel 4.1 sollten die Messunterschiede etwa doppelt so hoch sein ( $\partial\Delta r_z = 21$  mm). Durch Filterung der Interferogramme und die Wahl des Referenzpunktes sind die Messdifferenzen reduziert. Entlang der Linie BL1 bewirken die relativ geringen Höhenunterschiede zwischen dem NEXTMap DSM und SRTM DHM (Abb. 5.1 b)

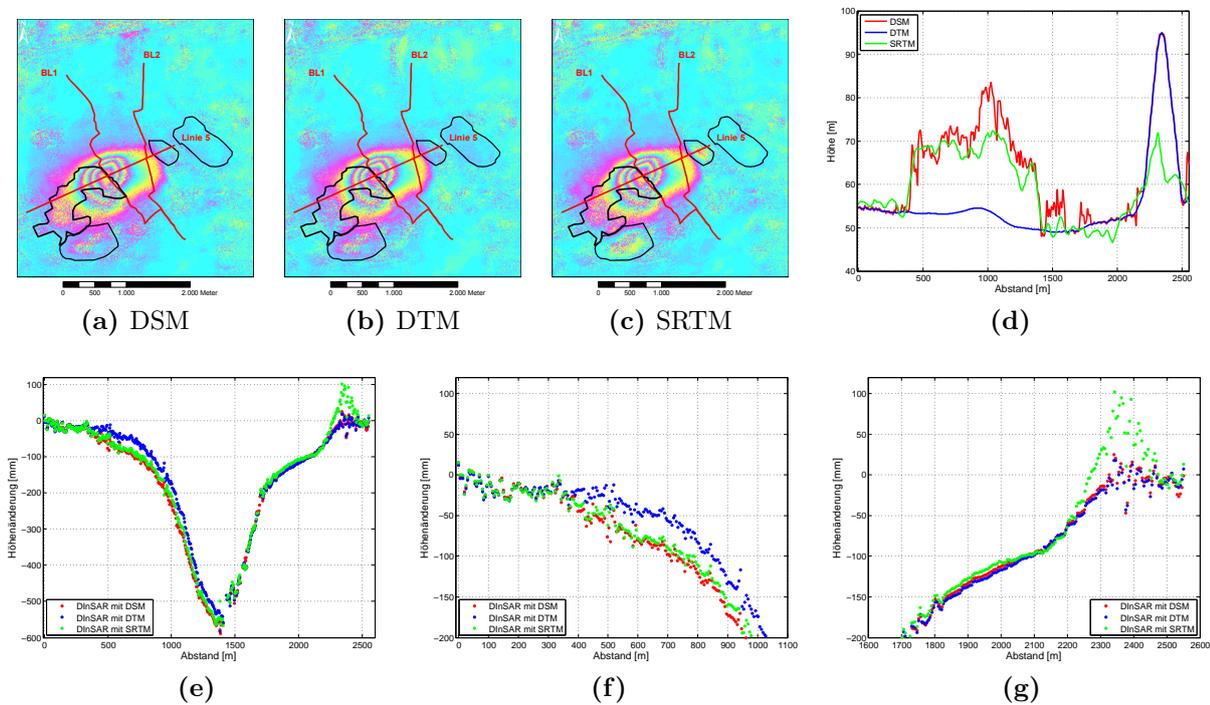


**Abbildung 5.14.:** Vergleich der radarinterferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen mit Nivellements (27.7.2007 - 23.10.2007) entlang der Linie BL2; ALOS PALSAR Track 645 28.7.2007 - 28.10.2007,  $B_{\perp} = +971$  m; Differentielle Interferogramme bei Verwendung (a) des NEXTMap DSM, (b) des NEXTMap DTM und (c) des SRTM-XC DHMs für die topographische Phasenkorrektur; (d) Gesamtprofil BL2 von Nord nach Süd mit DInSAR DSM (blau), DInSAR DTM (grün), Nivellement (rot), (e) Teilprofil BL2 0-1600 m DInSAR (DSM, DTM, Niv), (f) Teilprofil BL2 2000-3300 m DInSAR (DSM, DTM, Niv), (g) Gesamtprofil BL2 mit DInSAR DSM (blau), DInSAR SRTM (grün), Nivellement (rot), (h) Teilprofil BL2 0-1600 m DInSAR (DSM, SRTM, Niv), (i) Teilprofil BL2 2000-3300 m DInSAR (DSM, SRTM, Niv).

keine signifikanten Messunterschiede bei einer Basislinie von  $-1729$  m. Auch bei kleineren Basislinien (vgl. das Beispiel in Abb. 5.14 g-i) zeigen die SRTM-Ergebnisse kaum Unterschiede gegenüber den DSM-Ergebnissen entlang der Beobachtungslinie BL2. Wie bei den DTM-Ergebnissen liegen die abgeleiteten Bodenbewegungen jedoch etwa 3-5 mm oberhalb der DSM-Ergebnisse im südlichen Bereich der Linie BL2 (Abb. 5.14 f+i bei 2500-3300 m), aufgrund der größeren Höhenabweichungen zwischen DSM und SRTM (Abb. 5.2 b). Damit ergeben sich bei positiver Basislinie negative Phasendifferenzen, die zu einer Unterschätzung der Senkungen führen. Die größeren Messdifferenzen der DInSAR-Ergebnisse

im Vergleich zum Nivellement entlang BL2 (Abb. 5.14 d+g; 1400-2000 m) sind entweder auf atmosphärische Störungen im Interferogramm zurückzuführen oder auf Fehler im Nivellement. Phasenabwicklungsfehler können ausgeschlossen werden, da diese einem Phasensprung von 151 mm entsprechen. Die Differenzen liegen jedoch meist unter 50 mm im Abschnitt 1400-1600 m. An der Position 1600 m ist eine deutliche Stufe im Nivellement erkennbar, die auf einen Fehler schließen lässt. Eine sehr gute Übereinstimmung der DInSAR-Messungen mit dem Nivellement an den Senkungsmuldenflanken, auch bei Senkungen von bis zu 200 mm, zeigt das Ergebnis im Anhang in Abb. E.5. Nicht erfasste Bewegungen im zentralen Bereich der Senkungsmulde sind hauptsächlich auf zeitliche Dekorrelationen bei landwirtschaftlichen Flächen zurückzuführen.

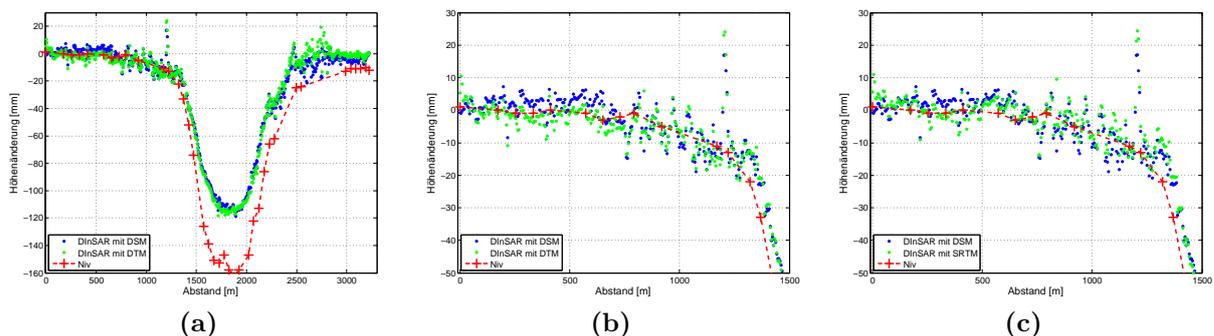
Die Unterschiede zwischen den DInSAR-Messungen im Bereich der Halde und der Vegetation (Linie 5) sind in Abb. 5.15 zu sehen.



**Abbildung 5.15.:** Beispiel Vegetation und Halde: Vergleich der radarinterferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen bei Verwendung unterschiedlicher Höhenmodelle entlang der Linie 5 von West nach Ost; ALOS PALSAR Track 644 28.11.2008 - 28.2.2009 mit  $B_{\perp} = +1020$  m; DInSAR mit (a) NEXTMap DSM, (b) NEXTMap DTM, (c) SRTM-XC; (d) Höhen DSM (rot), DTM (blau), SRTM (grün); (e) Gesamtprofil Linie 5 mit DInSAR DSM (blau), DInSAR DTM (grün), DInSAR SRTM-XC (rot); (f) Teilprofil Linie 5 0-1100 m DInSAR (DSM, DTM, SRTM), (g) Teilprofil Linie 5 1600-2600 m DInSAR (DSM, DTM, SRTM).

Bei einer für ALOS relativ kleinen Basislinie von +1020 m treten signifikante Messdifferenzen aufgrund der Höhenunterschiede (DOM - DGM) sowie der ungenügenden Aktualität der SRTM-Daten auf. Unter der Annahme, dass das NEXTMap DTM im Waldbereich am besten die Höhe der Phasenzentren widerspiegelt (vgl. Kapitel 4.4.2) findet bei Verwendung des DSM- und SRTM-DHMs eine Überschätzung der Senkungen von maximal

60 mm (beim DSM, Position 1041 m) bzw. 40 mm (beim SRTM, Position 1118 m) im Vegetationsbereich statt (Abb. 5.15 e-f). Die Ergebnisse liegen im Mittel um 12-13 mm unter den theoretisch berechneten Messdifferenzen von 73 mm bei einem Höhenunterschied von maximal 26.6 m (DSM-DTM) und 52 mm bei einem Höhenunterschied von maximal 19 m (SRTM-DTM). Durchschnittlich beträgt die Abweichung 33 mm (beim DSM), und 25 mm (beim SRTM). Im Bereich der Halde beträgt die maximale Messdifferenz zwischen den DSM/DTM- und SRTM-Ergebnissen 97 mm bei einer Höhendifferenz an der Position 2370 m von etwa 31 m (Abb. 5.15 g). Der Messfehler liegt somit sogar über dem theoretisch berechneten Wert von 85 mm. Im Bereich 1800-2050 m liegen die SRTM-Ergebnisse um etwa 10 mm oberhalb der DTM-Ergebnisse, aufgrund des Höhenfehlers (vermutlich vom SRTM-DHM) im bebauten Bereich (Abb. 5.15 d). Eine Bewertung der Zuverlässigkeit der Messergebnisse erfolgt durch den Vergleich der DInSAR-Ergebnisse in Abb. 5.15 a-c mit den Nivellementwerten der Linie BL1 und BL2. Die Messdifferenzen entlang der Linie BL1 sind beträchtlich (vgl. im Anhang Abb. E.4), zum einen aufgrund des fehlerhaften Nivellements (vgl. Kapitel 5.1), zum anderen aufgrund der großen zeitlichen Differenz (Niv-Zeitraum ist 41 Tage länger!). Besser eignet sich die Linie BL2 als Referenz, zumindest im nördlichen Bereich (Abb. 5.16 a-b; 0-1300 m), wo die Differenzen zwischen den DInSAR-Messungen und Nivellements sehr klein sind. Im weiteren Verlauf der Linie werden die Senkungen deutlich unterschätzt, was vermutlich auf die zeitliche Differenz zwischen den Messzeitpunkten (DInSAR ist 16 Tage kürzer!) zurückgeführt werden kann.

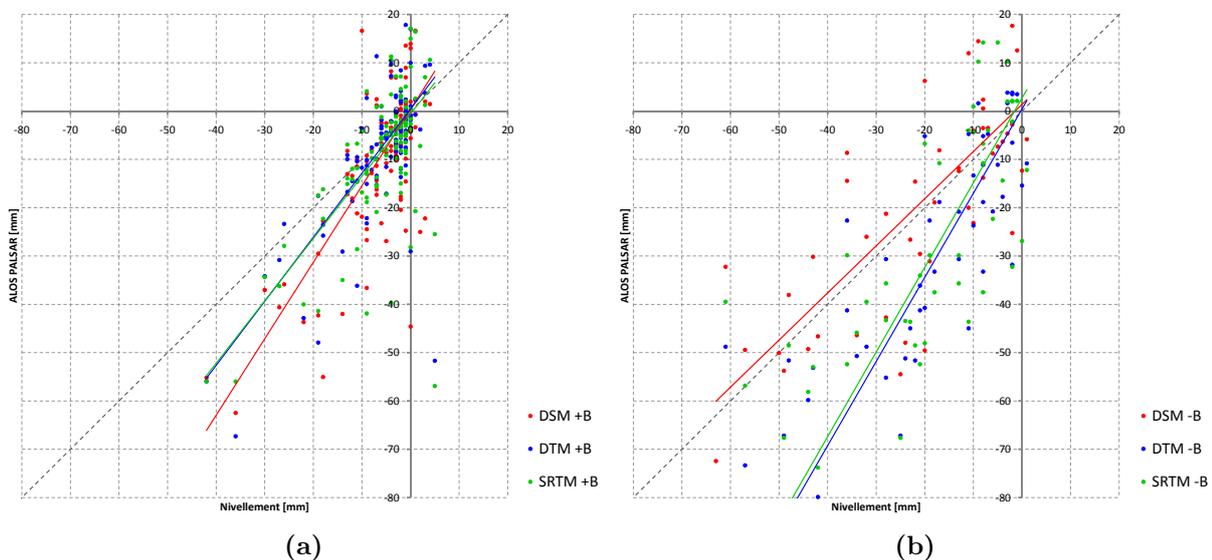


**Abbildung 5.16.:** Vergleich der radarinterferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen mit Nivellements (28.11.2008 - 16.3.2009) entlang der Linie BL2; ALOS PALSAR Track 644 28.11.2008 - 28.2.2009 mit  $B_{\perp} = +1020$  m; (a) Gesamtprofil BL2 von Nord nach Süd mit DInSAR DSM (blau), DInSAR DTM (grün), Nivellement (rot), (b) Teilprofil BL2 0-1500 m DInSAR (DSM, DTM, Niv), (c) Teilprofil BL2 0-1500 m DInSAR (DSM, SRTM, Niv).

Für die Berechnung der statistischen Werte in Tab. 5.1 und Darstellung der Streudiagramme in Abb. 5.17 wurden die DInSAR-Messungen von 8 Interferogrammen ausgewählt. Bei den Interferogrammen mit positiven Basislinien sind die Senkungsbeträge deutlich niedriger im Vergleich zu denen mit negativer Basislinie (Abb. 5.17). Aufgrund dessen sowie der größeren negativen Basislinien der verwendeten Interferogramme sind die Streuungen gegenüber dem Nivellement bei negativen Basislinien deutlich größer (Abb. 5.17 b). Je nach Richtung der Basislinie werden die Senkungen in den DTM- und SRTM-Ergebnissen entweder stärker als die DSM-Messung unterschätzt (+B), d.h. im Mittel um 1.5 mm (DTM) bzw. 0.7 mm (SRTM), oder überschätzt (-B), d.h. im Mittel um 11.2 mm (DTM) bzw.

9 mm (SRTM) (vgl. auch Tab. 5.1). Bei negativen Basislinien stimmen die DSM-DInSAR Ergebnisse im Mittel relativ gut mit dem Nivellement überein (Abb. 5.17b). Die Abweichungen betragen durchschnittlich  $-2.3$  mm mit einer Standardabweichung von  $\pm 15.0$  mm (vgl. Tab. 5.1). Die mittleren Abweichungen bei positiven Basislinien betragen dagegen 2.9 mm, was anhand der Regressionsgeraden in Abb. 5.17 a jedoch nicht gut wiedergegeben wird. Die Standardabweichung ist deutlich kleiner mit  $\pm 12.7$  mm.

Die Ergebnisse in Tab. 5.1 zeigen, dass bei der radarinterferometrischen Erfassung von Bodenbewegungen mittels ALOS PALSAR Daten das NEXTMap DSM allgemein am besten für die topographische Phasenkorrektur geeignet ist. Die Ergebnisse beziehen sich jedoch nicht auf Vegetationsbereiche, wie das Beispiel in Abb. 5.15 zeigt. Für Vegetationsbereiche standen keine Nivellements zur Verfügung. Die Messgenauigkeiten des ALOS PALSAR Sensors betragen durchschnittlich 13-14 mm. Da Höhenfehler systematische Fehler sind, führen sie zu zusätzlichen Offsets bei den erfassten Bodenbewegungen, in Abhängigkeit von der Länge und Richtung der Basislinie sowie der Größe der Höhenfehler.



**Abbildung 5.17.:** Streudiagramme der Bodenbewegungen abgeleitet aus den Nivellements (X-Achse) und ALOS PALSAR DInSAR-Messungen (Y-Achse) bei Verwendung unterschiedlicher DHMs zur topographischen Korrektur: NEXTMap DSM (rot), NEXTMap DTM (blau), SRTM-XC (grün); Unterscheidung der Ergebnisse bei Nutzung von Interferogrammen (a) mit positiver und (b) negativer räumlicher Basislinie. Für einige Datensätze ist die lineare Regressionskurve mit dargestellt, wenn dies sinnvoll erschien.

---

# Ergebnisse und Ausblick

---

Mit den neuen hochauflösenden satellitengetragenen SAR-Sensoren sind die Qualitätsansprüche und damit auch die Anforderungen an die Messgenauigkeiten bei Bodenbewegungsüberwachungen deutlich gestiegen. Dies verlangt nach einer genauen Beschreibung und Quantifizierung der Messfehler. Die Auswirkungen von Höhenfehlern in Interferogrammen wurden bereits vielfach exemplarisch, häufig im Zusammenhang mit Geokodierungsfehlern oder der Höhenfehlerschätzung bei der PSI-Methode präsentiert. Eine ausführliche Darstellung der Zusammenhänge zwischen Höhenmodellfehlern und deren Auswirkung auf die Bodenbewegungsmessung, genauer gesagt die Genauigkeiten von Höhenänderungsmessungen, bei Auswertung einzelner Interferogramme wurde bisher nicht durchgeführt. Ziel der vorliegenden Arbeit war es diese zu beschreiben und anhand praktischer Untersuchungen zu bewerten. Im Ergebnis können Empfehlungen gegeben werden, die Anwendern nützlich sein sollen im Hinblick auf die Einschätzung möglicher Höhenmodellbedingter Messfehler und deren Beachtung bei der Interpretation von Bodenbewegungen.

Wie anhand der theoretischen Untersuchungen in Kapitel 3 gezeigt wird, können Höhenmodellfehler beträchtliche Auswirkungen auf die Genauigkeit der Bodenbewegungsmessung haben. In Abhängigkeit von der Aufnahmegeometrie, insbesondere der Basislinie und des Blickwinkels, führen speziell bei den neuen X-Band Sensoren selbst kleine Höhenfehler bereits zu großen Phasenfehlern, die sehr schnell in den Interferogrammen sichtbar werden. Beim L-Band sind dagegen topographiebedingte Fehler kaum wahrnehmbar. Trotz allem sind die Auswirkungen auf die abgeleiteten Bodenbewegungen beim L-Band deutlich größer als beim X-Band, was fast ausschließlich auf die größeren räumlichen Basislinien

(bei ALOS PALSAR) zurückzuführen ist. Aufgrund der Zunahme der radarinterferometrischen Messgenauigkeiten bei kleineren Wellenlängen (vgl. Kapitel 5) sind zur Einhaltung der sensorspezifischen oberen Genauigkeitsgrenzen nur Interferogramme mit maximalen Basislinien sowie Höhenmodelle mit entsprechender Auflösung und Genauigkeit zu verwenden (vgl. Kapitel 6.1.2).

Die Sensitivitätsanalyse in Kapitel 3 zeigt, dass Höhenfehler sich nicht nur unmittelbar und signifikant auf die Simulation der topographischen Phasen auswirken, sondern zu großen Fehlern bei der Geokodierung der Höhendaten ins Radarsystem führen können. Während die Auswirkungen in Azimutrichtung vernachlässigbar sind, können die Rängeverschiebungen beträchtlich sein und bei ungenügender Beachtung zu starken Verzerrungen sowohl der Höhenmodelle als auch der radarinterferometrischen Messergebnisse führen. Geokodierungsfehler sind speziell bei den neueren Sensoren vermeidbar bzw. reduzierbar, selbst unter Verwendung relativ ungenauer Höhenmodelle (vgl. Kapitel 6.1.1).

Die Ausarbeitung der im folgenden Abschnitt beschriebenen Empfehlungen basiert sowohl auf den theoretischen als auch den praktischen Untersuchungen und der damit verbundenen Validierung. Die für den Vergleich von der RAG zur Verfügung gestellten Beobachtungslinien erwiesen sich im Nachhinein aufgrund ihres räumlichen Verlaufs als nicht ideal, um die geplante Zielstellung der Arbeit, hinsichtlich der Untersuchung höhenfehlerbedingter Einflüsse auf die Messgenauigkeit in topographisch sehr unterschiedlichen Gebieten (Stadt, Wald, etc.), zu erreichen.

Grund dafür sind die wegen der ländlichen Prägung des Testgebiets sowie die relativ niedrige Bebauung, auftretenden relativ kleinen Höhendifferenzen zwischen den verwendeten DHMs (BL1:  $5.2\text{ m} \pm 4.5\text{ m}$  (DSM - DTM),  $0.8\text{ m} \pm 4.5\text{ m}$  (DSM - SRTM); BL2:  $2.0\text{ m} \pm 2.7\text{ m}$  (DSM - DTM),  $0.8\text{ m} \pm 3.1\text{ m}$  (DSM - SRTM)).

## **6.1. Empfehlungen zur Reduktion DHM-bedingter Messfehler**

Zur Einhaltung bestimmter Messgenauigkeiten bei der radarinterferometrischen Erfassung von Höhenänderungen sollte der Einfluss DHM-bedingter Fehler so weit wie möglich reduziert werden. Dies ist grundsätzlich realisierbar durch Auswahl eines geeigneten Höhenmodells und Beschränkung der Auswertungen auf Interferogramme mit relativ kleinen Basislinien.

Da das Angebot an Höhenmodellen für die meisten Gebiete weltweit sehr begrenzt ist und interferometrische Paare mit wünschenswerten Basislinien meist nicht vorhanden sind, ist eine a posteriori Fehlerabschätzung vor der Ableitung der Höhenänderungen aus den Differentiellen Interferogrammen empfehlenswert. Eine geeignete Vorgehensweise bei DInSAR-Auswertungen wäre:

1. Abschätzung der mittleren Fehler (Standardabweichung) der DHM-Höhen sowie evtl. sehr großer lokaler Fehler, unter Berücksichtigung der Aktualität, der Bodenauflösung, der Höhengenaugkeit und der Topographie (Stadt, Wald, Acker), d.h. Ähnlichkeit zur tatsächlichen Rückstreuoberfläche (DOM vs. DGM).
2. Möglichst exakte Geokodierung des DHM ins Radarkoordinatensystem (vgl. Kapitel 6.1.1) und Abschätzung möglicher lokaler Verschiebungen (Formel 3.9) und daraus resultierender Höhenfehler in kritischen Übergangsbereichen (z.B. Stadt- und Vegetationsgrenze) sowie bei größeren Geländeneigungen ( $\alpha > 10^\circ$ ) durch Multiplikation mit dem Tangens des Höhenanstiegs.
3. Berechnung des Messfehlers für vertikale Verschiebungen  $\partial\Delta r_z$  durch Einsetzen des geschätzten mittleren Höhenfehlers und der maximalen Basislinie aller geplanten Auswerte-Paare in Formel 4.1.

Beispielsweise weichen 67% der SRTM-Höhen um etwa  $\pm 4$  m (90% sogar  $\pm 6$  m) von den als fehlerfrei angenommenen NEXTMap DSM Höhen im Testgebiet ab. Bei Auswertung von TerraSAR-X Daten ( $\theta_i=41^\circ$ ) und Anwendung der empfohlenen initialen Geokodierung betragen die Verschiebungen meist weniger als 3 m (entspricht ca. 1 Pixel bei einem  $ML=2$ ). Die verschiebungsbedingten Höhenfehler sind an den meisten Stellen somit vernachlässigbar gegenüber den tatsächlichen Höhenfehlern der Eingangshöhen. Bei Halden ( $\alpha \approx 9^\circ$  in Range), die bereits im SRTM-DHM vorhanden sind, bewirken Verschiebungen von 3 m einen zusätzlichen Höhenfehler von etwa 0.5 m. Die maximale Basislinie der zu verwendenden Interferogramme beträgt 335 m. Damit ergeben sich Messfehler von meist maximal  $\pm 4$  mm. Die Richtung ist abhängig von der Richtung des Höhenfehlers und der der Basislinie (+B, -B). Im Bereich der im Modell nicht vorhandenen Halden mit Höhenfehlern von maximal 40 m liegen die Messfehler um das 10fache höher. Da die geschätzten Fehler sehr abhängig von der Topographie und deren Veränderung sind, sollte die Fehlerabschätzung immer lokal differenziert für das ausgewertete Gebiet erfolgen z.B. im Stadtbereich, an Böschungen etc.

### 6.1.1. Wahl eines geeigneten Höhenmodells

Grundsätzlich ist für die topographische Phasenkorrektur nur ein direkt aus der gleichen Abbildungsgeometrie abgeleitetes InSAR-DHM geeignet, da es exakt die Höhe der Phasenzentren für jedes Pixel wiedergibt, auch in Layover-Bereichen. Die direkte DHM-Ableitung aus zwei SAR-Aufnahmen wird jedoch häufig (teilweise) verhindert oder ist fehlerhaft, infolge von:

1. Dekorrelationen,
2. zu kleinen räumlichen Basislinien, wodurch nur eine geringe Höhenauflösung möglich ist,
3. zu großen zeitlichen Basislinien, so dass Bewegungen innerhalb des Aufnahmezeitraums auftreten können, die größer als das Phasenrauschen sind.

Bei der *two-pass* Methode wird die topographiebedingte Phase basierend auf einem existierenden DHM berechnet. Da dessen Höhen niemals exakt der Rückstreuoberfläche einer Aufnahme entsprechen, auch nicht bei extrem hochauflösenden DHMs, werden die daraus resultierenden Höhenfehler direkt in die Bewegungsmessung übertragen.

Eine Reduktion der Höhenfehler ist möglich, wenn das verwendete DHM weitestgehend folgende Kriterien erfüllt:

1. Es sollte im Allgemeinen ein Oberflächenmodell sein.
2. Bei Bewegungsmessungen in Vegetationsbereichen ist jedoch ein DGM empfehlenswerter als ein DOM; bei angrenzender Bebauung ist eine Kombination aus DGM und DOM sinnvoll.
3. Es sollte eine möglichst hohe Aktualität besitzen, in Abhängigkeit von den topographischen Veränderungen wie z.B. großflächige Neuansiedlung, Aufschüttung von Halden, Fortschreiten eines Tagebaus, Hangrutschungen, etc. Die ausschließlich durch untertägigen Abbau verursachten Senkungen führen im Vergleich dazu meist zu relativ kleinen Höhenfehlern (max. 5 m in 10 Jahren), und erfordern selbst keine permanente Aktualisierung des DHMs. Gewöhnlich sollte das DHM trotz allem nicht älter als 5-10 Jahre in stark anthropogen und industriell geprägten Gebieten sein.
4. Es sollte eine möglichst sehr hohe Bodenauflösung und Höhengenaugigkeit besitzen. Hochauflösende DHMs sind prinzipiell immer am besten geeignet. Schlechtere Bodenauflösungen verursachen stärkere Dekorrelationen und höhere Messfehler.
5. Die DHM-Bodenauflösung sollte mindestens in der Größenordnung der Bodenauflösung der SAR-Daten sein, um u.a. auch Geokodierungsgenauigkeiten in der Größenordnung der SAR-Bodenauflösung erzielen zu können.
6. Datumsfehler sollten ausgeschlossen sein. Ein falsches Höhendatum der Höhendaten führt zu Geokodierungsfehlern, die zwar prinzipiell gut ausgeglichen werden können, allerdings ist dies sehr gebietsabhängig.

Die genannten Kriterien gelten für alle bekannten satellitengetragenen SAR-Sensoren und ergeben sich als Schlussfolgerung aus den in Kapitel 4 und 5 erzielten Ergebnissen. Punkt 2 trifft zwar theoretisch nicht beim X-Band zu, praktisch sind ganzjährliche Vegetationsbereiche (Wälder) bei Repeat-Pass Aufnahmen aber immer dekorreliert.

Die Erfassung von Bodenbewegungen in bebauten Gebieten, in denen verstärkt Layover-Effekte auftreten, kann sehr ungenau sein. Die resultierenden lokalen Messfehler sind meist nicht durch Auswahl eines DHMs mit besserer Auflösung und Höhengenaugigkeiten reduzierbar, sondern nur unter Einhaltung kleinerer Basislinien (vgl. Kapitel 6.1.2). Bei Verwendung von aus InSAR-Daten abgeleiteten DHM-Produkten, wie dem NEXT-Map DSM, können die Messfehler in Layover-Bereichen sogar noch verstärkt werden (vgl. Kapitel 4.4.3). Aus diesem Grund sollten Layover-Bereiche in den abgeleiteten Bodenbewegungskarten ausmaskiert werden. Der vom Layover-Effekt beeinträchtigte Bereich am Boden  $g_l$  ist abhängig von der Gebäudegeometrie (auch der Dachform), dem Abstand

zwischen den Gebäuden und dem Sensorblickwinkel bzw. genauer dem Einfallswinkel  $\theta_i$  bei satellitengetragenen Systemen. Er ergibt sich näherungsweise für ein einzelstehendes Gebäude über die Gebäudehöhe  $h$  mit  $g_l = h \cdot \cot \theta_i$ . In Slant-Range Entfernung verkleinert sich der beeinflusste Bereich  $r_l$  und kann berechnet werden über  $r_l = h \cdot \cos \theta_i$ . Die sich ergebenden topographiebedingten Phasenfehler innerhalb des Layover-Bereiches sind von der Länge der Basislinie abhängig (vgl. Kapitel 6.1.2). Ist  $r_l$  kleiner als die Slant-Range Auflösung, bewirkt der Layover maximal einen topographiebedingten Phasenfehler innerhalb einzelner Pixel, die durch Filterung eliminierbar sind. Beispielsweise bei einer Envisat ASAR Aufnahme mit  $\theta_i=23^\circ$  und einer Auflösung von  $\rho_r=9$  m müssten Gebäude eine Mindesthöhe von etwa 10 m besitzen, um Layover-Effekte in benachbarten Pixeln zu verursachen. Bei TerraSAR-X ( $\theta_i=23^\circ$ ,  $\rho_r=1$  m) kann der Effekt bereits bei Objekthöhen von 1.5 m auftreten.

Die Genauigkeit der Geokodierung eines DHMs ins Radarkoordinatensystem, welche Voraussetzung für die topographische Phasensimulation und -korrektur ist, ist u.a. abhängig von der Auflösung und Genauigkeit des DHMs. Ungenauigkeiten der Orbitdaten führen jedoch zu deutlich größeren Geokodierungsfehlern. Die daraus resultierenden initialen Fehler können unter Verwendung des Höhenmodells in einem zweiten Schritt verbessert werden (Feinregistrierung), was jedoch hohe DHM-Genauigkeiten voraussetzt. Bei Verwendung sehr präziser Orbitdaten ist es nicht immer ratsam eine Feinregistrierung durchzuführen, um starke höhenfehlerbedingte vor allem lokale Verzerrungen zu vermeiden. Für die Transformation eines DHMs ins Radarkoordinatensystem sowie die Rücktransformationen aller radarinterferometrisch abgeleiteten Ergebnisse sollte die initiale Zuweisungstabelle (LUT) verwendet werden. Eine Feinregistrierung sollte nicht durchgeführt werden, wenn hohe Genauigkeiten bei der initialen Geokodierung (max. mittlere Abweichung 1-2 Pixel), wie z.B. bei TerraSAR-X erreichbar sind, jedoch zusätzlich das verwendete DHM relativ ungenau, veraltet und/oder ein DGM ist (z.B. SRTM-XC, NEXTMap DGM, ältere Luftbild-DGMs). Bei größeren initialen Fehlern, wie sie z.B. bei Envisat ASAR aufgrund der Orbitungenauigkeiten auftreten, ist häufig nur unter Verwendung von hochauflösenden DOMs eine sehr präzise Registrierung erzielbar. Dies ist jedoch abhängig vom Gebiet und seinen topographischen Merkmalen.

Die Untersuchungen in Kapitel 4.3 zeigen, dass initialen Geokodierungsfehler von 1-2 Pixel, wie sie bei Daten von TerraSAR-X und ALOS PALSAR erzielbar sind, maximale Messfehler auch bei größeren Geländeanstiegen verursachen, die unterhalb der oberen Genauigkeitsgrenze des jeweiligen Sensors (vgl. Tab. 5.1) liegen. Dies gilt jedoch nur für Interferogramme mit Basislinien bis zu etwa 200 m bei TerraSAR-X und etwa 1500 m bei ALOS PALSAR. Die Envisat Simulationen zeigen, dass initiale Fehler von 2 Pixel und einer Basislinie von etwa 500 m Messfehler verursachen, die schlechter als die höchste Messgenauigkeit des Sensors sind. Aus diesem Grund sollten entweder die Geokodierungsgenauigkeit gesteigert werden bzw. nur Interferogramme mit kleinen Basislinien für die Bodenbewegungsanalysen genutzt werden. Für die Geokodierung sind somit grundsätzlich bei allen Sensoren Genauigkeiten von 1-2 Pixel anzustreben, um zusätzliche Höhenfehler, die durch Lageverschiebungen insbesondere in topographisch bewegtem Gelände entstehen können, zu vermeiden.

Abschließend kann die Frage gestellt werden: *Wie genau muss ein Höhenmodell sein, um eine bestimmte Messgenauigkeit zu erreichen?* Eine Beantwortung der Frage ist prinzipiell so nicht möglich bzw. sinnvoll, da Höhenfehler sich hauptsächlich aufgrund der Basislinienlänge im Interferogramm auswirken. Jedoch gilt: Je höher die Genauigkeit eines Höhenmodells ist, umso größere Basislinien sind bei den auszuwertenden Interferogrammen zulässig.

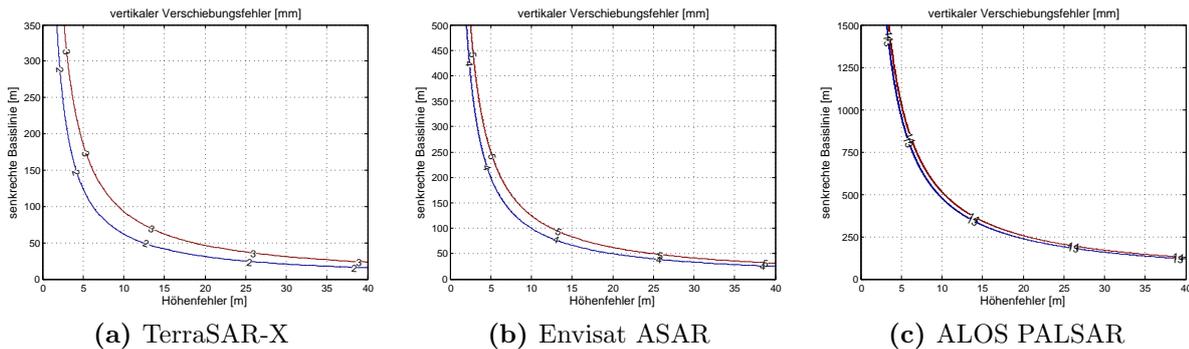
### 6.1.2. Beschränkung der räumlichen Basislinie

Die Basislinie und der Blickwinkel sind die entscheidenden aufnahmebedingten Parameter, die die Genauigkeit der Bodenbewegungsmessung in Abhängigkeit vom Höhenfehler beeinflussen. Je größer die Basislinie ist, umso stärker wirken sich Höhenfehler auf die abgeleiteten Bewegungsbeträge aus. Die Richtung der Basislinie ist ausschlaggebend, ob Bewegungen bei Überlagerung mit Höhenfehlern über- oder unterschätzt werden (vgl. Tab. 4.5).

Die obere Genauigkeitsgrenze  $\sigma_{\max}$  zur Erfassung vertikaler Bodenbewegungen mittels DInSAR liegt bei den betrachteten Sensoren bei etwa  $\pm 2\text{-}3\text{ mm}$  (TerraSAR-X),  $\pm 4\text{-}5\text{ mm}$  (Envisat ASAR) und  $\pm 13\text{-}14\text{ mm}$  (ALOS PALSAR) (vgl. Kapitel 5). Um diese Genauigkeiten auch in Hinblick auf topographiebedingte Fehler zu erreichen, sollte für die Basislinie  $B_{\perp}$  und den Höhenfehler  $\partial h$  folgende Bedingung, in Abhängigkeit von der Flughöhe  $H_{\text{sat}}$ , dem Blickwinkel  $\theta$  und Einfallswinkel  $\theta_i$ , eingehalten werden:

$$(B_{\perp} \cdot \partial h) < (\sigma_{\max} \cdot H_{\text{sat}} \cdot \tan \theta \cdot \cos \theta_i) \quad (6.1)$$

Für die untersuchten Daten ergeben sich die in Abb. 6.1 sichtbaren oberen Grenzen für die Basislinie in Abhängigkeit vom Höhenfehler.



**Abbildung 6.1.:** Maximale Basislinie in Abhängigkeit vom Höhenfehler, die zur Einhaltung sensorspezifischer Messgenauigkeiten notwendig sind: (a) TerraSAR-X ( $\theta_i=41^\circ$ ) mit  $\sigma_{\max}=\pm 2\text{-}3\text{ mm}$ , (b) Envisat ASAR ( $\theta_i=23^\circ$ ) mit  $\sigma_{\max}=\pm 4\text{-}5\text{ mm}$ , (c) ALOS PALSAR ( $\theta_i=38.7^\circ$ ) mit  $\sigma_{\max}=\pm 13\text{-}14\text{ mm}$ .

Da die topographiebedingten Messfehler gewöhnlich (deutlich) kleiner im Vergleich zu den theoretisch berechneten Werten sind (vgl. die Ergebnisse in Kapitel 4 und 5), aufgrund der Filterung vor der räumlichen Phasenabwicklung, ist die Einhaltung bestimmter

Genauigkeitsgrenzen auch mit leicht höheren Basislinien möglich. Anhand der Berechnungen sowie praktischen Untersuchungen können, in Abhängigkeit vom Sensor und des Überwachungsgebietes, maximale Basislinien vorgeschlagen werden (siehe Tab. 6.1). Diese sind notwendig, um die genannten oberen Genauigkeitsgrenzen für die Erfassung vertikaler Bodenbewegungen in etwa zu erreichen. Bei doppelt so großen Basislinien sind nur noch halb so hohe Genauigkeiten erzielbar. Je größer die Basislinie ist, umso größer sind jedoch auch die Dekorrelationen, so dass die Phasenabwicklung versagen kann.

**Tabelle 6.1.:** Empfehlung für die maximale Basislinienlänge zur Einhaltung der angegebenen vertikalen Messgenauigkeiten in Abhängigkeit vom Höhenfehler

	<b>TerraSAR-X (SM)</b> $\theta_i=41^\circ$	<b>Envisat ASAR</b> $\theta_i=23^\circ$	<b>ALOS PALSAR</b> $\theta_i=38^\circ$
Messgenauigkeit	$\pm 2\text{-}3$ mm	$\pm 4\text{-}5$ mm	$\pm 13\text{-}14$ mm
<u>Stadt</u>			
$\partial h < 20$ m	100 m	200 m	700 m
$\partial h \geq 20$ m	50 m	100 m	350 m
<u>Halden &amp; Böschungen</u>			
$\partial h < 5$ m	200 m	300 m	1000 m
$\partial h < 10$ m	100 m	150 m	500 m
$\partial h \geq 10$ m	<50 m	<100 m	<300 m
<u>Vegetation</u>			
$\partial h < 30$ m	—	100 m	250 m

Mit Zunahme des Blickwinkels  $\theta$  erhöhen sich die angegebenen Grenzen für die Basislinien bzw. umgekehrt. Bei größeren Blickwinkeln reduzieren sich zugleich Layover-Bereiche, führen jedoch vermehrt zu Schatten. Da das Verhältnis zwischen einem minimalen Blickwinkel von  $19^\circ$  und maximalen von  $45^\circ$  für den Faktor  $(\tan \theta \cdot \cos \theta_i)$  ungefähr 1:2 ist, bei einer mittleren Differenz  $\theta_i - \theta = 4^\circ$ , können sich die Werte in Tab. 6.1 um bis zu 50% verringern bzw. erhöhen.

Für DInSAR-Auswertungen in städtisch bebauten Gebieten sollten grundsätzlich nur sehr kleine Basislinien verwendet werden, da Höhenfehler nie auszuschließen sind (vgl. Kapitel 6.1.1). Die Anzahl, der sich ergebenden Phasenzyklen in Layover-Bereichen lässt sich anhand Formel 3.3 berechnen. Beispielsweise bei einer Gebäudehöhe von 20 m ergibt sich, bei einem TerraSAR-X Interferogramm mit einer Basislinie von 150 m, fast ein halber topographiebedingter Phasenzyklus innerhalb des von Layover beeinträchtigten Bereiches von 5.5 Pixel ( $ML=2$ ,  $\rho_r=1.364$  m) im Slant-Range Bild. Ein halber Phasenzyklus entspricht einem vertikalen Messfehler von etwa 10 mm, der theoretisch durch die räumliche Phasenabwicklung an der ersten Layover-Linie auftreten müsste. Bei einer Basislinie von nur 50 m verringert sich der Phasenfehler und damit auch der Messfehler um zwei Drittel und liegt mit 2.4 mm in der Größenordnung der maximal erreichbaren Messgenauigkeiten von TerraSAR-X.

## 6.2. Ausblick

Die in dieser Arbeit untersuchten Zusammenhänge zeigen, wie stark der Einfluss von Höhenmodellfehlern auf die Genauigkeit der radarinterferometrischen Bodenbewegungsmessung ist. Externe Höhenmodelle entsprechen im Allgemeinen nie exakt der Oberfläche, die sich durch die Höhe der Phasenzentren bei einer SAR-Aufnahme ergibt. Die resultierenden topographischen Phasenfehler sind bei der Auswertung einzelner Interferogramme nicht korrigierbar, jedoch bedingt reduzierbar.

Multi-Basislinien-Verfahren, wie die PSI-Technik erlauben die direkte Bestimmung von Höhenfehlern für einzelne Pixel. Jedoch können Fehlschätzungen auftreten, sobald mehrere dominante Rückstreuer innerhalb einer Auflösungszelle auftreten. Desweiteren treten häufig Korrelationen zwischen den geschätzten Bewegungen und Höhenfehlern auf. Da in die PSI-Auswertung lediglich ein zeitlich diskretes Höhenmodell einfließt und nur jeweils ein Höhenfehler pro Punkt geschätzt wird, ist die Frage nach den Messgenauigkeiten bei kontinuierlichen topographischen Veränderungen und der Auswertung langer Zeitreihen (z.B. 10 Jahre) nicht unberechtigt. Inwieweit die angesprochenen Fehlschätzungen der Höhenfehler in der PSI-Analyse, z.B. durch Verwendung genauerer Höhenmodelle, vermeidbar bzw. reduzierbar sind, müsste noch untersucht werden. Dies erfordert eine Genauigkeitsbetrachtung der geschätzten Höhenfehler an den PSI-Punkten, welche anhand von Referenzdaten z.B. echten 3D-Punktwolken (z.B. aus ALS-Daten) durchführbar wäre. Da fehlerhaft korrigierte Höhen Lageverschiebungen der PSI-Punkte in den geokodierten Ergebnissen verursachen, ist eine Bewertung der geschätzten Höhenfehler häufig sehr gut möglich.

Aufgrund der Komplexität der Rückstreuung in dicht bebauten Gebieten und der Zunahme der Anzahl dominanter Rückstreuer bei Verwendung kleinerer Wellenlängen hat die Notwendigkeit der Unterscheidung einzelner Rückstreuer innerhalb einer Auflösungszelle stark zugenommen. Neue Verfahren wie die SAR-Tomographie ermöglichen die Bestimmung der Höhenverteilung der einzelnen Rückstreuer. Mit den neuen hochauflösenden Sensoren, deren hohen Flexibilität bei der Aufnahme (zahlreiche Modi, Blickwinkel, kürzere zeitliche und räumliche Basislinien) sowie der Verfügbarkeit präziserer Orbitdaten, ist das Interesse an der SAR-Tomographie stark gestiegen. Obwohl die Anwendung der SAR-Tomographie mit satellitengestützten Systemen weiterhin begrenzt ist, besteht großes Potential bei den neuen Methoden, insbesondere im Hinblick auf die Eliminierung topographiebedingter Messfehler.

Auch die Entwicklungen bezüglich der Generierung höher auflösender Höhenmodelle, auch im InSAR-(TanDEM-X Mission) und Stereo-SAR-Bereich, sowie des gestiegenen Angebotes an Oberflächenmodellen und 3D-Punktwolken, eröffnen weitere Möglichkeiten topographiebedingte Fehler zu reduzieren. Die Zweckmäßigkeit gewisser Höhenmodelle bzgl. der Anwendbarkeit bei der Radarinterferometrie ist jedoch noch zu prüfen.

## Aufnahmewinkel

---

Satellitengetragene SAR-Systeme empfangen die Rückstreuung der seitwärts ausgesandten Signale. Die sich daraus ergebende Aufnahmegeometrie definiert verschiedene Winkel, die in der Literatur häufig nicht konsistent (unpräzise) genutzt werden. Aus diesem Grund erfolgte eine kurze Zusammenstellung der Winkeldefinitionen in diesem Abschnitt.

### A.1. Blickwinkel und -richtung

Der Blickwinkel  $\theta$  (*look angle* oder *off-nadir angle*) ist definiert als der Winkel zwischen der Nadirrichtung und der Richtung des ausgesandten Radarimpulses, genauer gesagt des Radarstrahlzentrums (*radar beam center*). Die Blickrichtung (*look direction*) gibt an, ob der Sensor nach rechts oder links blickt bzw. in Abhängigkeit von der Flugrichtung, d.h. aufsteigend von Süd nach Nord (*ascending*) oder absteigend von Nord nach Süd (*descending*), nach Osten oder Westen blickt. Da beim Aussenden des Radarimpulses eine keulenartige Beleuchtungsfläche an der Erdoberfläche entsteht, bedingt durch den antennenspezifischen Öffnungswinkel in Range  $\beta_r$ , ergeben sich zwischen den Radarstrahlvektoren und der Nadirrichtung unterschiedliche *off-center radar beam angle*. In der Literatur trifft man in diesem Zusammenhang auch auf die Bezeichnungen *fore-beam*, *mid-beam* (= *off-nadir*) und *aft-beam angle*, entsprechend dem near-range, mittleren oder far-range Strahl.

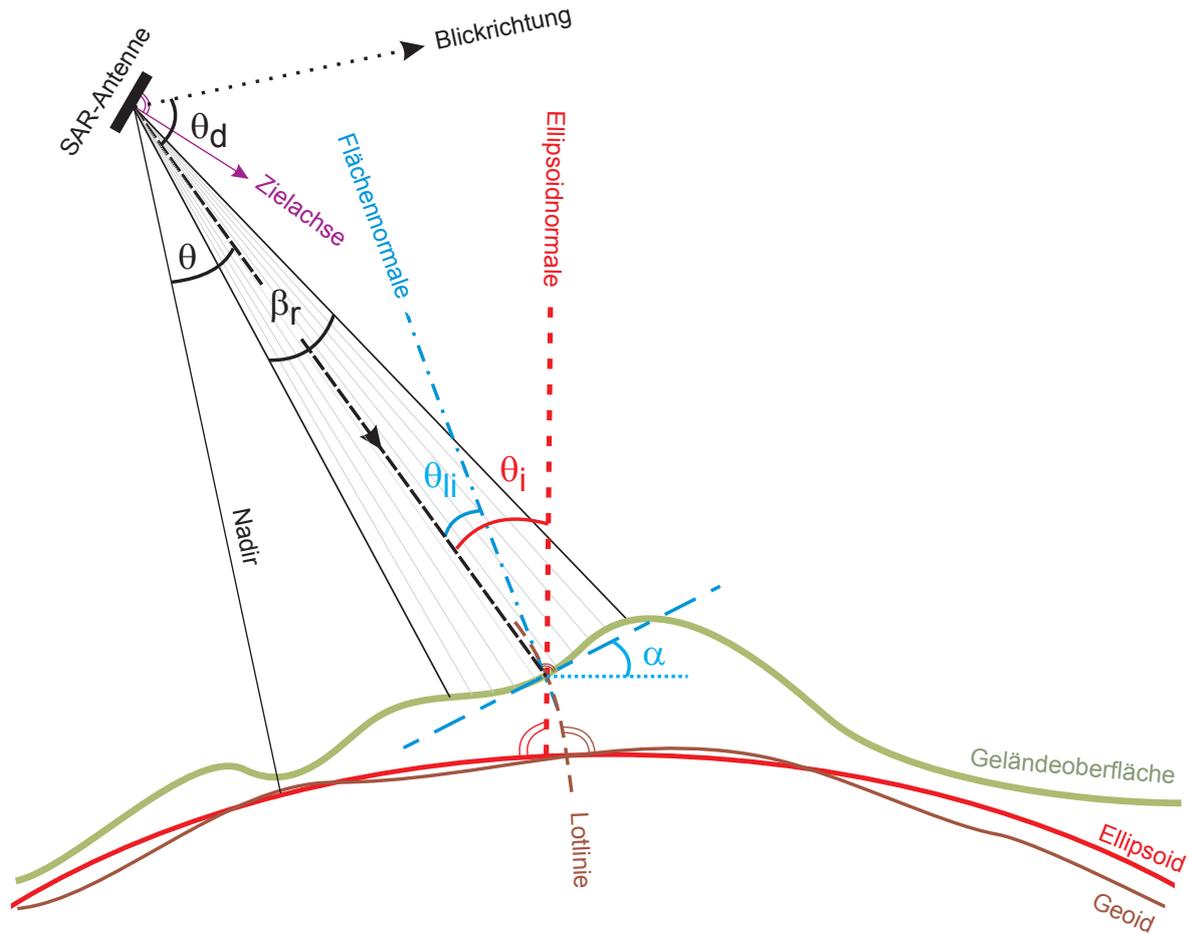


Abbildung A.1.: Aufnahmegeometrie eines SAR-Sensors in die Radarstrahlungsebene senkrecht zur Flugrichtung projiziert

## A.2. Depressionswinkel

Der komplementäre Winkel zum Blickwinkel  $\theta$  bezogen auf eine durch die Antenne gedachte horizontale Ebene ist der Depressionswinkel  $\theta_d$ .

## A.3. Einfallswinkel

Allgemein ist der Einfallswinkel definiert als der gemessene Winkel zwischen der Richtung der einfallenden Strahlung und dem Normalenvektor einer vordefinierten lokalen Referenzfläche.

Hauptsächlich wird zwischen dem ellipsoidischen Einfallswinkel  $\theta_i$  (*incidence angle*) und dem lokalen Einfallswinkel  $\theta_{li}$  (*local incidence angle*) unterschieden. Der ellipsoidische Einfallswinkel  $\theta_i$  ist definiert als der Winkel zwischen der Richtung der einfallenden Strahlung

auf die Erdoberfläche und der Ellipsoidnormalen. Der lokale Einfallswinkel  $\theta_i$  ist unterschiedlich definiert. Normalerweise bezieht er sich auf die Flächennormale eines Rückstreuerelements, die beliebig im Raum stehen kann. In manchen Fällen wird der Winkel aber auch in die Radarstrahlebene projiziert, welche zwischen der Nadirrichtung und dem einfallenden Radarstrahl aufgespannt wird. Der lokale Einfallswinkel  $\theta_i$  ist abhängig vom lokalen Anstieg  $\alpha$  (*local terrain angle*).

Bei flugzeuggetragenen Systemen, die nur einen kleinen Ausschnitt der Erdoberfläche aufnehmen, kann als Annahme eine flache Erde vorausgesetzt werden, so dass in diesem Fall der Einfallswinkel dem Blickwinkel entspricht. Bei satellitengetragenen Systemen sollte dagegen die Krümmung der Erde berücksichtigt werden (Woodhouse, 2006).

### Berechnung des ellipsoidischen Einfallswinkels

Satellitenbetreiber geben meist nicht den Blickwinkel  $\theta$  sondern den ellipsoidischen Einfallswinkel  $\theta_i$  in ihren Produktbeschreibungen für ihre Systeme an. Die Angaben beziehen sich dabei auf die geographische Breite am Äquator bezogen auf das Ellipsoid WGS84. Die zu den SAR-Daten mitgelieferten Metadaten enthalten die ellipsoidischen Einfallswinkel  $\theta_i$  bezogen auf die entsprechende geographische Breite  $\varphi$  und die Höhe  $h=0$ . Bei TerraSAR-X wird beispielsweise der Einfallswinkel für die Bildmitte, wie auch für die vier Bildecken angegeben. Größere Abweichungen der Höhe vom Ellipsoid, z.B. im Gebirge, führen zu Änderungen der ellipsoidischen Einfallswinkel.

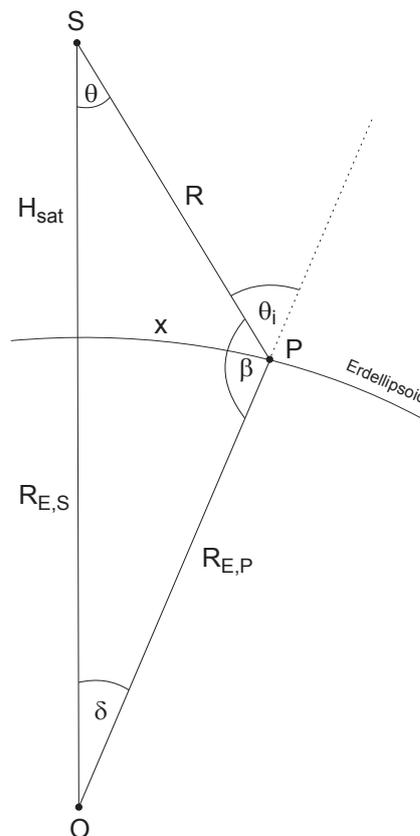


Abbildung A.2.: Ableitung des Einfallswinkels  $\theta_i$  bezogen auf die Höhe  $h=0$  m

Entsprechend Abb. A.2 ergeben sich folgende Beziehungen (Wu et al., 1981):

$$\cos \theta = \frac{R^2 + (R_{E,S} + H_{\text{sat}})^2 - R_{E,P}^2}{2 \cdot R \cdot (R_{E,S} + H_{\text{sat}})} \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\sin \theta}{R_{E,P}} = \frac{\sin \beta}{(R_{E,S} + H_{\text{sat}})} = \frac{\sin \delta}{R} \quad (\text{A.2})$$

$$\sin \theta_i = \sin \beta = \frac{(R_{E,S} + H_{\text{sat}}) \cdot \sin \theta}{R_{E,P}} \quad (\text{A.3})$$

Da der Erdradius unter dem Sensor  $R_{E,S}$  etwa gleich dem Erdradius unter dem Objektpunkt  $R_{E,P}$  ist, gilt:

$$R_{E,S} = R_{E,P} = R_E \quad (\text{A.4})$$

$$\sin \theta_i \approx \frac{(R_E + H_{\text{sat}}) \cdot \sin \theta}{R_E} \quad (\text{A.5})$$

Beispielsweise beträgt der Unterschied  $R_{E,P} - R_{E,S}$  bei einem Envisat-Überflug mit  $\theta \approx 22^\circ$  im Bereich N  $51.57^\circ$  und E  $7.41^\circ$  etwa 70 m, was bei einem Ellipsoidradius von ca. 6365 km vernachlässigbar ist. Die Differenz zwischen dem genäherten Einfallswinkel  $\theta_i$  und dem mit zwei Erdradien berechnete Einfallswinkel beträgt ca.  $0.01^\circ$ . Mit steigender Flughöhe  $H_{\text{sat}}$  und größerem Blickwinkel wird die Abweichung größer, da der Abstand am Boden  $x$  größer wird.

Bei der Berechnung des Einfallswinkels  $\theta_i$  in Gebieten mit großen ellipsoidischen Höhen (z.B.  $h > 1000$  m) ist die daraus resultierende Änderung von  $R_{E,S}$  in Formel A.3 zu berücksichtigen. Beispielsweise ändert sich der Blickwinkel  $\theta$  bei dem bereits genannten Envisat Beispiel bei einer Höhe von  $h=1000$  m um etwa  $0.17^\circ$ , was zu einer Vergrößerung des Einfallswinkels in der gleichen Größenordnung führt ( $\Delta\theta_i=0.19^\circ$ ).

Die Schrägdistanz  $R$  kann berechnet werden anhand der Satellitenhöhe  $H_{\text{sat}}$ :

$$R = \sqrt{R_{E,P}^2 + (R_{E,S} + H_{\text{sat}})^2 - 2 \cdot R_{E,P} \cdot (R_{E,S} + H_{\text{sat}}) \cdot \cos \delta} \approx \frac{H_{\text{sat}}}{\cos \theta} \quad (\text{A.6})$$

### Berechnung des lokalen Einfallswinkels

Der lokale Einfallswinkel  $\theta_i$  berechnet sich über das Skalarprodukt des Flächennormalenvektors  $\vec{n}$  und den Schrägdistanz- oder Beleuchtungsvektor  $\vec{R}$ :

$$\cos \theta_i = \frac{\vec{n} \cdot \vec{R}}{|\vec{n}| \cdot |\vec{R}|} = \frac{n_x \cdot R_x + n_y \cdot R_y + n_z \cdot R_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} \cdot \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}} \quad (\text{A.7})$$

Die Berechnung von  $\vec{n}$  erfolgt über das Kreuzprodukt der Neigungen der Geländeoberfläche in Richtung der beiden Koordinatenachsen a und b und Berücksichtigung der Pixelgröße  $p_x$  und  $p_y$ . Die Bestimmung der Neigungen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen, entweder über eine, wie in diesem Fall,  $2 \times 2$  oder auch  $3 \times 3$  (evt. auch  $5 \times 5$ ) Nachbarschaft der Höhenwerte.

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x \\ 0 \\ \frac{(h_2+h_3)-(h_1+h_4)}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{A.8})$$

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ p_y \\ \frac{(h_3+h_4)-(h_1+h_2)}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{A.9})$$

$$\vec{n} = \vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} -a_x \cdot b_y \\ -a_x \cdot b_z \\ a_x \cdot b_y \end{pmatrix} \quad (\text{A.10})$$

Der Beleuchtungsvektor  $\vec{R}$  ergibt sich über den Sensorpositionsvektor  $\vec{S}$  und den Positionsvektor des Rückstreulements  $\vec{P}$

$$\vec{R} = \sqrt{\vec{P}^2 + \vec{S}^2 - (2 \cdot \vec{P} \cdot \vec{S})} \quad (\text{A.11})$$

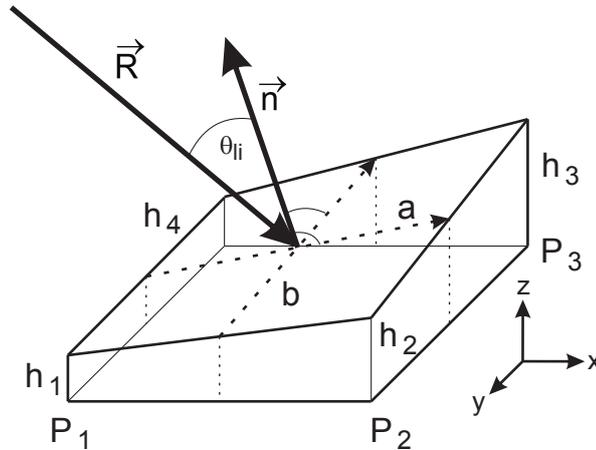


Abbildung A.3.: Geometrische Definition des lokalen Einfallswinkel  $\theta_{ij}$  nach Holecz et al. (1993).

## A.4. Zielachswinkel

Vollständigkeit halber soll auch der Zielachswinkel (*boresight angle*) mit aufgeführt werden, welcher definiert ist zwischen der Nadirrichtung und der Zielachsrichtung der Radarantenne, die orthogonal zur Sensorflugrichtung und zum Sensorfeld ist. Diese mechanische oder elektrische Zielachse stimmt nicht mit der Richtung des ausgesandten Radarimpulses überein (Meier, 1989).



---

## SAR-Signaleigenschaften

---

### B.1. Radargleichung

Die Radarrückstreuung wird im Wesentlichen durch objektspezifische Eigenschaften (Dielektrizitätskonstante, Geometrie, Rauigkeit) in Abhängigkeit von der Wellenlänge bestimmt. Die von einem Punktziel zurückgestreute Leistung ist vom so genannten Radarrückstreuquerschnitt  $\sigma$  (RCS: *Radar cross section* in  $[\text{m}^2]$ ) abhängig, der die gestreute Leistung pro Einheitsraumwinkel beschreibt, unter der Voraussetzung der Reflexionsfähigkeit eines Ziels. Der Rückstreukoeffizient  $\sigma^0$  ergibt sich durch die Normierung bezogen auf die Auflösungszelle und ist somit einheitenlos. Für raue Oberflächen und steile (kleine) Einfallswinkel ist  $\sigma^0$  groß, für glatte Oberflächen und große Einfallswinkel klein (Abb. 2.5 d-f). Da der Rückstreukoeffizient häufig einen großen Magnitudenbereich abdeckt, wird dieser meist komprimiert in Dezibel dB angegeben:

$$\sigma^0 [\text{dB}] = 10 \cdot \log \sigma^0 [-] \quad (\text{B.1})$$

Die Empfangsleistung an einer Antenne ist deutlich geringer als die von einem Ziel zurückgestreute Signalleistung. Die empfangene Leistung  $P_E$  wird durch die Radargleichung beschrieben und ist abhängig von der ausgesandten Signalleistung  $P_S$ , dem Antennengewinn  $G$ , der Wellenlänge  $\lambda$ , dem Abstand zum Zielobjekt  $R$ , dem Radarrückstreuquerschnitt  $\sigma$  und den Verlustfaktoren während des Sendevorgangs  $L_{ges}$  (Klausing & Holpp, 2000):

$$P_E = \frac{P_S \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot R^4 \cdot L_{ges}} \quad (\text{B.2})$$

Über das Signal-Rausch-Verhältnis (*Signal-to-Noise power Ratio, SNR*), das sich ergibt aus dem Quotienten der empfangenen Leistung  $P_E$  und dem Empfängerrauschen  $P_N$  (hauptsächlich thermisches Rauschen), kann die Qualität eines Radarbildes ermittelt werden. Durch die kohärente Integration der Echosignale bei einem SAR-System, erhöht sich der SNR-Wert proportional zur Impulsanzahl, die wiederum abhängig ist von der Länge der synthetischen Apertur  $L_a$ , der Fluggeschwindigkeit  $v_S$  und der Pulswiederholrate  $f_a$  (Klausing & Holpp, 2000). Das Signal-Rausch-Verhältnis eines Einzelziels  $SNR_{Punkt}^{SAR}$  (z.B. eines Corner-Reflektors) ergibt sich, unter Berücksichtigung der effektiven Rauschtemperatur  $T_{eff}$ , der Rauschzahl  $F_N$  und der *Boltzmann-Konstante*  $k$ , wie folgt (Wessel, 2006):

$$SNR_{Punkt}^{SAR} = \frac{P_E}{P_N} = \frac{P_S \cdot G^2 \cdot \lambda^3 \cdot \sigma \cdot \tau_p \cdot f_a}{(4\pi)^3 \cdot R^3 \cdot v_S \cdot L_a \cdot k \cdot T_{eff} \cdot F_N} \quad (B.3)$$

Bei der Berechnung des SNR für Flächenziele wird zusätzlich die Bodenauflösung berücksichtigt (Massonnet & Souyris, 2008).

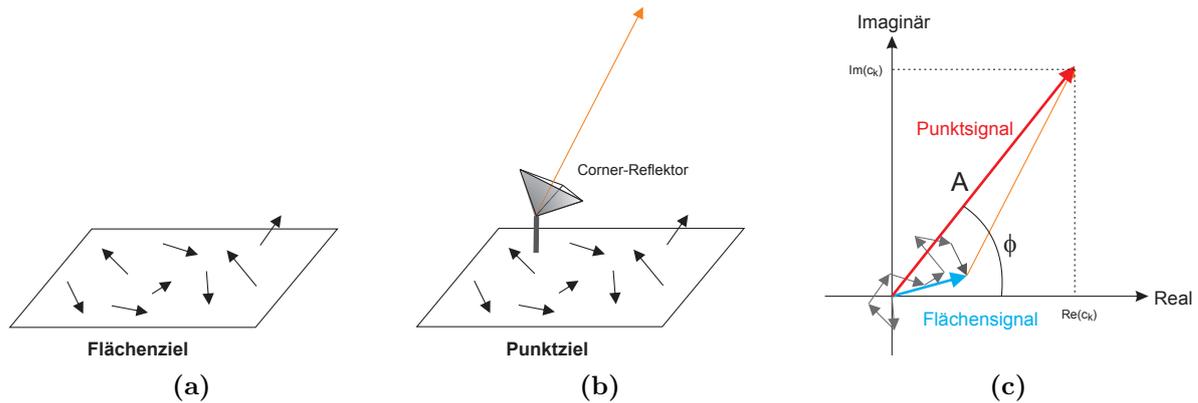
## B.2. Speckle-Effekt

SAR-Bilder weisen eine typische körnige Struktur auf, das so genannte *Speckle*-Rauschen, was charakteristisch ist für kohärente Abbildungssysteme wie Radar, aber auch Sonar oder Laser, und die Erkennbarkeit von Objektdetails einschränkt. Besonders intensiv tritt Speckle bei Flächenzielen mit einer Oberflächenrauigkeit in der Größenordnung der Radarwellen auf (Moreira, 2000). Verantwortlich für den Speckle-Effekt ist die große Anzahl an zufällig verteilten Einzelstreuern innerhalb einer Auflösungszelle und die kohärente Prozessierung. Speckle ist aber kein Ergebnis der räumlichen Variabilität einer Oberfläche in einem SAR-Bild, die sich in unterschiedlichen Pixeln zeigt. Das Gesamtstückstreusignal  $c_k$  einer Auflösungszelle ist die kohärente Summe der zurückgestreuten komplexen Signale aller in einer Zelle befindlichen Streuelemente  $k$  (Abb. B.1 c):

$$c_k = Re(c_k) + i \cdot Im(c_k) = A \cdot e^{i\phi} = \sum_n^{k=1} A_k \cdot e^{i\phi_k} \quad (B.4)$$

Das komplexe Gesamtsignal liefert sowohl Informationen zur Rückstreuintensität  $I$  eines Pixels anhand der Amplitude<sup>1</sup>  $A$  als auch Informationen zur Phasenlage (kurz: Phase)  $\phi$ , was durch die Länge und den Winkel des resultierenden Vektors in der komplexen Ebene wiedergegeben wird. Da verschiedene Auflösungszellen auch bei homogenen Flächen unterschiedliche Summenvektoren in der komplexen Ebene liefern, je nachdem ob die Phasenbeiträge sich zufällig konstruktiv oder destruktiv beeinflussen, entsteht das störende Speckle-Rauschen. Physikalisch gesehen ist Speckle kein Rauschen und nicht zufällig (aber auch nicht vorhersagbar) (Massonnet & Souyris, 2008), da eine gleiche Aufnahmekonfiguration theoretisch zu einem identischen Speckle-Muster führt. Der Speckle-Effekt tritt nur bei Flächenzielen, aber nicht bei Punktzielen auf.

<sup>1</sup>Die Intensität  $I$  ist proportional zum Quadrat der Amplitude  $A$ .



**Abbildung B.1.:** (a) Flächenziele besitzen viele statistisch zufällig verteilte Einzelstreuer. (b) Punktziele enthalten dominante Objekte. (c) Das Rückstreuuecho  $c_k$  einer Auflösungszelle ergibt sich als vektorielle Summe der Rückstreuuechos mehrerer Einzelstreuer  $k$  (Vektorlänge = Signalstärke  $A$ , Richtung = Phase  $\phi$ ). Dominante Rückstreuobjekte beeinflussen das empfangene Signal stark.

**Flächenziele.** Eine Auflösungszelle, die möglichst viele statistisch zufällig verteilte Einzelstreuer enthält (Abb. B.1 a), die unabhängig voneinander sind, bezeichnet man als Flächenziel. Flächenziele treten z.B. bei landwirtschaftlichen Flächen, dichten Baumkronen und schneebedeckten Gebieten auf. Da erstens die Phase  $\phi_k$  und Amplitude  $A_k$  eines jeden Rückstreuers in diesem Fall unabhängig von einem anderen ist, zweitens die Phasen  $\phi_k$  (und somit auch die Gesamtphase  $\phi$ ) gleichverteilt zwischen  $-\pi$  und  $+\pi$  sind, ergibt sich, dass der Real-  $Re(c_k)$  und Imaginärteil  $Im(c_k)$  eines SAR-Pixels mittelwertfrei gaußverteilt sind und statistisch voneinander unabhängig (Just & Bamler, 1994). Betrachtet man mehrere Pixel einer homogenen Fläche in einem SAR-Bild gemeinsam, sind die Phasen auch weiterhin zufällig, jedoch ergeben die Amplituden im Mittel eine charakteristische Rückstreuintensität. Die Amplituden  $A = \sqrt{Re(c_k)^2 + Im(c_k)^2}$  sind rayleighverteilt (Massonnet & Souyris, 2008).

**Punktziele.** Punktziele sind Auflösungszellen mit einem oder mehreren dominanten Rückstreuern (Abb. B.1), deren Amplitude und Phase von den dominanten Objekten bestimmt wird. Alle anderen Reflexionssignale sind vernachlässigbar klein. Solche dominanten Rückstreuer, deren Intensität verhältnismäßig hoch ist im Vergleich zum Systemrauschen (hoher SNR), zeichnen sich durch ihre Geometrie, dielektrischen Eigenschaften etc. (vgl. Kapitel 2.1.2.1) aus und treten insbesondere in Städten auf, wo viele rechte Winkel z.B. an Gebäuden (Abb. 2.5 b) vorkommen. Ein ideales Punktziel ist beispielsweise ein Corner-Reflektor. Die Phase eines Punktziels kann als *Objektphase* betrachtet werden, die die Entfernung zwischen Sensor und Objekt beschreibt, jedoch in Abhängigkeit des Signalwegs und von Mehrfachreflexionen (vgl. Kapitel 2.1.1.4). Die Objektphase ist zufällig, gewinnt jedoch ihre Bedeutung in der SAR-Interferometrie (Kapitel 2.2). Die Amplituden von Punktzielen können mit der Rice-Verteilung beschrieben werden (Ferretti et al., 2001).

### B.3. Speckle-Reduzierung

Unter Speckle-Reduzierung versteht man die Möglichkeit der Steigerung der radiometrischen Auflösung einer SAR-Aufnahme. Da Speckle statistisch betrachtet einen multiplikativen Charakter hat, d.h. mit Zunahme der Rückstrahlleistung der Speckle größer wird, ist eine Reduktion des Speckle-Effekts u.a. durch Speckle-Filter möglich (Massonnet & Souyris, 2008), d.h. Mittelbildung benachbarter Pixel oder Anwendung adaptiver nichtlinearer Verfahren nach der SAR-Bildgenerierung. Die Reduzierung des Speckles ist dabei abhängig von der Kernelgröße und den Korrelationseigenschaften des Bildes und führt zu einer Verschlechterung der geometrischen Auflösung. Neben der räumlichen Mittelbildung ist auch eine Mittelbildung mit einem Stapel von SAR-Bildern des gleichen Ausschnitts zur Reduktion des Speckles möglich.

Eine andere Möglichkeit der Speckle-Reduzierung ist die **Multilook-Prozessierung**. Beim Multilooking einer SAR-Aufnahme werden Range- und Azimut-Bandweiten in Subbänder unterteilt und diese zu einzelnen Bildern (Looks) fokussiert (Bamler & Schättler, 1993). Bei der Teilung des Spektrums in Range-Richtung erfolgt die Beleuchtung mit unterschiedlichen Wellenlängenbereichen (chirp-moduliert) und in Azimutrichtung mit verschiedenen Blickwinkeln, aufgrund der synthetischen Apertur. Die spektrale Teilung eines SAR-Bildes erfolgt zeilen- und spaltenweise nachdem durch Anwendung der Fourier-Transformation das Bild in den Frequenzbereich transformiert wurde. Wenn die spektralen Bänder sich nicht überlappen, d.h. die Looks völlig dekorreliert sind, wird die Standardabweichung der Intensität für eine homogene Szene mit der Wurzel aus der Anzahl der Looks reduziert (Klausing & Holpp, 2000). Die Anzahl der unabhängigen (effektiven) Looks ist aufgrund der Korrelation zwischen den Looks kleiner als die Anzahl der möglichen Teilbänder (Klausing & Holpp, 2000). Die Speckle-reduzierten Multilooking-Bilder entstehen durch die inkohärente Addition der statistisch unabhängigen Looks. Wegen der geringen Bandweiten der Subbänder reduziert sich die geometrische Auflösung des SAR-Bildes. Die Standardabweichung der Intensität der Flächenziele reduziert sich mit der Quadratwurzel der Anzahl der unabhängigen (effektiven) Looks (Moreira, 2000). Detailliertere Informationen zum Multilooking sind beispielweise bei Moreira (2000) und Massonnet & Souyris (2008) zu finden.

Betrachtet man Flächenziele in verschiedenen Subbändern, so haben die Streuer innerhalb einer Auflösungszelle eine andere relative Orientierung zum Sensor und somit andere Phasen. Bildet man eine Phasendifferenz aus den Flächensignalen von zwei Subbändern ergibt sich nur Phasenrauschen. Dagegen bleibt bei Punktzielen die relative Orientierung in verschiedenen Subbändern gleich, so dass das Reflexionssignal sich nicht ändert. Die Signale aus zwei Subaperturen sind entsprechend korreliert.

---

## Geometrische Zusammenhänge

---

### C.1. Fehlpositionierung aufgrund von Höhenfehlern

Unberücksichtigte Geländeschwankungen  $\Delta h$ , vergleichbar mit Höhenfehlern, führen bei der Projektion der slant-range Aufnahmen in die ground-range Ebene zu horizontalen Lagefehlern  $\Delta g$ . Der Punkt  $P_1$  wird bei Nichtberücksichtigung seines Höhenunterschiedes  $\Delta h$  fehlerhaft der Geländeebene zugewiesen ( $P_2$ ) und entsprechend falsch auf die ground-range Bildebene projiziert.

Entsprechend Abb. C.1 gilt:

$$(x_1 + x_2) = p \cdot \cos(\theta_i - \alpha) = \frac{\Delta h \cdot \cos \alpha \cdot \cos(\theta_i - \alpha)}{\sin(\theta_i - \alpha)} \quad (\text{C.1})$$

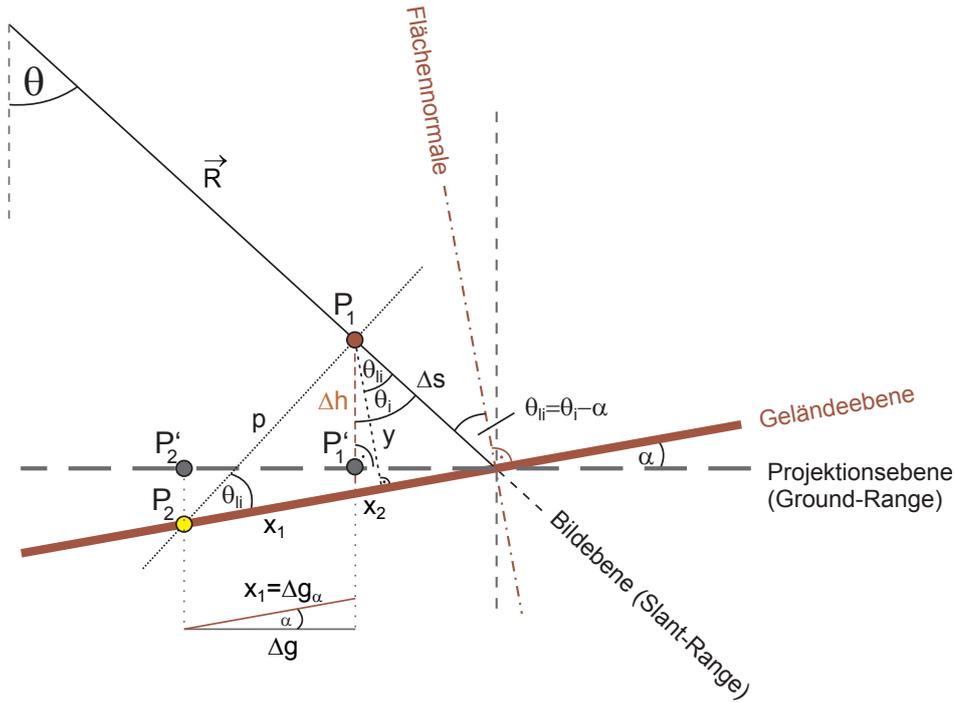
mit:

$$\theta_{li} = \theta_i - \alpha \quad (\text{C.2})$$

$$x_2 = \Delta h \cdot \sin \alpha \quad (\text{C.3})$$

$$p = \frac{y}{\sin(\theta_i - \alpha)} = \frac{\Delta h \cdot \cos \alpha}{\sin(\theta_i - \alpha)} \quad (\text{C.4})$$

$$y = \Delta h \cdot \cos \alpha \quad (\text{C.5})$$



**Abbildung C.1.:** Zusammenhang zwischen dem Lagefehler eines Punktes  $P_1$  in Abhängigkeit von der unberücksichtigten Höhendifferenz  $\Delta h$  bei der Projektion von der slant-range in die ground-range Bildebene.

Damit ergibt sich der unprojizierte Lagefehler in Abhängigkeit von der unberücksichtigten Höhendifferenz  $\Delta h$  wie folgt:

$$\begin{aligned}
 \Delta g_\alpha &= (x_1 + x_2) - x_2 \\
 &= \frac{\Delta h \cdot \cos \alpha \cdot \cos(\theta_i - \alpha)}{\sin(\theta_i - \alpha)} - \Delta h \cdot \sin \alpha \\
 &= \Delta h \cdot \left( \frac{\cos \alpha \cdot \cos(\theta_i - \alpha)}{\sin(\theta_i - \alpha)} - \frac{\sin \alpha \cdot \sin(\theta_i - \alpha)}{\sin(\theta_i - \alpha)} \right) \\
 &= \Delta h \cdot \frac{\cos(\alpha + \theta_i - \alpha)}{\sin(\theta_i - \alpha)} \\
 &= \Delta h \cdot \frac{\cos \theta_i}{\sin(\theta_i - \alpha)} \tag{C.6}
 \end{aligned}$$

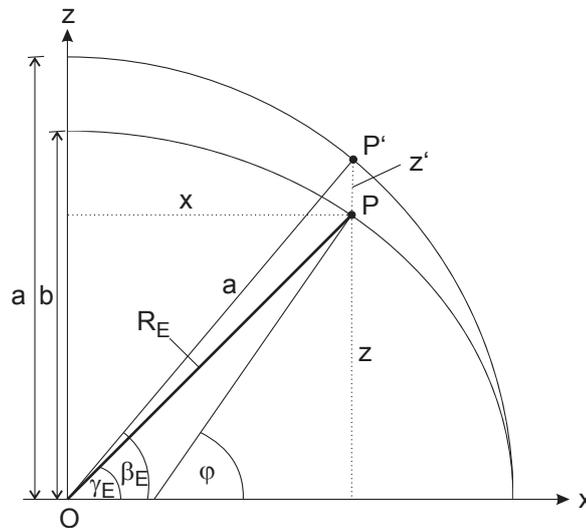
Der Positionierungsfehler am Boden in Blickrichtung des Sensors wird bestimmt nach:

$$\begin{aligned}
 \Delta g &= \Delta g_\alpha \cdot \cos \alpha \\
 &= \frac{\Delta h \cdot \cos \theta_i \cdot \cos \alpha}{\sin(\theta_i - \alpha)} \tag{C.7}
 \end{aligned}$$

Wenn  $\alpha = 0^\circ$  dann gilt:

$$\Delta g = \frac{\Delta h}{\tan \theta_i} \tag{C.8}$$

## C.2. Berechnung des geozentrischen Radius



**Abbildung C.2.:** Zusammenhang zwischen der geozentrischen Breite  $\gamma_E$ , der reduzierten Breite  $\beta_E$  und der geographischen Breite  $\varphi$  eines Rotationsellipsoids

Der geozentrische Radius  $R_E$  ist der Abstand zwischen einem Punkt  $P$  eines Rotationsellipsoids zum Geozentrum  $O$  (Abb. C.2), der mit der großen Halbachse  $a$  des Ellipsoids die geozentrische Breite  $\gamma_E$  einschließt.  $R_E$  ist abhängig von der geographischen Breite  $\varphi$  und lässt sich anhand der reduzierten Breite  $\beta_E$  wie folgt bestimmen:

$$R_E = \frac{b \cdot \sin \beta_E}{\sin \gamma_E} \quad (\text{C.9})$$

mit:

$$(\text{C.10})$$

$$\beta_E = \arctan \left( \frac{b}{a} \cdot \tan \varphi \right) \quad (\text{C.11})$$

$$\gamma_E = \arctan \left( \frac{b}{a} \cdot \tan \beta_E \right) \quad (\text{C.12})$$

$$(\text{C.13})$$

$R_E$  bezieht sich auf die ellipsoidische Höhe  $h=0$  m. Für das WGS84 Ellipsoid gilt:

$$a=6378137 \text{ m}$$

$$b=6356752.314 \text{ m}$$

Für eine geographische Breite von beispielsweise  $\varphi=51^\circ$  ergibt sich ein Erdradius  $R_E$  von etwa 6365265 m bezogen auf die ellipsoidische Höhe  $h=0$  m.



## DHMs aus optischen Satellitendaten

**Tabelle D.1.:** Horizontale und vertikale Genauigkeiten von DOMs, die von satellitengetragenen optischen Daten ausgewählter Sensoren abgeleitet wurden.

Sensor	Bodenauflösung [m]	horizontale Genauigkeit [m]	vertikale Genauigkeit [m]	Referenzen
Ikonos	0.82/3.28	15 (CE90)**	1.84 (RMSE)	(Jacobsen, 2011)
Quickbird-2	0.61/2.4	23 (CE90)**	~3.5 (RMSE)	(Jacobsen, 2011), (Crespi et al., 2007)
SPOT-5	2.5	<50 (CE90)**	5.5/6.5 (LE68)*	(Jacobsen, 2011), (Toutin et al., 2004)
Cartosat-1	2.5	6.7 (CE90)	5.1 (LE90)	(d'Angelo et al., 2010), (Crespi et al., 2007)
ALOS PRISM	2.5	–	~6 (RMSE)	(Wolff & Grün, 2007), (Bignone & Umakawa, 2008)
KOMPSat-2	1/4	<25 (CE90)**	<22 (LE90)**	(Seo et al., 2008)
WorldView-1	0.5	~1.0 (RMSE)	~1.5 (RMSE)	(Crespi et al., 2009)
GeoEye-1	0.41/1.65	4 (CE90)**	6 (LE90)	(Jacobsen, 2011), Eurimage
WorldView-2	0.5	6.5 (CE90)**	0.35/0.65 (LE90)***	(Jacobsen, 2011), (Mitchell, 2010)

\* along-/across track Stereopaare, \*\* ohne Passpunkte, \*\*\* bei Geländeneigungen <20%/>20%

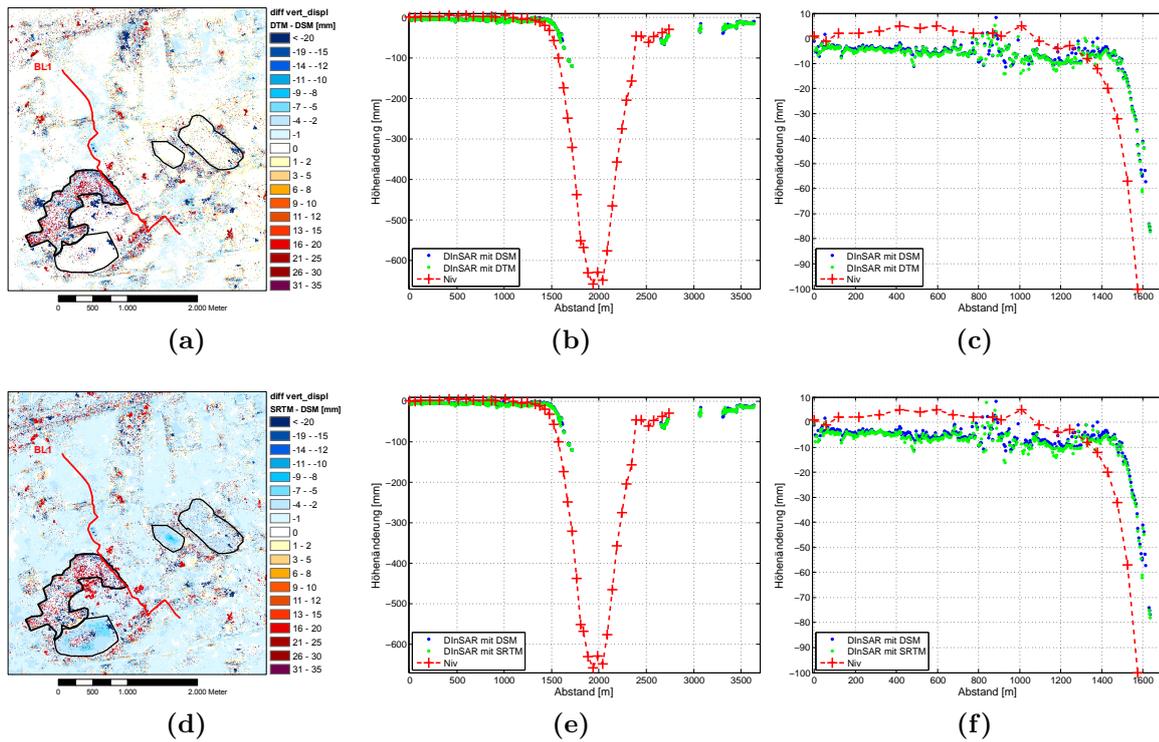


## **ANHANG E**

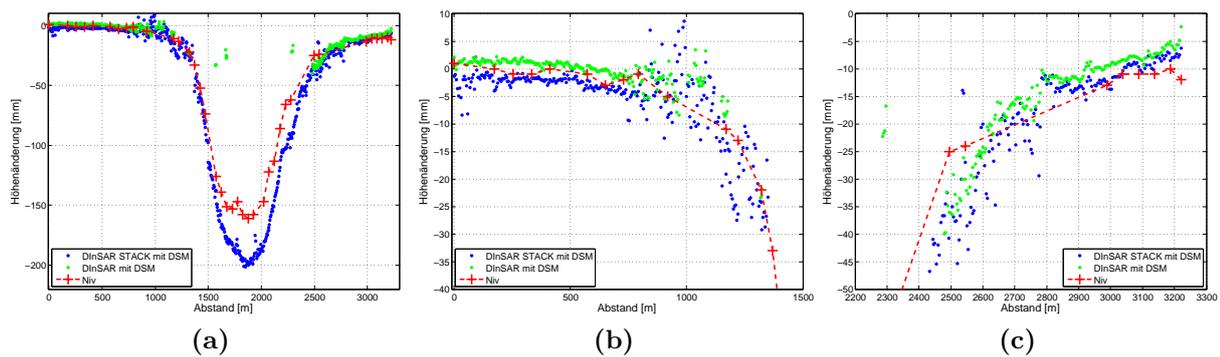
---

### **Weitere Messergebnisse**

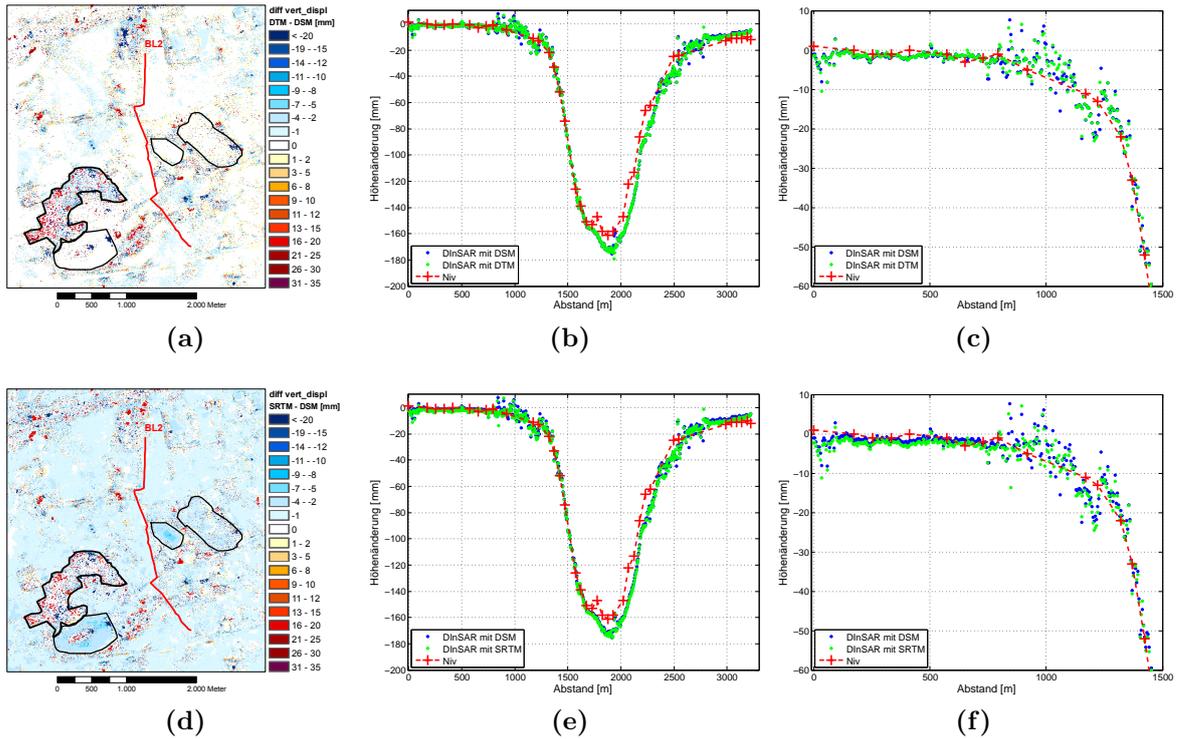
---



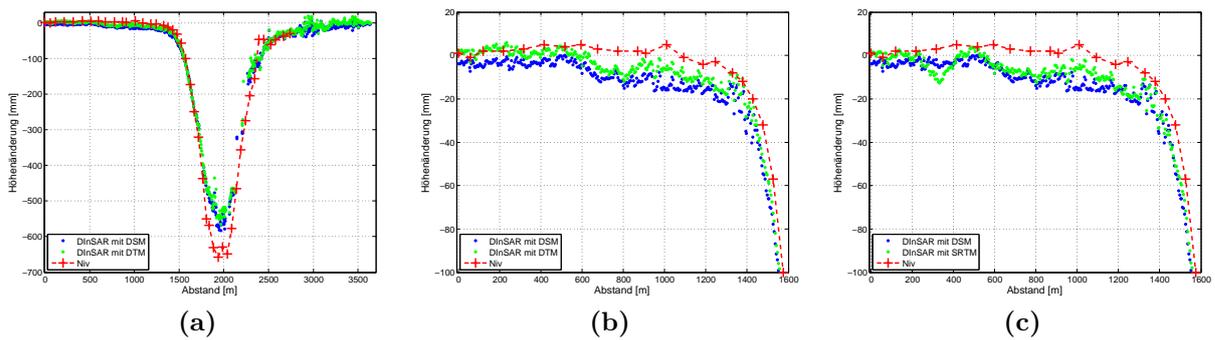
**Abbildung E.1.:** Vergleich der radarinterferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen mit Nivellements (12.11.2008 - 25.03.2009) entlang der Linie BL1; TerraSAR-X 12.11.2008 - 24.3.2009,  $B_{\perp} = -59$  m; (a) Messdifferenz DInSAR (DTM - DSM), (b) Gesamtprofil BL1 von Nord nach Süd mit DInSAR DSM (blau), DInSAR DTM (grün), Nivellement (rot), (c) Teilprofil BL1 0-1700 m DInSAR (DSM, DTM, Niv), (d) Messdifferenz DInSAR (SRTM - DSM), (e) Gesamtprofil BL1 mit DInSAR DSM (blau), DInSAR SRTM (grün), Nivellement (rot), (f) Teilprofil BL1 0-1700 m DInSAR (DSM, SRTM, Niv).



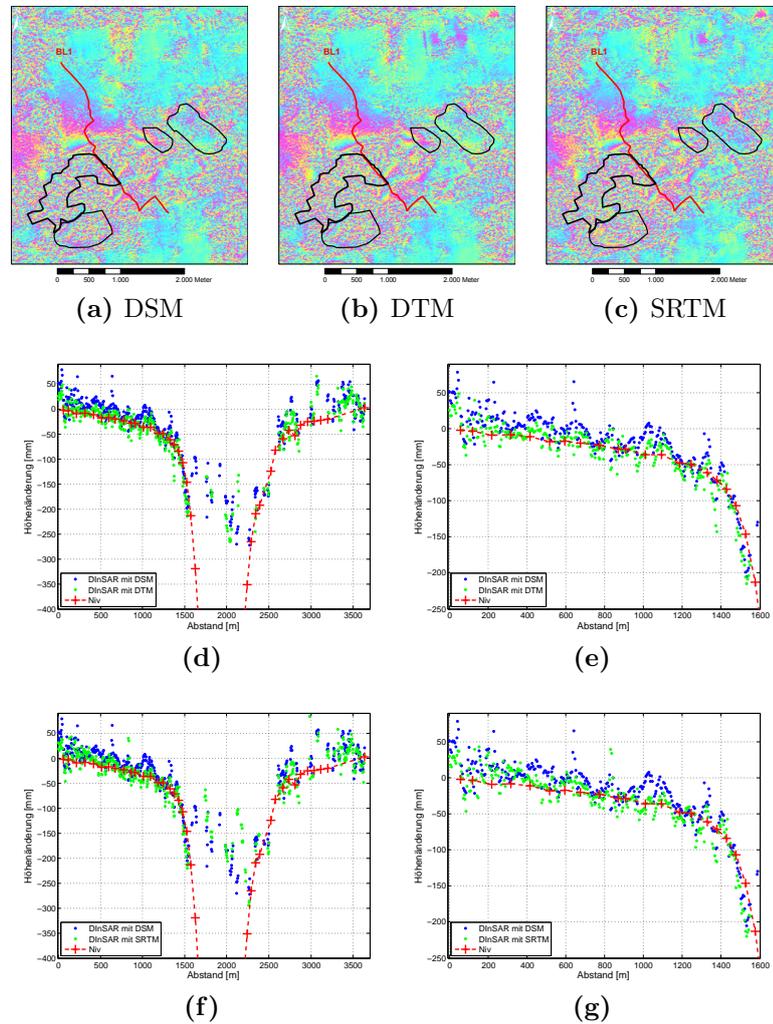
**Abbildung E.2.:** Vergleich der radarinterferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen mit Nivellements (28.11.2008 - 16.03.2009) entlang der Linie BL2; TerraSAR-X 12.11.2008 - 13.3.2009,  $B_{\perp} = -72$  m; (a) Gesamtprofil BL2 von Nord nach Süd mit DInSAR DSM Stack (blau), DInSAR DSM (grün), Nivellement (rot), (b) Teilprofil BL2 0-1500 m DInSAR (DSM Stack, DSM, Niv), (c) Teilprofil BL2 2200-3300 m DInSAR (DSM Stack, DSM, Niv).



**Abbildung E.3.:** Vergleich der radarinterferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen mit Nivellements (28.11.2008 - 16.03.2009) entlang der Linie BL2; TerraSAR-X 15.12.2008 - 13.3.2009,  $B_{\perp} = -53\text{ m}$ ; (a) Messdifferenz DInSAR (DTM - DSM), (b) Gesamtprofil BL2 von Nord nach Süd mit DInSAR DSM (blau), DInSAR DTM (grün), Nivellement (rot), (c) Teilprofil BL2 0-1500 m DInSAR (DSM, DTM, Niv), (d) Messdifferenz DInSAR (SRTM - DSM), (e) Gesamtprofil BL2 mit DInSAR DSM (blau), DInSAR SRTM (grün), Nivellement (rot), (f) Teilprofil BL2 0-1500 m DInSAR (DSM, SRTM, Niv).



**Abbildung E.4.:** Vergleich der radarinterferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen mit Nivellements (12.11.2008 - 25.3.2009) entlang der Linie BL1; ALOS PALSAR Track 644 28.11.2008 - 28.2.2009 mit  $B_{\perp} = +1020\text{ m}$ ; (a) Gesamtprofil BL1 von Nord nach Süd mit DInSAR DSM (blau), DInSAR DTM (grün), Nivellement (rot), (b) Teilprofil BL1 0-1600 m DInSAR (DSM, DTM, Niv), (c) Teilprofil BL1 0-1600 m DInSAR (DSM, SRTM, Niv).



**Abbildung E.5.:** Vergleich der radarinterferometrisch abgeleiteten vertikalen Bewegungen mit Nivellements (24.10.2007 - 27.7.2009) entlang der Linie BL1; ALOS PALSAR Track 644 11.10.2007 - 16.7.2009,  $B_{\perp} = -2059$  m; Differentielle Interferogramme bei Verwendung (a) des NEXTMap DSM, (b) des NEXTMap DTM und (c) des SRTM-XC DHMs für die topographische Phasenkorrektur; (d) Gesamtprofil BL1 von Nord nach Süd mit DInSAR DSM (blau), DInSAR DTM (grün), Nivellement (rot), (e) Teilprofil BL1 0-1600m DInSAR (DSM, DTM, Niv), (f) Gesamtprofil BL1 mit DInSAR DSM (blau), DInSAR SRTM (grün), Nivellement (rot), (g) Teilprofil BL1 0-1600m DInSAR (DSM, SRTM, Niv).

---

## Sensorparameter

---

In Tabelle F.1 sind die Orbit- und Instrumentenparameter sowie Aufnahmeparameter aller aktuellen SAR-Sensoren zusammengefasst.

Jeder aufgelistete SAR-Sensor kann in unterschiedlichen SAR-Aufnahmemodi operieren, wobei jeder Modi unterschiedliche Eigenschaften besitzt. Folgende Abkürzungen für die Aufnahmemodi sind gebräuchlich: HS - High-Resolution Spotlight, SL - Spotlight, SM - Stripmap, SC - ScanSAR, HI - StripMap HIMAGE, PP - StripMap PINGPONG, IS - Image Standard, UF - Ultra-Fine, MLF - Multi-Look Fine, F - Fine, S - Standard, FBS - Fine Beam Single, FBD - Fine Beam Dual. Die mit (\*) gekennzeichneten Sensoren besitzen zusätzlich Aufnahmemodi, deren Eigenschaften nicht mit aufgelistet sind. Dabei handelt es sich um Modi bei welchen Gebiete von mehr als  $100\text{ km} \times 100\text{ km}$  abgedeckt werden (z.B. Envisat ScanSAR, Radarsat-2 Wide).

Für den PALSAR Sensor sind nur für den Fine-Beam-Modus F8 die SAR-Bildparameter angegeben, da dieser als Standard-Mode für Interferometrie genutzt wird. Bis Oktober 2006 wurde der Mode F11 mit dem Blickwinkel  $\theta=41.5^\circ$  als Standard-Mode verwendet, welcher jedoch zu Range-Mehrdeutigkeitsproblemen bei einigen Datenprodukten führte, so dass in den F8 Mode gewechselt wurde. Die Parameter für alle weiteren Beam-Modi (F1-F7, F9-F18) sind in der Produktbeschreibung *ERSDAC PALSAR Product Characteristics* ([http://www.palsar.ersdac.or.jp/e/guide/pdf/ERSDAC-VX-PALSAR-001\\_en.pdf](http://www.palsar.ersdac.or.jp/e/guide/pdf/ERSDAC-VX-PALSAR-001_en.pdf)) aufgeführt. In der Zeile Polarisation der Tabelle F.1 sind bei dual-polarisierten Daten zusätzlich die Aufnahmemodi, für welche die Angaben gelten, in Klammern mit angegeben.

Tabelle F.1.: Sensorparameter

	X-Band		C-Band		L-Band
	TerraSAR-X	COSMO-SkyMed*	ERS-1/-2	Envisat ASAR*	
<b>Betreiber</b>	DLR	ASI	ESA	ESA	JAXA
<b>Start</b>	15.6.2007	8.6.2007 (CSK-1) 9.12.2007 (CSK-2) 25.10.2008 (CSK-3) 6.11.2010 (CSK-4)	17.7.1991 (ERS-1) 21.4.1995 (ERS-2)	1.3.2002	14.12.2007 24.1.2006
<b>Ende [nominale Laufzeit]</b>	[5 Jahre]	[jeweils 5 Jahre]	10.3.2000 (ERS-1) 6.7.2011 (ERS-2)	22.10.2010 (für Interferometrie)	22.4.2011
<b>nominale Flughöhe <math>H_{\text{Sat}}</math> [km]</b>	514.8	619.6	795.0	799.8	691.65
<b>Inklination</b>	97.44°	97.86°	98.84°	98.55°	98.16°
<b>Wiederholzyklus <math>\Delta t</math> [Tage]</b>	11	8	35	35	24
<b>Fluggeschwindigkeit <math>v_S</math> [m/s]</b>	~7600	7548	7456	7450	~7600
<b>Trägerfrequenz <math>f_c</math> [GHz]</b>	9.65	9.58	5.30	5.33	5.405
<b>Wellenlänge <math>\lambda</math> [cm]</b>	3.11	3.12	5.66	5.62	5.55
<b>Bandbreite <math>B_p</math> [MHz]</b>	300 (HS) 150 (SL,SM,SC)	185.20–400.00 (SL) 65.64–138.60 (HI) 14.77–38.37 (PP) 32.74–86.34 (SC Wide)	15.55	16.00	100 (SL,UF) 50 (MLF) 30 (F) 17.30 (S1–2) 11.60 (S3–7)
<b>Pulswiederholrate <math>f_a</math> (PRF) [Hz]</b>	2000–6500	3148–4116 (SL) 2905–3874 (HI) 2905–3632 (PP/SC Wide)	1640–1720	1709–2067	1300–3800 1500–2500
<b>Abtastfrequenz (RSF) [MHz]</b>	110 165 330	187.5 (SL) 82.5–176.25 (HI) 18.75–48.75 (PP) 41.25–108.75 (SC Wide)	18.96	19.21	variabel 32 (FBS) 16 (FBD)
<b>Antennengröße [m × m]</b>	4.8 × 0.7	5.7 × 1.4	10 × 1.0	10 × 1.3	8.9 × 3.1
<b>Polarisation</b>	Single Pol.: HH,VV Dual Pol. (HS,SL,SM): HH+VV,HH+HV,VV+VH	Single Pol.: HH,VV,HV,VH Dual Pol. (PP): HH,VV,HV,VH	Single Pol.: VV	Single Pol. (IS): VV,HH	Single Pol.: HH,VV Dual Pol.: HH+HV,VV+VH

Weiter auf der nächsten Seite

	X-Band		C-Band		L-Band	
	TerraSAR-X	COSMO-SkyMed*	ERS-1/-2	Envisat ASAR*		Radarsat-2
<b>Einfallswinkel <math>\theta_i</math></b>	20° – 55° (HS,SL) 20° – 45° (SM,SC)	20° – 59°	19,35° – 26,5°	IS1: 15,0° – 22,9° IS2: 19,2° – 26,7° IS3: 26,0° – 31,4° IS4: 31,0° – 36,3° IS5: 35,8° – 39,4° IS6: 39,1° – 42,8°	20° – 49° (SL,UF,S) 30° – 50° (MLF,F)	38,7° (F8)
<b>Gebietsabdeckung [km × km]</b>	5 × 5 (HS) 10 × 10 (SL) 30 × 50 (SM) 100 × 100 (SC)	10 × 10 (SL) 40 × 40 (HI) 30 × 30 (PP) 100 × 100 (SC Wide)	100 × 100	100 × 100	18 × 8 (SL) 20 × 20 (UF) 50 × 50 (MLF,F) 100 × 100 (S)	70 × 70 (FBS,FBD)
<b>Slant-Range × Azimut Auflösung [m × m]</b> (bezogen auf Single Pol.)	1 × 1.1 (HS) 1 × 2.2 (SL) 1 × 3.3 (SM)	<1 × 1 (SL) <3 × 3 (HI) <15 × 15 (PP) <27 × 27 (SC Wide)	9,6 × 5	9 × 5	1,6 × 0,74 (SL) 1,6 × 2,8 (UF) 3,1 × 4,6 (MLF) 5,2 × 7,7 (F) 9 × 7,7 (S1,S2) 13,5 × 7,7 (S3–7)	8,8 – 9,6 × 5,1 (F8,FBS) 17,6 – 19,3 × 5,0 (F8,FBD)



---

# Abkürzungsverzeichnis

---

ADEN	<i>ALOS Data European Node</i>
ALD	Azimut-Blickrichtung
ALOS	<i>Advanced Land Observation Satellite</i>
ALS	<i>Airborne Laserscanning</i>
AMI	<i>Active Microwave Instrument</i>
AO	<i>Announcement of Opportunity</i>
ASAR	<i>Advanced Synthetic Aperture Radar</i>
ATI	Along-Track-Interferometrie
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CCD	<i>Charge-coupled Device</i>
CE	<i>Circular Error</i>
CSA	<i>Canadian Space Agency</i>
CSK	<i>COSMO-SkyMed</i>
CNSA	<i>China National Space Administration</i>
CONAE	<i>National Space Activities Commission</i>
DInSAR	Differentielle SAR-Interferometrie
DGM	Digitales Geländemodell
DHHN	Deutsches Haupthöhennetz
DHM	Digitales Höhenmodell
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DSK	siehe RAG DSK
DSM	<i>Digital Surface Model</i>
DTED	<i>Digital Terrain Elevation Data</i>
DTM	<i>Digital Terrain Model</i>
D-TomoSAR	Differentielle SAR-Tomographie
EET	<i>ERS-ENVISAT Tandem</i>
EGG07	<i>European Gravimetric Geoid Model</i>

Envisat	<i>Environmental Satellite</i>
ERS	<i>European Remote Sensing Satellite</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
ETRS89	<i>European Terrestrial Reference System 1989</i>
EVRS	<i>European Vertical Reference System</i>
FBD	<i>Fine Beam Dual</i>
FBS	<i>Fine Beam Single</i>
GCP	<i>Ground Control Point</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HH	horizontal polarisiert senden und empfangen
HI	<i>Stripmap HIMAGE</i>
HS	<i>High-Resolution Spotlight</i>
HV	horizontal polarisiert senden und vertikal polarisiert empfangen
IGMC	Institut für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal
InSAR	SAR-Interferometrie
IS	<i>Image Standard</i>
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
JERS	<i>Japanese Earth Resources Satellite</i>
k.A.	keine Angabe
LE	<i>Linear Error</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
LUT	<i>Lookup-Table</i>
MAX	Maximum
MEAN	Mittelwert
MIN	Minimum
ML	Multi-Looking Faktor
MLF	<i>Multi-Look Fine</i>
MSL	<i>Mean Sea Level</i>
NN	Normal-Null
PALSAR	<i>Phased Array L-Band Synthetic Aperture Radar</i>
PP	<i>StripMap PINGPONG</i>
PRF	<i>Pulse Repetition Frequency</i>
PSI	<i>Persistent Scatterer Interferometry</i>
Radar	<i>Radio Detection and Ranging</i>
RAG DSK	RAG Deutsche Steinkohle AG
RAR	<i>Real Aperture Radar</i>
RCS	<i>Radar Cross Section</i>
RDC	<i>Range Doppler Coordinate</i>
RMK	Reihenmesskamera
RMLI	<i>Co-registered Multi-Look Intensity</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RSF	<i>Range Sampling Frequency</i>
SAOCOM	<i>Argentine Microwaves Observation Satellite</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>

---

SBAS	<i>Small Baseline</i>
SC	<i>ScanSAR</i>
SIR	<i>Spaceborne Imaging Radar</i>
SL	<i>Spotlight</i>
SLC	<i>Single Look Complex</i>
SM	<i>Stripmap</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
STDDEV	Standardabweichung
SWACI	<i>Space Weather Application Center Ionosphere</i>
SWST	<i>Sampling Window Start Time</i>
TanDEM-X	<i>TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TECU	<i>Total Electron Content Unit</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
TK	Topographische Karte
TomoSAR	SAR-Tomographie
TSX	<i>TerraSAR-X</i>
UF	<i>Ultra-Fine</i>
VH	vertikal polarisiert senden und horizontal polarisiert empfangen
VHR	<i>Very High Resolution</i>
VTEC	<i>Vertical Total Electron Content</i>
VV	vertikal polarisiert senden und empfangen
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>
XTI	Across-Track-Interferometrie
ZPD	<i>Zenit Path Delay</i>



---

# Symbolverzeichnis

---

$a$	große Halbachse des Ellipsoids [m]
$b$	kleine Halbachse des Ellipsoids [m]
$c$	Lichtgeschwindigkeit [m/s]
$c_{k_i}$	komplexes SAR-Signal
$c_{k_i}^*$	konjugiert komplexes SAR-Signal
$d$	Differenzen
$dh_i$	Höhendifferenzen [m]
$f$	Frequenz [Hz]
$f_a$	Pulswiederholrate (PRF) [Hz]
$f_d$	Abtastfrequenz (RSF) [Hz]
$f_D$	Dopplerfrequenz [Hz]
$f_{DC}$	Dopplerschwerpunktfrequenz [Hz]
$f_c$	Trägerfrequenz [Hz]
$f_{\phi,crit}$	kritischer Phasengradient [Zyklen/Pixel]
$g_{az}$	Azimuthverschiebung [m]
$g_l$	Layover-Bereich am Boden [m]
$h$	ellipsoidische Höhe [m]
$k$	Boltzmann-Konstante [J/K] oder Kamerakonstante [m]
$\vec{n}$	Normalenvektor der lokalen Bildebene
$\vec{n}$	Flächennormalenvektor
$n_L$	Zeilennummer [–]
$p_a$	Pixelgröße in Azimut [m]
$p_d$	Pixelgröße in Schrägentfernung [m]
$p_g$	Pixelgröße in Bodenentfernung [m]
$p_x$	Pixelgröße in x-Richtung [m]
$p_y$	Pixelgröße in y-Richtung [m]
$r_l$	Layover-Bereich in Schrägentfernung [m]
$t$	Zeit [s]

$u$	Neigungswinkel relativ zur Z-Achse [°]
$v$	Aspektwinkel relativ zur X-Achse [°]
$v_S$	Sensorgeschwindigkeit [m/s]
$v_P$	Objektgeschwindigkeit [m/s]
$v_{PR}$	Objektgeschwindigkeit in radialer Richtung [m/s]
$v_{SR}$	Sensorgeschwindigkeit in radialer Richtung [m/s]
$v_{\text{displ}}$	Verschiebungsgeschwindigkeit in LOS-Richtung [m/s]
$v_{\perp}$	Radialgeschwindigkeit [m/s]
$v_i$	Verbesserung
$z$	Vertikalkomponente des Vektors $R$ [m]
$A$	Amplitude [db]
$A(r, a)$	lokale Beleuchtungsfläche [m <sup>2</sup> ]
$B$	räumliche Basislinie [m]
$B_{  }$	parallele Basislinie [m]
$B_{\perp}$	senkrechte Basislinie [m]
$B_{\perp, \text{crit}}$	kritische Basislinie [m]
$B_{\text{max}}$	maximale Basislinie [m]
$B_s$	Gesamtbasislinie senkrecht zur Range-Azimut-Ebene [m]
$B_p$	Bandbreite in Range [Hz]
$F_N$	Rauschzahl
$G$	Antennengewinn [–]
$H$	Höhe [m]
$I$	Intensität [dB]
$K$	Refraktionskonstante [m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> ]
$L_a$	Länge der realen SAR-Antenne [m]
$L_{sa}$	Länge der synthetischen Antenne [m]
$L_{\text{ges}}$	Verlustfaktoren während des Sende- und Empfangsvorgang
$P$	Objektposition [m]
$P_E$	empfangene Leistung [W]
$P_N$	Empfängerrauschen [W]
$P_S$	Signalleistung [W]
$R$	Schrägdistanz zwischen Sensor und Objekt [m]
$R_E$	geozentrischer Erdradius [m]
$R_{E,S}$	Erdradius unter dem Sensor [m]
$R_{E,P}$	Erdradius unter dem Objektpunkt [m]
$S$	Sensorposition [m]
$T_{\text{eff}}$	effektive Rauschtemperatur [K]
$\alpha$	Geländeneigung [°]
$\alpha_h$	Azimut- oder Kurswinkel [°]
$\beta$	Winkel zwischen $R$ und $R_{E,P}$ [°]
$\beta_E$	reduzierte Breite [°]
$\beta_r$	Öffnungswinkel in Range [°]
$\beta_a$	Öffnungswinkel in Azimut [°]
$\beta^0(r, a)$	Radarhelligkeit [°]
$\gamma$	Korrelationskoeffizient [–]

---

$\gamma_E$	geozentrische Breite [°]
$\delta$	Winkel zwischen $R_{E,S}$ und $R_{E,P}$ [°]
$\Delta g$	horizontale Fehlpositionierung [m]
$\Delta h$	Höhendifferenz [m]
$\Delta r_z$	vertikale Verschiebung [m]
$\Delta t$	Zeitdifferenz, Wiederholzyklus [s]
$\Delta R$	Weglängenunterschied [s]
$\theta$	Blickwinkel [°]
$\theta_d$	Depressionswinkel [°]
$\theta_i$	ellipsoidischer Einfallswinkel [°]
$\theta_{li}$	lokaler Einfallswinkel [°]
$\lambda$	Wellenlänge des Signals [m]
$\mu$	Mittelwert
$\xi$	Basislinienwinkel [°]
$\rho_a$	geometrische Auflösung in Azimut [m]
$\rho_{ax}$	lokale Azimutauflösung [m]
$\rho_g$	geometrische Auflösung in Ground-Range [m]
$\rho_{gx}$	lokale Auflösung in Ground-Range [m]
$\rho_r$	geometrische Auflösung in Slant-Range [m]
$\rho_s$	geometrische Auflösung in der Höhe [m]
$\sigma$	Standardabweichung oder Radarrückstreuquerschnitt (RCS) [m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{B_s}$	Standardabweichung der Basislinienverteilung [m]
$\sigma^0$	normalisierter Rückstreuoeffizient [–]
$\tau_p$	Sendeimpulsdauer [s]
$\tau_e$	effektive Impulslänge [s]
$\tau$	Range-Zeit [s]
$\phi$	Phase des Radarsignals [rad]
$\varphi$	geographische Breite [°]
$\psi$	Projektionswinkel [°]
$\omega_E$	Erdrotation [m/s]
$\partial$	Fehler



---

# Literaturverzeichnis

---

- Adam, N., R. Bamler, M. Eineder, & B. Kampes (2005). Parametric Estimation and Model Selection based on Amplitude-only Data in PS-Interferometry. In *Proceedings of the Fringe Workshop 2005, 28 November-2 December*, Frascati, Italy. ESA SP-610, ISBN 92-9092-921-9. [↑34](#), [↑101](#).
- Albertz, J. (2001). *Einführung in die Fernerkundung - Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern* (2. Aufl.). Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. ISBN 3-534-14624-7. [↑35](#).
- Baltsavias, E. P. (1999). Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, pp. 199–214. [↑43](#).
- Bamler, R. (2000). Interferometric Stereo Radargrammetry: Absolute Height Determination from ERS-ENVISAT Interferograms. In *Proceedings of the IGARSS 2000, 24-28 July*, Honolulu, USA, pp. 742–745. [↑44](#).
- Bamler, R., M. Eineder, N. Adam, X. X. Zhu, & S. Gernhardt (2009). Interferometric Potential of High Resolution Spaceborne SAR. *PFG, Heft 5*, pp. 407–419. [↑34](#).
- Bamler, R. & B. Schättler (1993). SAR Data Acquisition and Image Formation. In G. Schreier (Hrsg.), *SAR Geocoding: Data and Systems*, pp. 53–102. Wichmann Verlag, Karlsruhe. ISBN 3-87907-247-7. [↑142](#).
- Bartelme, N. (2005). *Geoinformatik - Modelle, Strukturen, Funktionen* (4. Aufl.). Springer Verlag, Berlin. ISBN 3-540-20254-4. [↑42](#), [↑46](#).
- Bayer, T., R. Winter, & G. Schreier (1991). Terrain influences in SAR backscatter and attempts to their correction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 19(3), pp. 451–462. [↑40](#).

- Beaudoin, A., N. Stussi, D. Troufleau, N. Desbois, L. Piet, & M. Deshayes (1995). On the use of ERS-1 SAR data over hilly terrain: Necessity of radiometric corrections for thematic applications. In *Proceedings of the IGARSS 1995, 10-14 July*, Florence, Italy, pp. 2179–2182. [↑40](#).
- Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, & 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), pp. 2375–2383. [↑32](#).
- Bickel, D. L., W. H. Hensley, & D. A. Yocky (1997). The Effect of Scattering from Buildings on Interferometric SAR Measurements. In *Proceedings of the IGARSS 1999, 3-8 Aug*, Volume 4, Singapore, pp. 1545–1547. [↑99](#).
- Bignone, F. & H. Umakawa (2008). Assessment of ALOS PRISM Digital Elevation Model Extraction over Japan. In *Proceedings of the XXI ISPRS Congress Beijing 2008, 3-11 July*, Volume XXXVII, Beijing, China. ISSN 1682-1750. [↑147](#).
- Bill, R. (2010). *Grundlagen der Geo-Informationssysteme* (5. Aufl.). Wichmann Verlag, Berlin. ISBN 3-87907-489-1. [↑42](#).
- Bors, A. G., E. R. Hancock, & R. C. Wilson (2003). Terrain Analysis Using Radar Shape-from-Shading. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *25*(9r), pp. 974–992. [↑45](#).
- Breit, H., T. Fritz, U. Balss, M. Lachaise, A. Niedermeier, & M. Vonavka (2010). TerraSAR-X SAR Processing and Products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *48*(2), pp. 727–740. [↑24](#), [↑57](#), [↑61](#), [↑80](#).
- Chang, C. Y. & J. C. Curlander (1992). Application of the Multiple PRF Technique to Resolve Doppler Centroid Estimation Ambiguity for Spaceborne SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *30*(5), pp. 941–949. [↑31](#).
- Cloude, S. R. & K. P. Papathanassiou (1998). Polarimetric SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *36*(5), pp. 1551–1565. [↑16](#), [↑32](#).
- Costantini, M. (1998). A Novel Phase Unwrapping Method Based on Network Programming. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *36*(3), pp. 813–821. [↑33](#), [↑71](#).
- Crespi, M., L. De Vendictis, A. Grün, G. I. and D. Poli, F. Volpe, & X. Wang (2007). DSM Extraction from Quickbird and Cartosat Stereopairs: Quality assessment and comparison. In *Proceedings of the 8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques 2007, 9-12 July*, Volume 1, Zurich, Switzerland, pp. 195–203. [↑147](#).
- Crespi, M. G., G. Colosimo, L. De Vendictis, F. Fratarcangeli, F. Giannone, K. Jacobsen, F. Mastracci, F. Pieralice, & F. Volpe (2009). Quality assessment and comparison of DSMs extracted from WorldView-1 stereo pair. In *Proceedings of the 29th EARSeL Symposium 2009, 15-18 June*, Chania, Greece. [↑147](#).
- Crosetto, M. (2002). Calibration and validation of SAR interferometry for DEM generation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *57*, pp. 213–227. [↑41](#).

- Curlander, J. C. (1982). Location of Spaceborne SAR Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *GE-20*(3), pp. 359–364. [↑35](#), [↑36](#).
- d'Angelo, P., A. Uttenthaler, S. Carl, F. Barner, & P. Reinhardt (2010). Automatic Generation of High Quality DSM Based on IRS-P5 CARTOSAT-1 Stereo Data. In *Proceedings of the ESA Living Planet Symposium 2010, 28 June-2 July*, Bergen, Norway. ESA SP-686, ISBN 978-92-9221-250-6. [↑147](#).
- Domik, G. (1985). Radar image simulation as a tool to analyze topographic effects on geometry and radiometry of radar imagery. In *Proceedings of the 11th International Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data 1985, 25-27 June*, Indiana, USA. [↑40](#).
- Domik, G., M. Kobrick, & F. Leberl (1984). Analyse von Radarbildern mittels digitaler Höhenmodelle. *Bildmessung und Luftbildwesen*, *5*, pp. 249–263. [↑36](#), [↑40](#).
- Eineder, M., T. Fritz, J. Mittermayer, A. Roth, E. Börner, H. Breit, & B. Bräutigam (2010). TerraSAR-X Ground Segment, Basic Product Specification Document. TX-GS-DD-3302 Issue 1.7, Cluster Applied Remote Sensing (CAF), DLR, Oberpfaffenhofen, Germany. Date: 15.10.2010. [↑6](#), [↑9](#).
- Eineder, M., C. Minet, X. Cong, T. Fritz, & P. Steigenberger (2010). Towards Imaging Geodesy - Achieving Centimetre Pixel Localization Accuracy with TerraSAR-X. In *Proceedings of the EUSAR 2010*, pp. 222–225. [↑56](#).
- Eineder, M., C. Minet, P. Steigenberger, X. Cong, & T. Fritz (2011). Imaging Geodesy - Towards Centimetre-Level Ranging Accuracy With TerraSAR-X. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *49*(2), pp. 661–671. [↑24](#).
- Ferretti, A., A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, & A. Rucci (2011). A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *49*(9), pp. 3460–3470. [↑33](#).
- Ferretti, A., C. Prati, & F. Rocca (1999). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. In *Proceedings of the IGARSS 1999, 28 June-2 July*, Hamburg, Germany, pp. 1528–1530. [↑33](#).
- Ferretti, A., C. Prati, & F. Rocca (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *39*(1), pp. 8–20. [↑141](#).
- Fornaro, G., D. Reale, & F. Serafino (2009). Four-Dimensional SAR Imaging for Height Estimation and Monitoring of Single and Double Scatterers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *47*(1), pp. 224–237. [↑33](#).
- Fornaro, G. & F. Serafino (2006). Imaging of Single and Double Scatterers in Urban Areas via SAR Tomography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *44*(12), pp. 3497–3505. [↑34](#).
- Frankot, R. T. & R. Chellappa (1990). Estimation of surface topography from SAR imagery using shape from shading techniques. *Artificial Intelligence*, *43*(3), pp. 271–310. [↑45](#).

- Garestier, F., P. C. Dubois-Fernandez, & K. P. Papathanassiou (2008). Pine Forest Height Inversion Using Single-Pass X-Band PolInSAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(1), pp. 59–68. [↑17](#).
- Ge, N. (2010). Ein Multi-Temporales L2-Norm-Basiertes Auswerteverfahren für SAR-Szenen-Stapel zur Ableitung von Bodenbewegungen. Masterarbeit, TU Clausthal. [↑33](#).
- Gelautz, M., P. Paillou, & C. Chen (1999). Topographic Surface Reconstruction Using Interferometric and Stereo Techniques. In *Proceedings of the IGARSS 1999, 28 June-2 July*, Hamburg, Germany, pp. 1927–1929. [↑44](#).
- Goblirsch, W. (1997). The Exact Solution of the Imaging Equations for Crosstrack Interferometers. In *Proceedings of the IGARSS 1997, 5-8 August*, Singapore. [↑56](#).
- Goldstein, R. M., H. A. Zebker, & C. L. Werner (1988). Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23(4), pp. 713–720. [↑33](#).
- Göpfert, J. & C. Heipke (2006). Assessment of Lidar DTM accuracy in coastal vegetated areas. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IA-PRS)*, XXXVI/3, pp. 79–85. [↑43](#).
- Guindon, B. (1995). Performance evaluation of real-simulated image matching techniques in the acquisition of ground control for ERS-1 image geocoding. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 50(1), pp. 2–11. [↑38](#).
- Haala, N. (2005). Multi-Sensor-Photogrammetrie. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 589, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck, München. Habilitationsschrift, ISBN 3-7696-5028-10. [↑43](#).
- Haala, N., H. Hastedt, C. Ressler, & K. Wolf (2010). DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamerasysteme - Themenschwerpunkt Höhenmodelle. In *DGPF Tagungsband 19/2010 - Dreiländertagung OVG, DGPF und SGPF, Wien*, pp. 22–31. ISSN 0942-2870. [↑43](#), [↑44](#).
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Remote Sensing and Digital Image Processing. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. ISBN 0-7923-6945-9. [↑9](#), [↑20](#), [↑22](#), [↑23](#), [↑24](#), [↑25](#), [↑26](#), [↑27](#), [↑28](#), [↑31](#), [↑32](#), [↑56](#).
- Hein, A. (2000). Verarbeitung von SAR-Daten unter besonderer Berücksichtigung interferometrischer Anwendungen. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Siegen. [↑35](#).
- Hellwich, O. & H. Ebner (2000). Geocoding SAR interferograms by least squares adjustment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55, pp. 277–288. [↑41](#).
- Hillman, A., P. Rolland, R. Périard, , A. Luscombe, M. Chabot, C. Chen, & N. Martens (2010). RADARSAT-2 continuing system operations and performance. In *Proceedings of the IGARSS 2010, 25-30 July*, Honolulu, USA. [↑57](#).

- Hoen, E. W. & H. A. Zebker (2000). Penetration Depths Inferred from Interferometric Volume Decorrelation Observed over the Greenland Ice Sheet. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(6), pp. 2571–2583. [↑31](#).
- Holecz, F., E. Meier, & D. Nüesch (1993). Postprocessing of Relief Induced Radiometric Distorted Spaceborne SAR Imagery. In G. Schreier (Hrsg.), *SAR Geocoding: Data and Systems*, pp. 299–352. Wichmann Verlag, Karlsruhe. ISBN 3-87907-247-7. [↑9](#), [↑137](#).
- Holecz, F., E. Meier, J. Piesbergen, D. Nüesch, & J. Moreira (1994). Rigorous Derivation of Backscattering Coefficient. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Newsletter* (92), pp. 6–14. [↑40](#).
- Homer, J., I. D. Longstaff, & G. Callaghan (1996). High resolution 3-D SAR via multi-baseline interferometry. In *Proceedings of the IGARSS 1996, 27-31 May*, Lincoln, USA, pp. 796–798. [↑33](#).
- Hooper, A. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(L16302). [↑33](#).
- Horn, B. K. P. (1975). Obtaining shape from shading information. In P. Winston (Hrsg.), *The Psychology of Computer Vision (Chapter 4)*, pp. 115–155. McGraw-Hill, New York. [↑45](#).
- Huber, M., W. Hummelbrunner, J. Raggam, D. Small, & D. Kosmann (2004). Technical Aspects of Envisat ASAR Geocoding Capability at DLR. In *Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium, 6-10 September*, Salzburg, Austria. ESA SP-572. [↑38](#), [↑39](#).
- Hug, C., A. Ulrich, & A. Grimm (2004). Litemapper-5600 - A Waveform-Digitizing LIDAR Terrain and Vegetation Mapping System. *Proceedings of the ISPRS working group VIII/2 „Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment“, 3-6 October*, XXXVI(Part 8/W2), pp. 24–29. [↑43](#).
- Intermap Technologies (2011). Product Handbook. Technical Report Standard Edition, v4.4. [↑73](#).
- Jacobsen, K. (2011). Recent Developments of Digital Cameras and Space Imagery. In *Proceedings of the GIS Ostrava 2011, 23-26 January*, Ostrava, Czech Republic. [↑43](#), [↑147](#).
- Jehle, M., D. Perler, D. Small, A. Schubert, & E. Meier (2008). Estimation of Atmospheric Path Delays in TerraSAR-X Data using Models vs. Measurements. *Sensors*, 8(12), pp. 8479–8491. [↑24](#).
- JPL (1986). Shuttle Imaging Radar-C Science Plan. JPL Publication 86-29, JPL, California Institute of Technology, Pasadena, USA. [↑16](#).
- Just, D. & R. Bamler (1994). Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radar. *Applied Optics*, 33(20), pp. 4361–4368. [↑31](#), [↑141](#).
- Kahmen, H. (2006). *Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde* (20. Aufl.). Walter de Gruyter, Berlin. ISBN 3-11-018464-8. [↑36](#).

- Karel, W., N. Pfeifer, & C. Briese (2006). DTM Quality Assessment. In *Proceedings of the ISPRS Technical Commission II Symposium 2006, 12-16 July*, Volume XXXVI, Vienna, Austria. [↑43](#).
- Kellndorfer, J., W. Walker, L. Pierce, C. Dobson, J. A. Fites, C. Hunsaker, J. Vona, & M. Clutter (2004). Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets. *Remote Sensing of Environment*, 93, pp. 339–358. [↑16](#), [↑17](#).
- Klausning, H. & W. Holpp (2000). *Radar mit realer und synthetischer Apertur: Konzeption und Realisierung*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, Wien. ISBN 3-486-23475-7. [↑9](#), [↑14](#), [↑15](#), [↑139](#), [↑140](#), [↑142](#).
- Knöpfle, W., G. Strunz, & A. Roth (1998). Mosaicking of Digital Elevation Models derived by SAR Interferometry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)*, 32(Part 4 "GIS-Between Visions and Applications"), pp. 306–313. [↑45](#).
- Konecny, G. & G. Lehmann (1984). *Photogrammetrie* (4. Auflage Aufl.). Walter de Gruyter, Berlin. ISBN 3-11-007358-7. [↑43](#).
- Kraus, K. (2000). *Photogrammetrie. Band 3 - Topographische Informationssysteme* (1. Aufl.). Dümmler Verlag, Köln. ISBN 3-427-78751-6. [↑42](#).
- Kraus, K. (2004). *Photogrammetrie. Band 1 - Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen* (7. Aufl.). Walter de Gruyter, Berlin. ISBN 3-11-017708-0. [↑43](#), [↑47](#).
- Krieger, G., A. Moreira, H. Fiedler, I. Hajnsek, M. Werner, M. Younis, & M. Zink (2007). TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(11), pp. 3317–3341. [↑45](#).
- Kropatsch, W. G. & D. Strobl (1990). The Generation of SAR Layover and Shadow Maps From Digital Elevation Models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(1), pp. 98–107. [↑10](#), [↑12](#).
- Kugler, F., F. N. Koudogbo, K. Gutjahr, & K. P. Papathanassiou (2006). Frequency Effects in Pol-InSAR Forest Height Estimation. In *Proceedings of the EUSAR 2006, 16-18 May*, Dresden, Germany. [↑17](#).
- Kwok, R., J. C. Curlander, & S. S. Pang (1987). Rectification of Terrain Induced Distortions in Radar Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53(5), pp. 507–513. [↑35](#).
- Lanari, R., O. Mora, M. Manunta, J. J. Mallorquí, P. Berardino, & E. Sansosti (2004). A Small-Baseline Approach for Investigating Deformations on Full-Resolution Differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(7), pp. 1377–1386. [↑33](#).
- Leberl, F. (1978). Satellitenradargrammetrie. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 239, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck, München. ISBN 3-7696-9294-2. [↑44](#).

- Lombardini, F. (2005). Differential Tomography: A New Framework for SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(1), pp. 37–44. [↑33](#).
- Madsen, S. N., H. A. Zebker, & J. M. Martin (1993). Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(1), pp. 246–256. [↑26](#), [↑41](#).
- Massonnet, D. & J.-C. Souyris (2008). *Imaging with Synthetic Aperture Radar*. Engineering Sciences, Electrical Engineering. EPFL Press. ISBN 2-940222-15-5. [↑7](#), [↑9](#), [↑14](#), [↑15](#), [↑17](#), [↑140](#), [↑141](#), [↑142](#).
- Meier, E. (1989). *Geometrische Korrektur von Bildern orbitgestützter SAR-Systeme*, Volume 15 of *Remote Sensing Series*. Department of Geography, University of Zurich. Editor: Prof. Dr. H. Haefner, Prof. Dr. K. Itten, Dr. H. Maurer, PD Dr. D. Nüesch. [↑9](#), [↑10](#), [↑11](#), [↑12](#), [↑35](#), [↑36](#), [↑37](#), [↑62](#), [↑63](#), [↑137](#).
- Meier, E., U. Frei, & D. Nüesch (1993). Precise Terrain Corrected Geocoded Images. In G. Schreier (Hrsg.), *SAR Geocoding: Data and Systems*, pp. 173–185. Wichmann Verlag, Karlsruhe. ISBN 3-87907-247-7. [↑38](#).
- Meyer, F. & S. Hinz (2004). The Feasibility of Traffic Monitoring with TerraSAR-X - Analyses and Consequences. In *Proceedings of the IGARSS 2004, 20-24 September*, Anchorage, USA. [↑14](#).
- Meyer, F. J. (2004). Simultane Schätzung von Topographie und Dynamik polarer Gletscheraus multi-temporalen SAR Interferogrammen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 579, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck, München. ISBN 3-7696-5018-2. [↑21](#), [↑26](#), [↑56](#).
- Miranda, N., B. Rosich, C. Santella, & M. Grion (2004). Review of the impact of ERS-2 piloting modes on the SAR doppler stability. In *Proceedings of the ENVISAT & ERS Symposium 2004, 6-10 September*, Salzburg, Austria. ESA SP-572, ISBN 92-9092-883-2. [↑31](#).
- Mitchell, G. (2010). PhotoSat WorldView-2 Stereo Satellite DEM Comparison to a LiDAR DEM over the Garlock Fault in Southeast California [Online]. [http://www.digitalglobe.com/downloads/case\\_studies](http://www.digitalglobe.com/downloads/case_studies). [↑147](#).
- Monti Guarnieri, A. & C. Prati (2000). ERS-ENVISAT combination for interferometry and super-resolution. In *Proceedings of ERS-Envisat Symposium 2000, 16-20 October*, Gothenburg, Sweden. [↑45](#).
- Moreira, A. (2000). Radar mit synthetischer Apertur: Grundlagen und Signalverarbeitung. Habilitationsschrift. [↑8](#), [↑9](#), [↑19](#), [↑140](#), [↑142](#).
- Musiedlak, J. & V. Spreckels (2006). Zur Einführung neuer geodätischer Bezugssysteme im Bereich des deutschen Steinkohlenbergbaus - Erfahrungen, Ergebnisse und Ausblicke.

- In *Beiträge der GDMB-Tagung „Computereinsatz im Bergbau“ 2006, 5-6 September, Kassel, Deutschland*. ↑68.
- Naraghi, M., W. Stromberg, & M. Daily (1983). Geometric rectification of radar imagery using digital elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, XLIX(2), pp. 195–200. ↑40.
- Nico, G. (2002). Exact Closed-Form Geolocation for SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(1), pp. 220–222. ↑41.
- Raggam, J., D. Strobl, & W. Hummelbrunner (1993). Product Quality Enhancement and Quality Evaluation. In G. Schreier (Hrsg.), *SAR Geocoding: Data and Systems*, pp. 187–206. Wichmann Verlag, Karlsruhe. ISBN 3-87907-247-7. ↑39.
- Rauste, Y. (1989). Methods for Analyzing SAR images. Research Report 612, Laboratory of Instrument Technology, National Research Centre, Espoo, Finland. ↑40.
- Reigber, A. & A. Moreira (2000). First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multibaseline L-Band Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), pp. 2142–2152. ↑16, ↑33, ↑34.
- Reigber, C., Y. Xia, H. Kaufmann, F.-H. Massmann, L. Timmen, J. Bodechtel, & M. Frei (1997). Impact of Precise Orbits on SAR Interferometry. In *Proceedings of the Fringe Workshop 1996 on ERS SAR Interferometry, 30 September-2 October, Zurich, Switzerland*. ESA SP-406. ↑56.
- Rosen, P. A., S. Hensley, E. Gurrola, F. R. S. Chan, J. Martin, & Ern (2001). SRTM C-Band Topographic Data: Quality Assessment and Calibration Activities. In *Proceedings of the IGARSS 2001, 9-13 July, Sydney, Australia*. ↑45.
- Rosen, P. A., S. Hensley, I. R. Joughin, F. K. Li, S. N. Madsen, E. Rodríguez, & R. M. Goldstein (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), pp. 333–382. ↑26.
- Roth, A., A. Craubner, & T. Hügel (1993). Standard Geocoded Ellipsoid Corrected Images. In G. Schreier (Hrsg.), *SAR Geocoding: Data and Systems*, pp. 159–172. Wichmann Verlag, Karlsruhe. ISBN 3-87907-247-7. ↑35.
- Roth, A., M. Eineder, B. Rabus, E. Mikusch, & B. Schättler (2001). SRTM / X-SAR: Products and Processing Facility. In *Proceedings of the IGARSS 2001, 9-13 July, Sydney, Australia*. ↑45.
- Roth, A., W. Knöpfle, S. Gernhardt, B. Rabus, & D. Scales (1998). Evaluation of Interferometric Digital Elevation Models Derived from ERS Tandem Data. In *Proceedings of the ISPRS Commission II Symposium „Data Integration: Systems and Techniques“, 13-17 July, Volume XXXII, Cambridge, UK*, pp. 242–247. ↑45.
- Sarabandi, K. & Y.-C. Lin (2000). Simulation of Interferometric SAR Response for Characterizing the Scattering Phase Center Statistics of Forest Canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(1), pp. 115–125. ↑16, ↑17, ↑31.

- Scheiber, R. (2004). Hochauflösende Interferometrie für Radar mit synthetischer Apertur. Technical Report Forschungsbericht 2004-12, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). [↑20](#), [↑29](#).
- Schreier, G. (1993). *SAR Geocoding: Data and Systems*. Wichmann Verlag, Karlsruhe. ISBN 3-87907-247-7. [↑8](#), [↑9](#), [↑10](#), [↑11](#), [↑14](#), [↑35](#).
- Schuler, D. L., J.-S. Lee, & G. D. Grandi (1996). Measurement of Topographic Using Polarimetric SAR Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(5), pp. 1266–1277. [↑45](#).
- Schwäbisch, M. (1995). Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemodelle. Technical Report 95-25, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). [↑22](#), [↑25](#), [↑26](#), [↑41](#), [↑49](#), [↑50](#), [↑51](#).
- Seo, D. C., J. Y. Yang, D. H. Lee, J. H. Song, & H. S. Lim (2008). Kompsat-2 direct sensor modeling and geometric calibration/validation. In *Proceedings of the XXI ISPRS Congress Beijing 2008, 3-11 July*, Volume XXXVII, Beijing, China. ISSN 1682-1750. [↑147](#).
- Small, D., S. Biegger, & D. Nüesch (2000). Automated tiepoint retrieval through heteromorphic image simulation for spaceborne SAR sensors. In *Proceedings of the ERS-ENVISAT Symposium 2000, 16-20 October*, Gothenburg, Sweden. ESA SP-461. [↑38](#), [↑39](#).
- Small, D., F. Holecz, E. Meier, & D. Nüesch (1998). Absolute Radiometric Correction in Rugged Terrain: A Plea for Integrated Radar Brightness. In *Proceedings of the IGARSS 1998, 6-10 July*, Seattle, USA. [↑40](#).
- Small, D., P. Pasquali, & S. Fuglistaler (1996). A comparison of phase to height conversion methods for SAR interferometry. In *Proceedings of the IGARSS 1996, 27-31 May*, Lincoln, USA. [↑41](#), [↑50](#), [↑56](#).
- Small, D., C. Werner, & Daniel (1995). Geocoding and validation of ERS-1 InSAR-derived digital elevation models. *EARSeL Advances in Remote Sensing*, 4(2), pp. 26–39. [↑41](#).
- Solberg, S., D. J. Weydahl, & E. Næsset (2007). SAR forest canopy penetration depth as an indicator for forest health monitoring based on leaf area index (LAI). In *Proceedings of the 5th International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, 25-28 September 2007*, Bari, Italy. [↑17](#).
- Spreckels, V. & A. Schlienkamp (2010). DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme - Themenschwerpunkt Stereoplotting. In *DGPF Tagungsband 19/2010 - Dreiländertagung OVG, DGPF und SGPF, 30 June-3 July*, Wien, Österreich, pp. 32–50. [↑44](#), [↑72](#).
- Sörgel, U. (2003). Iterative Verfahren zur Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden in SAR- und InSAR-Daten. Dissertation, Universität Hannover. [↑6](#), [↑13](#).
- SWACI (2011). Space Weather Application Center Ionosphere. [Online]. <http://swaciweb.dlr.de>. [↑24](#).

- Thiele, A., E. Cadario, & S. Hinz (2009). Fusion of InSAR and GIS data for 3D building reconstruction and change detection. In *Proceedings of the Fringe Workshop 2009, 30 November-4 December*, Frascati, Italy. ESA SP-677. [↑100](#).
- Thiele, A., E. Cadario, K. Schulz, U. Thoennessen, & U. Sörgel (2007). InSAR Phase Profiles at Building Locations. In *Proceedings of the ISPRS Photogrammetric Image Analysis 2007, 19-20 September*, Number Part 3/W49A, Munich, Germany, pp. 203–208. [↑100](#).
- Thiele, A., J. D. Wegner, & U. Sörgel (2010). Building Reconstruction from Multi-aspect InSAR Data. In U. Sörgel (Hrsg.), *Radar Remote Sensing of Urban Areas*, pp. 187–214. Springer Verlag, Dodrecht. ISBN 978-90-481-3750-3. [↑99](#), [↑102](#).
- Toutin, T. (1996). Opposite-side ERS-1 SAR stereo mapping over rolling topography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2), pp. 543–549. [↑45](#).
- Toutin, T. (2010). Impact of Radarsat-2 SAR Ultrafine-Mode Parameters on Stereo-Radargrammetric DEMs. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(10), pp. 3816–3823. [↑45](#).
- Toutin, T., P. Brian, & R. Chenier (2004). DTM Generation from SPOT HRS In-Track Stereo Images. In *Proceedings of the XX ISPRS Congress Istanbul 2004, 12-23 July*, Volume XXXV, Istanbul, Turkey, pp. 416–420. [↑147](#).
- Toutin, T. & L. Gray (2000). State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55, pp. 13–33. [↑44](#).
- Ulander, L. M. H. (1996). Radiometric Slope Correction of Synthetic-Aperture Radar Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(5), pp. 1115–1122. [↑39](#), [↑40](#).
- Usai, S. (2001). A New Approach for Long Term Monitoring of Deformations by Differential SAR Interferometry. PhD Thesis, Delft University of Technology. [↑33](#).
- Usai, S., C. D. Gaudio, S. Borstrom, & V. Achilli (1999). Monitoring Terrain Deformations at Phlegrean Fields with SAR Interferometry. In *Proceedings of the Fringe Workshop 1999, 10-12 November*, Liège, Belgium. ESA SP-478. [↑32](#).
- Wagner, W., A. Ulrich, & C. Briese (2003). Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation*, 91(4), pp. 223–235. [↑43](#).
- Walter, D., U. Wegmüller, V. Spreckels, W. Hannemann, & W. Busch (2009). Interferometric monitoring of an active underground mining field with high-resolution SAR sensors. In *Proceedings of the ISPRS Hannover Workshop 20097 "High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information"*, 2-5 June, Hannover, Germany. [↑106](#).
- Wegmüller, U. (1999). Automated terrain corrected SAR geocoding. In *Proceedings of the IGARSS 1999, 28 June-2 July*, Hamburg, Germany. [↑38](#), [↑40](#).

- Wegmüller, U., M. Santoro, C. Werner, & T. Strozzi (2009). DEM generation using ERS-ENVISAT interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1), pp. 51–58. [↑45](#).
- Wegmüller, U., D. Walter, V. Spreckels, & C. L. Werner (2010). Nonuniform Ground Motion Monitoring With TerraSAR-X Persistent Scatterer Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(2), pp. 895–904. [↑33](#).
- Werner, C., U. Wegmüller, T. Strozzi, A. Wiesmann, & M. Santoro (2007). PALSAR Multi-Mode Interferometric Processing. In *Proceedings of the First Joint PI Symposium of ALOS data nodes for ALOS Science Program, 19-23 November*, Kyoto, Japan. [↑70](#).
- Wessel, B. (2006). Automatische Extraktion von Straßen aus SAR-Bilddaten. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 600, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck, München. ISBN 3-7696-5039-5. [↑14](#), [↑140](#).
- Weydahl, D. J., J. Sagstuen, Ø. B. Dick, & H. Rønning (2007). SRTM DEM accuracy assessment over vegetated areas in Norway. *International Journal of Remote Sensing*, 28(16), pp. 3513–3527. [↑17](#).
- Wild, U. (1994). Ionosphere and geodetic satellite systems: Permanent GPS tracking data for modelling and monitoring. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz 48, Schweizerische Geodätische Kommission. [↑24](#).
- Wolff, K. & A. Grün (2007). DSM Generation from early ALOS/PRISM Data using SAT-PP. In *Proceedings of the ISPRS Hannover Workshop 2007 "High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information"*, 29 May-1 June, Volume XXXVI, Hannover, Germany. [↑147](#).
- Woodhouse, I. H. (2006). *Introduction to Microwave Remote Sensing*. CRC Press. ISBN 0-415-27123-1. [↑6](#), [↑9](#), [↑11](#), [↑135](#).
- Wu, C., B. Barkan, B. Huneycutt, C. Leang, & S. Pang (1981). An Introduction to the Interim Digital SAR Processor and the Characteristics of the Associated Seasat SAR Imagery. JPL Publication 81-26, JPL, California Institute of Technology, Pasadena, USA. [↑35](#), [↑136](#).
- Zebker, H. A. & R. M. Goldstein (1986). Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research (JGR)*, 91(B5), pp. 4993–4999. [↑20](#), [↑26](#).
- Zebker, H. A. & J. Villasenor (1992). Decorrelation in interferometric radar echos. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5), pp. 950–959. [↑32](#).
- Zhu, X. X. & R. Bamler (2010). Very High Resolution Spaceborne SAR Tomography in Urban Environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(12), pp. 4296–4308. [↑33](#), [↑34](#).



## Danksagung

Abschließend möchte ich allen Personen danken, die zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben. An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Busch, Leiter des Instituts für Geotechnik und Markscheidewesen der Technischen Universität Clausthal, für die fachliche Betreuung der Arbeit, die vielen fruchtbaren und häufig sehr langen Diskussionen, jeden Ansporn sowie für sein großes Vertrauen, seine stets volle Unterstützung und Wegweisung innerhalb der letzten knapp 6 Jahre.

Ich danke Prof. Dr.-Ing. Uwe Sörgel, Professor für Radarfernerkundung und aktive Systeme am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation der Leibniz Universität, für seine Bereitschaft die Funktion als Mitberichterstatter zu übernehmen, sowie die guten und sehr hilfreichen Diskussionen. Prof. Dr.-Ing. Norbert Meyer danke ich für die bereitwillige Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Volker Spreckels von der RAG danke ich für den vielfältig fachlichen Gedankenaustausch, die neuen Ideen, wertvollen Diskussionen, jede gemeinsame und spannende Projektarbeit im Bereich der Radarinterferometrie innerhalb der letzten Jahre sowie jede Unterstützung und Weitergabe seiner fundierten Kenntnisse auf dem Gebiet der Photogrammetrie und Geodäsie. Der RAG danke ich für die Bereitstellung der Daten.

Ursula Marschalk vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in Oberpfaffenhofen danke ich für die immer schnelle Hilfe bei der Bereitstellung von SRTM-Daten.

Zu großem Dank verpflichtet bin ich allen Mitarbeitern der Abteilung Markscheidewesen und GeoInformation des Instituts für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal für die sehr gute Team-Arbeit und angenehme Arbeitsatmosphäre innerhalb der letzten Jahre, für all die offenen Ohren sowie die stets schnelle und kompetente Hilfe bei Fragen und Problemen. Michael Schäfer und Nan Ge danke ich für die vielen sehr wertvollen fachlichen Diskussionen. Mein allergrößter Dank gebührt jedoch Britta Riechmann für ihre unermüdliche Hilfe und Unterstützung, ihr Durchhaltevermögen, ihre tägliche Motivation, die zahlreichen und sehr hilfreichen Gespräche und Diskussionen, das aufwendige und fleißige Korrekturlesen sowie ihr großes Geschick bei der Layout-Gestaltung. Ich danke ihr außerdem von ganzem Herzen für ihre Freundschaft. Ohne sie wäre die Arbeit sicher nicht in der geplanten Zeit entstanden.

Ich danke all meinen Freunden, insbesondere Katharina und Isa, sowie meinen Geschwistern und Eltern, für ihre Geduld und ihr Verständnis, jede Aufmunterung und Unterstützung sowie ihre vielen Gebete. Ganz besonders möchte ich auch Luisa danken, die mir mit viel Ausdauer, Gelassenheit und Humor ermutigend und stärkend die letzten Monate zur Seite stand. Neben jeglicher Unterstützung danke ich ihr gleichmaßen auch für jede willkommene Ablenkung. Der Jugend der EFG Goslar bin für alle Rücksichtnahme, ebenso für jede abwechslungsreiche gemeinsame Aktion sehr dankbar. David danke ich außerdem für jede Entlastung sowie seine schnelle Hilfe in Laptop-Notfällen.

Dank sei Gott für seine Liebe und Treue sowie die Kraft und Ideen, die er mir geschenkt hat!