Westfälische Wilhelms-Universität

Geologie

Rekonstruktion von Gewässerstrukturen im Oderbruch bei Manschnow durch multifrequente und multipolarimetrische Radarfernerkundungs- und GIS-Analyse

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften im Fachbereich Geowissenschaften
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Westfälischen Wilhelms-Universität

vorgelegt von
Oliver Müllenhoff
aus Lüdinghausen

2004

Dekan: Prof. Dr. H. Kerp

Gutachter: 1. Prof. Dr. L. Bischoff

2. Prof. Dr. H. Kerp

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Juli 2004

Datum der Promotion: 23. Juli 2004

„ A one man´s noise is another man´s signal….”

(R. K. RANEY)

Zusammenfassung

In Gebieten mit starker landwirtschaftlicher Nutzung und einem hohen Grad an Vegetationsbedeckung stoßen passive Fernerkundungssysteme bei der Aufzeichnung von Informationen der oberen Bodenschichten an ihre Grenzen. Zudem sind lediglich im Durchschnitt 10% der über Europa durch passive Systeme aufgezeichneten Daten eines Jahres aufgrund der Wetterbedingungen (Bewölkung) nutzbar. Im Gegensatz zu passiven Fernerkundungsverfahren, die eine Szene durch Aufnahme des reflektierten Sonnenlichts oder der emittierten Wärmestrahlung abbilden, beleuchten Radarsysteme aktiv eine Szene und nehmen die an der Szene gestreute Strahlung auf. Die Mikrowellenfernerkundung ist damit nahezu unabhängig von Tageszeit und Wetterbedingungen. Ein zusätzlicher Informationsgewinn gegenüber den passiven Sensoren ist auf die Eigenschaft der Mikrowellen zurück zuführen, tiefer in die Materie einzudringen als es für elektromagnetische Wellen kleiner 1 cm möglich ist. Das Durchdringungsvermögen hängt neben der Wellenlänge auch von dem Feuchtigkeitsgehalt und der Dichte der Materie ab. Speziell Vegetation kann teilweise oder ganz durchdrungen werden. Dabei können kurze Wellenlängen (z.B. X-Band) Informationen über die oberen Vegetationsschichten liefern, die längeren Wellenlängen (L- und P-Band) über den darunter liegenden Boden. Das Gleiche trifft auch auf die oberen Bodenschichten selber zu. Da die Mikrowellen in der Lage sind, je nach Bodenfeuchtegehalt signifikant in den Boden einzudringen, können sie wichtige Informationen über seine Beschaffenheit widerspiegeln. Diese Vorteile gegenüber den passiven Fernerkundungssystemen legen den komplementären Einsatz der unterschiedlichen Sensoren nahe.

In der vorliegenden Arbeit werden erstmals multifrequente und multipolarimetrische Radar-Daten des E-SAR (Flugzeug getragenes **E**xperimentelles **SAR**-System des DLR) hinsichtlich ihres Potentials zur Rekonstruktion von ehemaligen Gewässerstrukturen in Auenlandschaften am Beispiel des 60 km nordöstlich von Berlin gelegenen Oderbruchs analysiert und bewertet. Ziel der Arbeit ist es, aus den multifrequenten und multipolarimetrischen sowie synthetisch erzeugten Radar-Daten für die Lokalisierung von reliktischen Gewässerstrukturen geeignete Farbkompositen zu generieren. Mithilfe von Fernerkundungsdaten ergänzender passiver Systeme, der Relief-Analyse des Untersuchungsgebietes im Geoinformationssystem (GIS) sowie der Aufbereitung und Integration historischer Informationen konnten die Rückstreueigenschaften verschiedener Oberflächenkategorien mit den E-SAR-Daten korreliert und die Verlagerung von Gewässerstrukturen und ihrer Nebengewässeranbindungen bestimmt werden. Die so gewonnenen Ergebnisse ließen sich anhand von Geländebefunden verifizieren. Zudem erlaubte der multitemporale Charakter der zur Verfügung stehenden E-SAR-Daten einen Abgleich mit den unterschiedlichen Witterungsbedingungen zu den jeweiligen Befliegungskampagnen im Untersuchungsgebiet und ermöglichte somit eine Abschätzung der Beeinflussung der Mikrowellenfernerkundung durch Niederschlagsereignisse. Die Kennwerte aus dieser Analyse verhelfen zu einer effizienteren Planung zukünftiger Radar-Kampagnen.

Das Oderbruch bildet eine deutlich begrenzte morphologische Eintiefung, die sich mit ca. 60 km Länge und maximal 27 km Breite in nordwest – südöstlicher Richtung erstreckt und damit das größte geschlossene Flusspoldergebiet Deutschlands darstellt. Das gesamte Oderbruch bildete

im Holozän eine Flussauenlandschaft, durch welche die Oder mäandrierte. Die periodisch auftretenden Überflutungsphasen führten zu flächenhaften Ablagerungen feinstkörniger Schwebfracht, dem sogenannten Auelehm. Neben dem Auelehm treten zudem entlang von Strömungsrinnen umgelagerte Sande auf, die bisweilen im Gelände kaum wahrnehmbare Erhöhungen bilden, die den Uferverlauf rezenter oder ehemaliger Flussarme nachzeichnen. Mit Beginn der Eindeichung der Oder vor 250 Jahren wurde die Mäanderexpansion und die Laufmigration sowie die periodischen Überflutungen und damit jegliche Sedimentation unterbunden. Das Oderbruch verlor seinen Auencharakter. Im Zuge der Trockenlegung entwickelte sich die Landwirtschaft fortwährend, und es erfolgte eine Verarmung und Vereinheitlichung der ursprünglichen Gewässerstrukturen. Die zur Verfügung stehenden historischen Unterlagen (ab 1743) aus den Archiven dokumentieren zwar eine Vielzahl von Informationen zu den Gewässern im Oderbruch, zeigen jedoch nicht den Zustand vor der ersten systematischen Regulierung der Oder (1717).

Alle zur Verfügung stehenden Daten wurden gemäß ihrer speziellen Charakteristika mittels geeigneter Software und Laboranalytik aufbereitet und innerhalb eines gemeinsamen Raumbezugssystems in einem Geoinformationssystem (GIS) zusammengeführt. Im Rahmen der Bildverarbeitung wurden unter hohem numerischen Rechenaufwand aus den multifrequenten und multipolarimetrischen E-SAR-Daten und aus den synthetisch erzeugten Sekundärdatensätzen verschiedene RGB-Farbkompositen generiert. Die Verwendung von statistisch ausgewerteten Kombinationen aus den ursprünglichen E-SAR Bändern und Polarisationen sowie der Berechnung von Ratios und die Summation der einzelnen Bänder und Polarisationen führte zur Hervorhebung von spektralen Variationen, die im Zusammenhang mit Gewässerstrukturen stehen. Die Verwendung von Hauptkomponenten höherer Ordnung erzeugt zusätzlich einen synthetischen Sekundärdatensatz, der es ermöglicht, übergeordnete Rückstreuvariabilitätsmuster aus verschiedenen Bändern abzuleiten. Die höherwertigen Hauptkomponenten zeigen dabei eine Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses sowie weiterer radiometrischer Effekte (z.B. geringerer Speckle) und eignen sich deshalb besonders für quantitative Auswerteverfahren. Zusätzlich zu den Amplituden enthalten auch die Phasenverhältnisse zwischen den Polarisationen nützliche Information. Aus diesem Grund wurde eine sogenannte PAULI-Dekomposition der Daten vorgenommen. Sie ermöglichen die Zerlegung der Gesamtrückstreuung in mehrere Streuprozesse, wodurch die unterschiedlichen Streumechanismen Einfachreflexion, Doppelreflexion und Volumenstreuung bestimmt werden können. Zur Reduktion des Speckle-Rauschens in den Radardaten kam eine iterative Filterung nach dem Moving-Window-Verfahren mit dem Frost-Filter mit einer Fenstergröße von 7x7 zum Einsatz. Diese Filterung führte zu einer Verminderung der körnigen Bildstruktur bei gleichzeitiger Erhaltung von Kanten und Linearen sowie punktueller Strukturen. Ein Vergleich der Radar-Rückstreuintensitäten für unterschiedliche Oberflächenkategorien weist für die längeren Wellenlängen eine geringere Beeinflussung durch die Vegetationsbedeckung und somit einen höheren Anteil an Informationen des Oberboden in dem rückgestreuten Signal aus. Die lokalisierten Gewässerstrukturen zeichnen sich durch eine starke Dämpfung des Radarsignals aus, die auf die Änderung der Dielektrizitätskonstante bei Änderung des Bodenwassergehaltes zurückzuführen ist. Dabei spielt der große Unterschied der

Dielektrizitätskonstante von Wasser (80) und trockenem Boden (3-8) die entscheidende Rolle und ermöglicht dem Radarsignal, tiefer in die entlang von Strömungsrinnen umgelagerten trockenen Sande einzudringen. Mit zunehmender Eindringtiefe nimmt die Volumenstreuung und damit die Dämpfung des Signals zu.

Als komplementäre Datensätze wurden ASTER- und Laser-Scann-Daten für die Verifikation der E-SAR-Daten verarbeitet. Die Daten des ASTER-Sensors dienten zur Generierung von Falschfarbenkompositen und zur Berechnung des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Da die Vitalität der Vegetation eng an die Feuchtigkeit des Bodens gekoppelt ist, weist die Vegetation auf feuchtem Auelehm einen höheren Index auf als vergleichbare Vegetation auf trockenem fluviatilen Sedimenten. Somit konnten indirekt die in den E-SAR-Daten lokalisierten gewässerähnlichen Strukturen verifiziert werden. Das aus den Laser-Scann-Daten generierte rasterbasierte digitale Geländemodell (DGM) für das Untersuchungsgebiet diente im GIS der Ableitung primärer und sekundärer Reliefparameter, die die Ergebnisse der E-SAR-Daten stützen. Besonders der Topographische Wetness-Index (TWI) erwies sich für die Verifikation der Radardaten als besonders geeignet, da er einen flächenhaften Eindruck der Bodenfeuchteverteilung unter Berücksichtigung der Oberflächenmorphologie wiedergibt.

Die Geländeuntersuchungen während der Befliegungskampagnen, die Ergebnisse aus Bodensondierungen und Bohrungen sowie das historische Kartenmaterial festigen die aus den E-SAR-Daten gewonnen Informationen bezüglich Lage und Ausdehnung einstiger Gewässerstrukturen.

Der Einsatz von multifrequenten und multipolarimetrischen Radardaten sowie die modernen Methoden der digitalen Geodatenverarbeitung bieten für die Rekonstruktion ehemaliger Flussläufe innerhalb großflächiger Auenlandschaften neue Möglichkeiten einer ökonomischen Erfassung und Beurteilung von Veränderungen der Gewässerstruktur. Insbesondere in Regionen mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung und ausgeprägter Vegetationsbedeckung erlauben langwellige Radardaten die Lokalisierung von zyklisch abgelagerten Sedimenten, die in Verbindung mit ehemaligen mäandrierenden Flussläufen stehen. Dem Einsatz von Geoinformationssystemen (GIS) sowie der Parametrisierung des Reliefs aus digitalen Geländemodellen (DGM) fällt eine entscheidende Bedeutung bei der Verifikation der Fernerkundungsdaten zu. So können wichtige Einschätzungen hinsichtlich der Lage und Ausdehnung ehemaliger mäandrierender Flussläufen im Gelände bereits am PC gewonnen werden. Hinsichtlich der hydraulischen Wirksamkeit der alten Flussläufe ist das Wissen um ihre Lage besonders wichtig, da die Fließbewegungen auf den vorgezeichneten Bahnen alter Flussläufe weiter funktioniert. Derartige Betrachtungen sind für die Planung zukünftiger Retentionsflächen, der Baugrundanalysen und für das Precision Farming von Bedeutung. Die Integration von Fernerkundungs- und Geländedaten sowie aktuellen und historischen Kartenmaterials in einem Geoinformationssystem ermöglicht es Untersuchungen mit anderer Zielrichtung erfolgreich auf die bereits aufbereiteten Daten zuzugreifen. Durch die einfache Abfrage von kausalen Zusammenhängen eröffnen sich somit neue Anwendungsmöglichkeiten für die SAR-Systeme. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit lassen sich auf zukünftige satellitengestützten SAR L-Band Systeme, z.B. TerraSAR (Satellitenstart 2005), übertragen.

Summary

In areas of heavy agricultural use and extensive vegetation coverage, passive remote sensing systems are stretched the limit when recording subsurface information. Besides, on average, only 10% of the data collected over Europe by passive remote sensing systems in the course of a year proves to be of any use due to the weather conditions (clouding cover). In contrast to passive remote sensing procedures, which illustrate a scene by recording the reflected sunlight or the emitted radiant heat, radar systems light up a scene actively and measures the signal backscattered by the illuminated area. The microwave remote sensing system has proved to be of great benefit, due to its day and night capabilities, regardless of weather conditions.

The fact that additional information can be obtained using the microwave system is due to its special ability to penetrate more deeply into the material than it is possible with electromagnetic waves smaller 1 cm. Due to their long wavelength, microwaves are capable of penetrating vegetation and even the ground up to a certain depth. The penetration capabilities depend on the wavelength as well as on the complex dielectric constants, conductivities and densities of the observed targets. Shorter wavelengths, like the X-band, show a typical high attenuation and are mostly backscattered on the ground or on the vegetation surface. Consequently, at these wavelengths, it is mainly information about this layer that is collected. Longer wavelengths, like L- and P-band, normally penetrate deep into vegetation and often also into the subsurface. The backscattering then contains contributions from the entire volume. These advantages over the passive remote sensing systems suggest that the employment of both sensor systems would be advisable.

In this PhD thesis long-wave, multi-frequent and multi-polarimetric radar data from the experimental airborne SAR system (E-SAR) of the German Aerospace Center (DLR) were tested regarding their potential use in the reconstruction of former river structures in areas of marsh land. A test area at the German-Polish border in East Germany, situated approximately 60 km northeast of Berlin, was selected for this study. The Oderbruch is composed of mainly agricultural fields and some forest. With the assistance of different colour composites from the multi-frequent, multi-polarimetric and synthetically produced radar data as well as remote sensing data of supplementary passive systems, field work results and available historical information an attempt has been made to locate the shifting of river structures and their tributaries. Besides the multi-temporal character of the available E-SAR data permits an alignment with the different climatic conditions to the respective attachment flying campaigns in the investigation area and thus makes an estimation of the influence of the microwave remote sensing by precipitation events possible.

The Oderbruch forms a clearly limited morphological depression, approx. 60 km in length and 27 km at its widest in a stretching northwest - southeast direction extends and is thus the largest closed river polder area of Germany. The entire Oderbruch formed an area of marsh land in the holocene, through which the Oder maeandered. Periodic flooding led to planar deposits of fine grain floating freight, the so-called marsh land loam. In addition to the marsh land loam relocated sand arises along flow gutters, which forms scarcely perceptible rises, which trace the

course of recent or former river beds. With the beginning of the poldering of the Oder 250 years ago the maeander expansion as well as the periodic flooding, and thus any sedimentation, were prevented. The Oderbruch lost its marsh land character. In the course of the dewatering the agriculture continued to develop and a depletion and standardization of the original waters structures took place. Although the available historical documents (starting from 1743) from archives provide a great deal of information on river courses in the Oderbruch, they do not show, however, the condition before the first systematic adjustment of the Oder (1717).

All the available data were prepared in accordance with their special characteristics by means of suitable software and laboratory analysis and combined within a common geographic reference system in a geo information system (GIS). In the context of the image processing, a time-consuming undertaking, from the multi-frequent and multi-polarimetric E-SAR data and from the synthetically produced secondary data sets different RGB colour composites were generated. The use of statistically evaluated combinations of the original E-SAR volumes and polarizations as well as the computation of ratios and the addition of the individual volumes and polarizations led to the highlighting of spectral variations, in connection with river structures.

Principal component analysis (PCA) of the SAR data produces, additionally, a synthetic secondary data set, which contains the reflection of all channels and makes it possible to derive superordinate backscattering variability samples from different channels. The PCA is a linear combination which rotates the axes of image space along lines of maximum variance. These lines are orthogonal with respect to each other and are called eigenvectors of the covariance matrix generated from the channels. The principal components (PC) with high order show thereby an improvement of the signal-to-noise ratio as well as further radiometric effects (e.g. speckle) and are therefore particularly suitable for quantitative evaluation procedures. In additional to the amplitudes the phase relationships between the polarizations also contain useful information. For this reason a so-called PAULI decomposition of the data was made. They enable the dismantling of the total backscattering into several scattering processes, whereby the different scattering mechanisms odd bounce, even bounce and volume scattering can be determined.

In order to reduce the speckle noise in the radar data an iterative filtering according to the moving window procedure was put into in operation. The Frost filter with a window size of 7x7 was used for the E-SAR data. This filtering led to a reduction of the granular picture structure but at the same time preserving the edges and linear structures as well as punctual structures. A comparison of the radar backscattering intensities for different surface categories shows, for the longer wavelengths, less influence by the vegetation coverage and thus a higher amount of subsurface information in the backscattered signal. The river structures located are characterised by a strong absorption of the radar signal, which is due to the change in the dielectric constant upon any change in the soil moisture content. The great difference in the dielectric constant of water (80) and dry soil (3-8) plays the decisive role and enables the radar signal to penetrate more deeply into the dry sand relocated along flow gutters than into marsh land loam. With increasing penetration depth the volume scattering and thus the absorption of the signal increases.

For the verification of the E-SAR data complementary multi-spectral ASTER and Laser-Scann data were processed. The data of the ASTER sensor served to generate false colour composites and to compute the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Since the vitality of the vegetation is closely connected to the soil moisture, the vegetation points on damp marsh land loam show a higher index than comparable vegetation on dry fluvial sediments. Thus indirectly the water-like structures located in the E-SAR data could be verified. The raster-based digital elevation model (DEM) for the investigation area, generated from the Laser-Scann data, served to derive primary and secondary relief parameters, which supported the results of the E-SAR data in the GIS. The Topographic Wetness Index (TWI), in particular, proved particularly suitable for the verification of the radar data, since it shows a planar impression of the soil moisture distribution taking into consideration of the surface morphology.

The results of the field work during the flying campaigns together with the results from soil soundings and drillings as well as the historical map material consolidate gained from the E-SAR data information concerning the situation and expansion of former river structures. The modern methods of the digital geo data processing provide new possibilities for the economical reconstruction of former river courses within wide marsh land areas and the evaluation of changes of the river structures. In particular in regions of intensive agricultural use and pronounced vegetation coverage multi-frequent and multi-polarimetric radar data enable the localization of cyclically deposited fluvial sediments, which are connected to former maeandering river courses. The comparison of the prepared radar data with data of optical remote sensing systems shows impressively the advantages of a long-wave multi-polarimetric radar system for the identification of substrate changes in the upper subsurface. The radar data also indicates the ranges of soil moisture variations, indicating a substrate change, where optical remote sensing systems can not. The employment of geo information systems (GIS) as well as the deriving of relief parameters from digital elevation models (DEM) for the verification of the remote sensing data is of great significance. So important estimates can already be obtained on the computer regarding the situation and expansion of former maeandering river courses in the test area. Regarding the hydraulic effectiveness of the old river courses the knowledge of their exact locations is particularly important, since the groundwater movements on the marked courses of old river structures continue to function. Such observations can be of importance for the planning of future retention surfaces. The integration of remote sensing and field data as well as current and historical map material in a geo information system makes it possible to access these data successfully for use in other projects. The results presented in this PhD thesis are transferable to future satellite based SAR L- or P-band-systems, e.g. the TerraSAR.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung I
Summary IV
Inhaltsverzeichnis VII
Abkürzungsverzeichnis X
Abbildungsverzeichnis XII
Tabellenverzeichnis XVI
Verzeichnis der Gleichungen XVIII
1 Einleitung 1
2 Das Oderbruch – Einführung in die Entstehungsgeschichte 4
2.1 Geographischer Überblick 4
2.1.1 Naturräumliche Lage 4
2.1.2 Klima und Wasserbilanz 5
2.1.3 Besiedlung und Geschichte des Oderbruchs 6
2.2 Geologischer Überblick 8
2.2.1 Regionale Geologie des Oderbruchs 8
2.2.2 Sedimenttypen 10
2.2.3 Bedeutung der Hochwässer in der holozänen Auenentwicklung 11
2.2.4 Hydraulische Situation 13
3 Fernerkundung 17
3.1 Radarfernerkundung 17
3.1.1 Einführung 17
3.1.2 Grundlagen der Radarfernerkundung 18
3.1.2.1 Interpretation von Radarbildern 18
3.1.2.2 Aufbau eines Seitensichtradars (SLR) 20
3.1.2.3 SAR-Datenerfassung 21
3.1.2.4 Grundprinzip des Radar-Systems mit synthetischer Apertur 22
3.1.2.5 Streuung von Mikrowellen 28
3.1.2.6 Speckle 29
3.1.3 Interaktion von Mikrowellen mit einer Oberfläche 30
3.1.3.1 Systemspezifische Abbildungsparameter 31
3.1.3.1.1 Wellenlänge 31
3.1.3.1.2 Polarisation 32
3.1.3.1.3 Einfallswinkel (Inzidenzwinkel) 34
3.1.3.2 Objektspezifische Abbildungsparameter 34
3.1.3.2.1 Dielektrizitätskonstante 34
3.1.3.2.2 Oberflächenrauigkeit, Bodenfeuchte und Bodentextur 36
3.1.3.2.3 Geometrische Effekte 39
3.1.4 Speckle-Reduktion 41
3.1.4.1 Multilook-Verarbeitung 42
3.1.4.2 Speckle-Filterung 43
4 Aufnahmesysteme und Datengrundlage 44
4.1 E-SAR 44
4.1.1 Charakteristika der E-SAR-Daten 45
4.2 Laser-Scann 47
4.2.1 Digitales Geländemodell (DGM) 49
4.3 Photographische Aufnahme-Systeme 49
4.3.1 Charakteristika der analogen CIR-Luftbilder 49

4.3.2 Charakteristika der panchromatischen Luftbilder ... 49
4.4 Der ASTER-Sensor ... 50
4.4.1 Charakteristika der ASTER-Daten ... 52
4.5 Landsat-5-TM (Thematic Mapper) ... 52
4.5.1 Charakteristika der Landsat-5-TM-Daten ... 53
4.6 Gravimetrische Bestimmung des Bodenwassergehaltes ... 54
4.7 Klimadaten ... 55
4.8 Grundwasserstände ... 56
4.9 Pegelstände der Oder ... 56
4.10 Reichsbodenschätzung ... 56
4.11 Historisches Kartenmaterial ... 56

5 Fernerkundungs- und GIS-Analyse ... 58
5.1 Lage der bearbeiteten Fernerkundungsdaten ... 60
5.2 Grundlagen und Methoden der Datenaufbereitung ... 62
5.2.1 Digitale Aufbereitung des geologischen und historischen Kartenmaterials ... 62
5.2.2 Digitale Aufbereitung der CIR-Luftbilder ... 63
5.2.3 E-SAR ... 64
5.2.3.1 Preprocessing ... 65
5.2.3.2 Radiometrische Korrektur ... 66
5.2.3.3 Statistische Analyse ... 67
5.2.3.4 Ratiobildungen ... 76
5.2.3.5 Kontrastverbesserung ... 81
5.2.3.6 Hauptkomponentenanalyse ... 82
5.2.3.7 Addition ... 86
5.2.3.8 Speckle Reduktion ... 89
5.2.3.9 PAULI-Dekomposition ... 92
5.2.3.10 Radarrückstreukoeffizient (σ^0) ... 95
5.2.4 ASTER ... 97
5.2.4.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ... 97
5.2.5 Landsat-5-TM ... 98
5.2.6 Laser-Scann ... 98
5.2.6.1 Digitales Geländemodell (DGM) ... 99
5.2.6.2 Datenstruktur ... 99
5.2.6.3 Die Parametrisierung des Reliefs ... 101
5.2.6.3.1 Topographic Wetness Index (TWI) ... 104
5.3 Integration der Geodaten in ein Geoinformationssystem (GIS) ... 106
5.4 2,5-D-Visualisierung ... 108

6 Ergebnisse ... 112
6.1 Rückstreueigenschaften verschiedener Oberflächenkategorien ... 112
6.2 Multitemporale Analyse ... 118
6.2.1 Niederschlagswerte für das Untersuchungsgebiet ... 118
6.2.2 Grundwasserstände ... 121
6.2.3 Pegelstände der Oder ... 123
6.2.4 Gravimetrische Bodenfeuchtemessungen ... 125
6.2.5 Auswirkung von Niederschlagsereignissen auf die multifrequenten und multipolarimetrischen Rückstreueigenschaften ... 126
6.3 Visuelle Interpretation ... 130
6.3.1 Auswertung der Luftbilder ... 130
6.3.2 Auswertung der multispektralen ASTER-Daten ... 134
6.3.3 Historisches Kartenmaterial ... 140
6.3.4 Reliefparameter ... 148

6.4 E-SAR Farbkompositen 155
7 Schlussfolgerungen und Ausblick.....169
Literaturverzeichnis 172
Anhang 181

Abkürzungsverzeichnis

0401	Befliegungskampagne April 2001
0801	Befliegungskampagne August 2001
0402	Befliegungskampagne April 2002
0802	Befliegungskampagne August 2002
AOI	**A**rea **o**f **I**nterest
ASTER	**A**dvanced **S**paceborne **T**hermal **E**mission and **R**eflection Radiometer
CD-Rom	**C**ompact **D**isc
CIR	**c**lose **i**nfra**r**ed
dB	**D**ezi**b**el
DBMS	**D**aten**b**ank**m**anagement**s**ysteme
DGM	**D**igitales **G**eländ**em**odell
DGPS	**D**ifferenzielles **G**lobales **P**ositions **S**ystem
DHHN92	**D**eutsche **H**aupt**h**öhen**n**etz 19**92**
DLR	**D**eutschen Zentrum für **L**uft und **R**aumfahrt e.V.
DN	**D**igital **N**umber
DOP10	**D**igitales **O**rtho**p**hoto 1:10 000
DVD	**D**igital **V**ersitale **D**isc
DWD	**D**eutscher **W**etter **D**ienst
EMS	**e**lektro**m**agnetische **S**trahlung
EOS	**E**arth **O**bserving **S**ystem
E-SAR	**E**xperimentelle **SAR-System**
ESDI	**E**arth **S**cience **D**ata **I**nterface
ETRS89	**E**uropean **T**errestrial **R**eference-**S**ystem - Epoche 19**89**.0
EV	**E**igen**v**ektoren
EXAByte	Magnetband der Firma EXAByte
GIS	**G**eographisches **I**nformations**s**ystem
GPS	**G**lobal **P**ositioning **S**ystem
GW	**G**rund**w**asser
GRID	Rasterstruktur
GTOPO30	**G**lobal **Topo**graphic Data des USGS
HDDT	**h**igh **d**ensity **d**igital **t**ape
HDF	**H**ierarchical **D**ata **F**ormat
HK	**H**aupt**k**omponenten
HKA	**H**aupt**k**omponenten**a**nalyse
INS	**I**nertial **N**avigation **S**ystem
LGRB	**L**andesamt für **G**eowissenschaften und **R**ohstoffe **B**randenburg
LOD	**L**evel **o**f **D**etail
LUA	**L**andes**u**mwelt**a**mt
NDVI	**N**ormalized **D**ifference **V**egetation **I**ndex
NHN	**N**ormal**h**öhen**n**ull nach DHHN92
OIF	**O**ptimum **I**ndex **F**aktor
PC	**P**ersonal **C**omputer
PRF	**p**ulse **r**epetion **f**requency
PWC	Pflanzenwassergehalten
RAR	**R**eal **A**perture **R**adar
RMS	**R**oot **M**ean **S**quare
SAR	**S**ynthetic **A**perture **R**adar
SLAR	**S**ide **L**ooking **A**irborne **R**adar
SLR	**S**ide **L**ooking **R**adar
SML	**S**patial **M**odeler **L**anguage
SQL	**S**tructured **Q**uery **L**anguage
SWIR	**s**hort-**w**avelength **i**nfra**r**ed

TIN	**T**riangulierte **I**rreguläre **N**etzwerke
TIR	**t**hermal **i**nfra**r**ed
TM	**T**hematic **M**apper
TWI	**T**opographic **W**etness **I**ndex
URMTB	**U**r**m**ess**t**isch**b**latt
USGS	**U**nited **S**tates **G**eological **S**urveys
UTM	**U**niversale **T**ransversale **Mercator**-Projektion
VNIR	**v**isual-**n**ear **i**nfra**r**ed
WRS	**W**orldwide **R**eference **S**ystem
WSA	**W**asser- und **S**chifffahrts**a**mt

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Während des Jahrhunderthochwassers in 2002 an der Havel aufgenommenes Schrägluftbild. ... 2
Abb. 2.1: Heutiger Oderverlauf im Oderbruch und seiner weiteren Umgebung mit Darstellung wichtiger Endmoränenstaffeln und Urstromtalabschnitte. ... 5
Abb. 2.2: Verlegung des Oderlaufs. ... 7
Abb. 2.3: Geomorphologische Gliederung Brandenburgs. ... 9
Abb. 2.4: Kurve der Spiegelschwankungen im unteren Oderlauf. ... 12
Abb. 2.5: Deichvorland während der Hochwasserperiode. ... 13
Abb. 2.6: Typische Wasserstandsmarken im Deichvorland der Oder. ... 14
Abb. 2.7: Grundwassergleichenplan des Oberen Hauptgrundwasserleiters des Oderbruchs. 15
Abb. 3.1: Elektromagnetisches Spektrum und Transmissionsspektrum der Atmosphäre. ... 19
Abb. 3.2: Erscheinungsbild der Erdoberfläche und der auf ihr befindlichen Oberflächenobjekte für unterschiedliche Fernerkundungssysteme. ... 20
Abb. 3.3: Geometrie eines Seitensichtradars im Streifenmodus. ... 21
Abb. 3.4: Bestimmung der SAR-Azimutauflösung im Streifenmodus. ... 24
Abb. 3.5: Schematische Darstellung der SAR-Abbildung und Verarbeitung eines Punktziels. ... 26
Abb. 3.6: Bildung einer synthetischen Apertur und Dopplereffekt bei SAR-Systemen. ... 27
Abb. 3.7: Vereinfachte Darstellung des Signalablaufs zur Generierung eines SAR-Bildes... 27
Abb. 3.8: Streuverhalten von Radarstrahlen an verschiedenen Oberflächen. ... 29
Abb. 3.9: Entstehung des Radarsignals für ein Flächenziel. ... 29
Abb. 3.10: Der Rückstreukoeffizient σ ist abhängig von Objekt- und Systemparametern. ... 30
Abb. 3.11: Abhängigkeit des Eindringvermögens sowie des Verhältnisses der Oberflächen- zur Volumenstreuung von Wellenlänge (L-, C- und X-Band), Oberflächengestalt und Materialeigenschaften. ... 32
Abb. 3.12: Horizontale (H) und vertikale (V) Polarisation von Wellen. ... 33
Abb. 3.13: Eindringtiefe von Mikrowellen als Funktion des Feuchtegehalts am Beispiel lehmiger Böden. ... 36
Abb. 3.14: Anteile kohärenter und diffuser Streuung für verschiedene Oberflächenrauigkeiten 37
Abb. 3.15: Auswirkung des Bodenwassergehalts und Dielektrizitätskonstante auf das Radarsignal. ... 39
Abb. 3.16: Foreshortening ... 40
Abb. 3.17: Layover ... 40
Abb. 3.18: Radarschatten ... 41
Abb. 3.19: X-Band E-SAR-Daten der Befliegungskampagne April 2002 für ein Testgebiet westlich des Fort Gorgast. ... 43
Abb. 4.1: E-SAR Trägerplattform DO 228 des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. ... 44
Abb. 4.2: Positionierung eines Corner-Reflektors nordöstlich von Golzow. ... 47
Abb. 4.3: Abtastender Laser im Flugzeug. ... 48
Abb. 4.4: Beprobung der Testflächen nordwestlich von Rathstock mit Stechzylindern während der Befliegungskampagnen. ... 55
Abb. 5.1: Arbeitsschema zum Aufbau des Geoinformationssystems Oderbruch. ... 59
Abb. 5.2: Lage des Untersuchungsgebietes und Abdeckung durch die verwendeten Fernerkundungssysteme. ... 61
Abb. 5.3: Funktionsweise der Generierung eines Mehrkanalbildes für das RGB-Farbsystem. ... 65
Abb. 5.4: Bildqualität der einzelnen P-Band Polarisationen an einem Beispiel südlich von Golzow. ... 66
Abb. 5.5: E-SAR L_{VH} (August 2001) vor (A) und nach der radiometrischen Korrektur (B) unter Berücksichtigung der fehlerhaften Pixel. ... 67

Abb. 5.6: Basis für die folgenden Farbkompositen sind E-SAR-Daten der August 2002 Befliegungskampagne für ein Testgebiet bei Manschnow. 75
Abb. 5.7: Farbkompositen aus der Ratiokombination [L_{HH}/L_{HV}, L_{HH}/L_{VV}, L_{VV}/P_{HH}] südwestlich von Manschnow. 81
Abb. 5.8: Prinzip der Hauptkomponententransformation. 83
Abb. 5.9: Hauptkomponenten 1 (A) bis 4 (D) aus den multipolarisierten L-Band-Daten (August 2001) bei Manschnow. Die blauen Pfeile weisen auf vermutete Altarmstrukturen hin. 84
Abb. 5.10: Sukzessive Addition der E-SAR-Daten aus August 2001 südwestlich von Manschnow. 88
Abb. 5.11: Prinzip des Moving-Window-Verfahren für Rasterdaten. 89
Abb. 5.12: E-SAR Farbkomposite westlich von Gorgast (L_{VV}, L_{HH}, L_{HV}) aus April 2002. 91
Abb. 5.13: PAULI-Komponenten der multipolarimetrischen L-Band-Daten südlich des Golzower Strom (August 2002). 94
Abb. 5.14: Modell zur Berechnung des Rückstreukoeffizienten (σ^0) in Dezibel aus E-SAR-Ground-Range-Daten. 96
Abb. 5.15: Die drei Methoden der Datenstrukturierung für ein DGM. 100
Abb. 5.16: Anordnung der verschiedenen Geodaten nach dem *Layer*-Prinzip im Geoinformationssystem am Beispiel des Oderbruch bei Golzow. 107
Abb. 5.17: Verknüpfung von Reichsbodenschätzung, Fernerkundungsdaten, Geländebefunden und Labormessungen in ArcView für das Untersuchungsgebiet südwestlich von Manschnow. 108
Abb. 5.18: Virtuelle Flugsequenz über das Oderbruch mit überlagerter Landsat-5-TM Echtfarbenkomposite (Blick aus südöstlicher Richtung). 110
Abb. 5.19: Perspektivische Ansicht des zentralen Untersuchungsgebiets. 111
Abb. 6.1: Verteilung der Referenzflächen für die verschiedenen Oberflächenkategorien nordwestlich des Fort Gorgast für die Befliegungskampagne August 2001 mit unterlagertem panchromatischen Luftbild (2001). 113
Abb. 6.2: Rückstreueigenschaften für das Untersuchungsgebiet (Mittelwert und Standardabweichung) für April 2001 in unterschiedlichen Frequenzen und Polarisationen für verschiedene Oberflächenkategorien. 114
Abb. 6.3: Rückstreueigenschaften für das Untersuchungsgebiet (Mittelwert und Standardabweichung) für August 2001 in unterschiedlichen Frequenzen und Polarisationen für verschiedene Oberflächenkategorien. 115
Abb. 6.4: Auswirkung der räumlichen Ausrichtung von Oberflächenobjekten in Relation zur Flugbahn (roter Pfeil) und Blickrichtung (gelber Pfeil) des SAR am Beispiel eines landwirtschaftlichen Betriebes bei Golzow. 116
Abb. 6.5: Rückstreueigenschaften für das Untersuchungsgebiet (Mittelwert und Standardabweichung) für April 2002 in unterschiedlichen Frequenzen und Polarisationen für verschiedene Oberflächenkategorien. 116
Abb. 6.6: Rückstreueigenschaften für das Untersuchungsgebiet (Mittelwert und Standardabweichung) für August 2002 in unterschiedlichen Frequenzen und Polarisationen für verschiedene Oberflächenkategorien. 117
Abb. 6.7: Gesamtniederschlag, bezogen auf das Abflussjahr (November – Oktober) 2000/2001 und 2001/2002. 119
Abb. 6.8: Vergleich der Niederschlagsmengen für das Winter- und Sommerhalbjahr, bezogen auf das Abflussjahr. 119
Abb. 6.9: Vergleich der Niederschlagsmengen für die 100 Tage vor der jeweiligen Befliegungskampagne. 120
Abb. 6.10: Vergleich der Niederschlagsmengen für die Woche vor der jeweiligen Befliegungskampagne. 120
Abb. 6.11: Vergleich der Grundwasserstände (LUA, Landesumweltamt Brandenburg) im Untersuchungsgebiet während der vier Befliegungskampagnen in Relation zur Geländeoberkante (GOK). 121

Abb. 6.12: TK10 mit eingetragenen Gewässerlinien und Gewässerflächen, überlagert von aus der GW-Datenbank im GIS generierten GW-Gleichen für das Untersuchungsgebiet südlich des Golzower Stroms. ... 123
Abb. 6.13: Pegelstände der Oder an den Messstellen Frankfurt, Kietz und Kienitz für das Abflussjahr 2001 und 2002. ... 124
Abb. 6.14: Typische Bildmerkmale in panchromatischen Luftbildern. ... 131
Abb. 6.15: Erscheinungsbild von Substratvariationen in Luftbildern nordwestlich des Fort Gorgast zu unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten. ... 133
Abb. 6.16: Panchromatisches Luftbild aus dem Jahre 1997. ... 134
Abb. 6.17: Typische Bildmerkmale in einer ASTER Echtfarbkomposite südlich des Golzower Stroms, die die wechselnde Ablagerung von Mudden/Torfen und sandigen Böden anzeigen, die in Verbindung mit ehemaligen mäandrierenden Flussläufen stehen. ... 135
Abb. 6.18: Typische Bildmerkmale in einer ASTER Falschfarbenkomposite (321) südlich des Golzower Stroms, die die wechselnde Ablagerung von Mudden/Torfen und sandigen Böden anzeigen, die in Verbindung mit ehemaligen mäandrierenden Flussläufen stehen. ... 136
Abb. 6.19: Typische Bildmerkmale in einem Sekundärdatensatz aus den ersten drei Hauptkomponenten der ASTER-VNIR-Daten südlich des Golzower Stroms, die die wechselnde Ablagerung von Mudden/Torfen und sandigen Böden anzeigen, die in Verbindung mit ehemaligen mäandrierenden Flussläufen stehen. ... 137
Abb. 6.20: Farbkodierter Sekundärdatensatz NDVI für den Untersuchungsraum bei Golzow sowie Vitalitätsunterschiede innerhalb von Getreideflächen im Untersuchungsgebiet (Mai 2001). ... 139
Abb. 6.21: Ausschnitt der „Situationskarte der Oder“ von 1745 für das Untersuchungsgebiet. ... 141
Abb. 6.22: Ausschnitt der „Karte des Oderstroms“ von 1747 für das Untersuchungsgebiet. 142
Abb. 6.23: Ausschnitt der „Karte von dem Thale der Oder“ aus den Jahren 1828 und 1829 für das Untersuchungsgebiet. ... 143
Abb. 6.24: Ausschnitt des Urmesstischblatts (URMTB) aus dem Jahre 1844 für das Untersuchungsgebiet. ... 144
Abb. 6.25: Ausschnitt der Reichbodenschätzung für den zentralen Untersuchungsraum westlich des Fort Gorgast, überlagert von der TK10 und den Gewässerstrukturen der historischen Karten. ... 147
Abb. 6.26: Farbkodiertes DGM aus den Laser-Scann-Daten für das Untersuchungsgebiet... 148
Abb. 6.27: Schummerungskarte aus den Laser-Scann-Daten für das Untersuchungsgebiet. . 149
Abb. 6.28: Abgeleitete Geländeneigung aus dem Laser-Scann DGM für das zentrale Untersuchungsgebiet. ... 151
Abb. 6.29: A) Abgeleitete Horizontalwölbung. B) Abgeleitete Vertikalwölbung. ... 152
Abb. 6.30: Expositionsverhältnisse, abgeleitet aus dem Laser-Scann DGM für das Untersuchungsgebiet. Ein AOI westlich des Fort Gorgast (schwarz umrahmt) ist vergrößert dargestellt. ... 153
Abb. 6.31: Farbkodierter Topographic Wetness Index (TWI) abgeleitet aus dem Laser-Scann DGM für das Untersuchungsgebiet mit überlagerter TK10. ... 155
Abb. 6.32: Gegenüberstellung der in den E-SAR-Daten identifizierten mäander- bzw. gewässerähnlichen Strukturen mit den für die Verifikation herangezogenen Daten für ein Area of Interest (AOI) südlich des Golzower Strom. ... 159
Abb. 6.33: Vergleich der in den E-SAR-Daten lokalisierten mäander- bzw. gewässerähnlichen Strukturen mit den für die Verifikation herangezogenen Daten für ein AOI westlich von Manschnow. ... 160
Abb. 6.34: Korrelation der E-SAR Rückstreuintensitäten mit Bohrprofilen und DGM. ... 163
Abb. 6.35: Multitemporale Korrelation der Rückstreuintensitäten. ... 164

Abb. 6.36: Panchromatisches Luftbildmosaik (von 1997) überlagert mit den in den E-SAR-Daten lokalisierten Gewässerstrukturen sowie den aus den historischen Kartenwerken entnommenen alten Flussläufen. 167
Abb. 6.37: Panchromatisches Luftbildmosaik (von 1997) und Reichsbodenschätzung (von 1900) überlagert mit den in den E-SAR-Daten lokalisierten Gewässerstrukturen sowie den aus den historischen Kartenwerken entnommenen alten Flussläufen. 168

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Bandbreite der Mikrowellen 31
Tab. 4.1: Systemparameter des E-SAR ... 45
Tab. 4.2: Erhobene E-SAR-Datensätze während der Befliegungskampagnen in 2001 und 2002. ... 46
Tab. 4.3: Darstellung der spektralen Bänder sowie weitere technische Details zum ASTER-Sensor 51
Tab. 4.4: Datencharakteristika der ASTER-Subszenen AST-OS (ASTER Oderbruch Süd) bzw. AST-ON (ASTER Oderbruch Nord). ... 52
Tab. 4.5: Spektrale, geometrische und radiometrische Auflösung der Einzelkanäle des Landsat-5-TM (nach KAPPAS 1994). ... 53
Tab. 4.6: Datencharakteristika der Landsat-5-TM-Subszenen TM-O (Landsat-5-TM Oderbruch). ... 54
Tab. 5.1: Statistische Parameter der Befliegungskampagne April 2001. ... 69
Tab. 5.2: Statistische Parameter der Befliegungskampagne August 2001. ... 69
Tab. 5.3: Statistische Parameter der Befliegungskampagne April 2002. ... 69
Tab. 5.4: Statistische Parameter der Befliegungskampagne August 2002. ... 70
Tab. 5.5: Korrelationsmatrix der E-SAR-Bänder und Polarisationen der Befliegungskampagne April 2001. ... 71
Tab. 5.6: Korrelationsmatrix der E-SAR-Bänder und Polarisationen der Befliegungskampagne August 2001. ... 71
Tab. 5.7: Korrelationsmatrix der E-SAR-Bänder und Polarisationen der Befliegungskampagne April 2002. ... 72
Tab. 5.8: Korrelationsmatrix der E-SAR-Bänder und Polarisationen der Befliegungskampagne August 2002. ... 72
Tab. 5.9: OIF-Verteilung für Drei-Kanal-Kombinationen der E-SAR-Daten aus April und August 2001. ... 73
Tab. 5.10: OIF-Verteilung für Drei-Kanal-Kombinationen der E-SAR-Daten aus April und August 2002. ... 74
Tab. 5.11: Statistische Parameter der Ratiobildungen (April 2001). ... 76
Tab. 5.12: Statistische Parameter der Ratiobildungen (August 2001). ... 77
Tab. 5.13: Statistische Parameter der Ratiobildungen (April 2002). ... 77
Tab. 5.14: Statistische Parameter der Ratiobildungen (August 2002). ... 77
Tab. 5.15: Korrelationskoeffizient der Ratiobildungen (April 2001). ... 78
Tab. 5.16: Korrelationskoeffizient der Ratiobildungen (August 2001). ... 79
Tab. 5.17: Korrelationskoeffizient der Ratiobildungen (April 2002). ... 79
Tab. 5.18: Korrelationskoeffizient der Ratiobildungen (August 2002). ... 79
Tab. 5.19: Die ersten vier OIF-Ränge der Ratiobildungen für 2001 ... 80
Tab. 5.20: Die ersten vier OIF-Ränge der Ratiobildungen für 2002 ... 80
Tab. 5.21: Korrelationskoeffizienten der vier Hauptkomponenten und der L-Band Polarisationen. ... 85
Tab. 5.22: Eigenvektoren (EV) und Eigenwerte der Hauptkomponenten (HK) aus den E-SAR-Daten 2001 und 2002. ... 86
Tab. 5.23: Reliefparameter ... 103
Tab. 6.1: Anzahl der ausgewerteten Pixel je Oberflächenkategorie für 2001 und 2002. ... 114
Tab. 6.2: Grundwasserabstand in Meter von der Geländeoberfläche während der SAR Befliegungskampagnen in 2001 und 2002. ... 122
Tab. 6.3: Jahresmittelwerte der Pegelstände der Oder für die Abflussjahre 2001 und 2002. ... 124
Tab. 6.4: Auswertung der gravimetrischen Bodenfeuchtebestimmung unter Berücksichtigung der Untergrundbeschaffenheit für eine Testfläche östlich von Rathstock. ... 125

Tab. 6.5: Statistische Parameter der E-SAR-Daten für die Befliegungskampagne April 2001 127
Tab. 6.6: Statistische Parameter der E-SAR-Daten für die Befliegungskampagne August 2001 127
Tab. 6.7: Statistische Parameter der E-SAR-Daten für die Befliegungskampagne April 2002 128
Tab. 6.8: Statistische Parameter der E-SAR-Daten für die Befliegungskampagne August 2002 128
Tab. 6.9: Radarrückstreuung für verschiedene Oberflächenkategorien in (*dB*) der Befliegungskampagne April 2001. 129
Tab. 6.10: Radarrückstreuung für verschiedene Oberflächenkategorien in (*dB*) der Befliegungskampagne August 2001. 129
Tab. 6.11: Radarrückstreuung für verschiedene Oberflächenkategorien in (*dB*) der Befliegungskampagne April 2002. 129
Tab. 6.12: Radarrückstreuung für verschiedene Oberflächenkategorien in (*dB*) der Befliegungskampagne August 2002. 129
Tab. 6.13: Prozentualer Anteil und abgedeckte Fläche der einzelnen Expositionsverhältnisse für das Untersuchungsgebiet 154

Verzeichnis der Gleichungen

Gl. 3.1 Auflösungsvermögen in Entfernungsrichtung ... 23
Gl. 3.2 Winkelauflösung der Antenne ... 23
Gl. 3.3 Winkelauflösung der synthetischen Apertur ... 23
Gl. 3.4 Maximale Länge der synthetischen Apertur ... 24
Gl. 3.5 Maximale Winkelauflösung der synthetischen Apertur ... 24
Gl. 3.6 Maximale räumliche Auflösung der synthetischen Apertur ... 25
Gl. 3.7 Azimutauflösung ... 25
Gl. 3.8 Entfernungsauflösung ... 25
Gl. 3.9 Entfernungsauflösung am Boden ... 25
Gl. 3.10 Radargleichung ... 30
Gl. 3.11 Normalisierter Radar-Rückstreuquerschnitt ... 31
Gl. 3.12 Eindringtiefe der elektromagnetischen Welle (*skin depth*) ... 32
Gl. 3.13 Eindringtiefe des Radarsignals ... 35
Gl. 3.14 Rayleight-Kriterium ... 37
Gl. 3.15 Frauenhofer-Kriterium ... 37
Gl. 3.16 RMS-Höhe ... 38
Gl. 3.17 Autokorrelationslänge ... 38
Gl. 3.18 Gauß´sche Funktion ... 38
Gl. 3.19 Exponentielle Funktion ... 38
Gl. 3.20 Mittelung von Pixelwerten ... 42
Gl. 3.21 Azimutauflösung ... 42
Gl. 3.22 Radiometrische Auflösung ... 42
Gl. 4.1 Volumetrische Bodenfeuchte ... 55
Gl. 5.1 Grundlage der Affintransformation ... 67
Gl. 5.2 Grundlage der Affintransformation ... 67
Gl. 5.3 Kalibrierfunktion (Polynom 3. Grades) ... 67
Gl. 5.4 Berechnung des Mittelwertes ... 68
Gl. 5.5 Berechnung der Standardabweichung ... 68
Gl. 5.6 Berechnung der Kovarianz ... 71
Gl. 5.7 Berechnung des Korrelationskoeffizienten ... 71
Gl. 5.8 Optimum-Index-Faktor (OIF) ... 73
Gl. 5.9 Ratiobildung ... 76
Gl. 5.10 Addition von Grauwerten ... 87
Gl. 5.11 Variationskoeffizient ... 90
Gl. 5.12 Berechnung neuer Pixelwerte bei der Lee-Filterung ... 90
Gl. 5.13 Berechnung des K-Faktors (Lee-Filterung) ... 90
Gl. 5.14 Berechnung der Varianz im Filterfenster (Lee-Filterung) ... 90
Gl. 5.15 Jones Vektor (gesendetes Signal) ... 92
Gl. 5.16 Jones Vektor (empfangenes Signal) ... 92
Gl. 5.17 Jones- bzw. Sinclair- oder [S]-Matrix ... 92
Gl. 5.18 Berechnung der komplexen Rückstreuung ... 92
Gl. 5.19 Darstellung der [S]-Matrix ... 93
Gl. 5.20 Berechnung des Rückstreukoeffizienten ... 95
Gl. 5.21 Berechnung der *radar brightness* ... 95
Gl. 5.22 Berechnung des lokalen Einfallswinkel ... 96
Gl. 5.23 Berechnung einer Echtfarbkomposite aus ASTER-Daten ... 97
Gl. 5.24 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ... 98
Gl. 5.25 Berechnung der Hangneigung ... 101
Gl. 5.26 Hangneigung der zentralen Rasterzelle ... 102
Gl. 5.27 Oberflächenwölbung ... 102
Gl. 5.28 Vertikalwölbung ... 102
Gl. 5.29 Topographic Wetness Index (TWI) ... 104

Gl. 5.30 Bodendurchlässigkeit (TWI) 105
Gl. 5.31 Tiefe des Stauwasserspiegels (TWI) 105