5 Fernerkundungs- und GIS-Analyse

Geoinformationssysteme (GIS) werden in zunehmendem Maße in allen Bereichen eingesetzt, in denen raumbezogene Daten erfasst und verarbeitet werden. Das Spektrum der Aufgaben, die ein GIS übernimmt, reicht dabei von der Datenerfassung über das Darstellen der digitalen Rauminformationen bis hin zur flexiblen, problemspezifischen Analyse der vorliegenden Daten. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, Szenarien aus den Rauminformationen zu entwickeln und Zustände zu prognostizieren. Die Möglichkeit der Einbindung von Fernerkundungsdaten in ein GIS stellt die Verschmelzung zweier leistungsstarker Analysewerkzeuge dar. Es bedarf jedoch einer möglichst weit reichenden Ausnutzung der gebotenen Funktionalitäten, um komplexere Fragestellungen bearbeiten zu können (MÜLLENHOFF 2000).

In diesem Kapitel sollen die im Rahmen der vorliegenden Arbeit zugrunde liegenden Daten sowie ihre digitale Aufbereitung und ihre Integration in ein Geoinformationssystem vorgestellt werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Beschreibung und Vorverarbeitung der E-SAR-Flugzeugdaten, der Aufnahme und digitalen Aufarbeitung der Geländemessungen sowie der Extraktion zusätzlicher Informationen aus bestehenden digitalen und analogen Datensätzen.

Ziel dieser Aufbereitungen ist es, die Ablagerungen und den Verlauf ehemaliger Flussläufe im Untersuchungsgebiet zu lokalisieren. Zudem werden die Rückstreuintensitäten des E-SAR für die gegebene Fragestellung verifiziert, da es bisher noch keine Erfahrungen mit SAR-Systemen auf diesem Gebiet gibt. Erst durch die Kombination der einzelnen Datensätze sowie durch ihre z.T. gemeinsame Visualisierung werden die Relikte ehemaliger Flussläufe deutlich. Durch das Zusammenführen der altarmtypischen Merkmale aus jedem einzelnen Datensatz in einem GIS wird es möglich, Aussagen über deren Verlauf zu treffen.

Das methodische Vorgehen beim Aufbau des Geoinformationssystems für das Untersuchungsgebiet erfolgte auf der Basis von vier Datenquellen.

- In einem ersten Arbeitsschritt wurde das vorhandene geologische und historische Kartenmaterial digital aufbereitet und auf diese Weise ein direkter Vergleich mit den digitalen Fernerkundungsdaten in einem einheitlichen räumlichen Bezugssystem (Koordinatensystem) ermöglicht.
- Der Schwerpunkt der Analyse lag in der Auswertung der multifrequenten und multipolarimetrischen E-SAR-Flugzeugdaten (Kap. 3 u. 6.4) hinsichtlich ihrer spektralen Informationen und der Auswahl geeigneter Farbkompositen zur Lokalisierung von Gewässerstrukturen. Des Weiteren wurden Daten unterschiedlicher optischer Fernerkundungssysteme für die Verifikation der SAR-Daten aufbereitet.
- Die dritte Datenquelle stellen die vor Ort während der Befliegungskampagnen mit GPS-Bestimmung erhobenen Bodenproben sowie die im Labor an ihnen durchgeführten gravimetrischen Feuchtebestimmungen dar. Sie dienen ebenso zur Verifizierung der Fernerkundungsergebnisse wie die Bohrprofile des Landesamts für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (LGRB). Beide Datenquellen wurden in die aufgebaute Geo-Datenbank integriert. Ferner konnten ebenfalls Geländebeobachtungen mit GPS-

Bestimmung nachfolgend in die Geo-Datenbank eingebunden werden.

- Die vorhandenen digitalen Datensätze wurden in die Geo-Datenbank integriert und ermöglichten die Bestimmung der Rahmenparameter während der Befliegungskampagnen mit dem E-SAR-Sensor.

Der Arbeitablauf ist schematisch in Abb. 5.1 zusammengefasst.

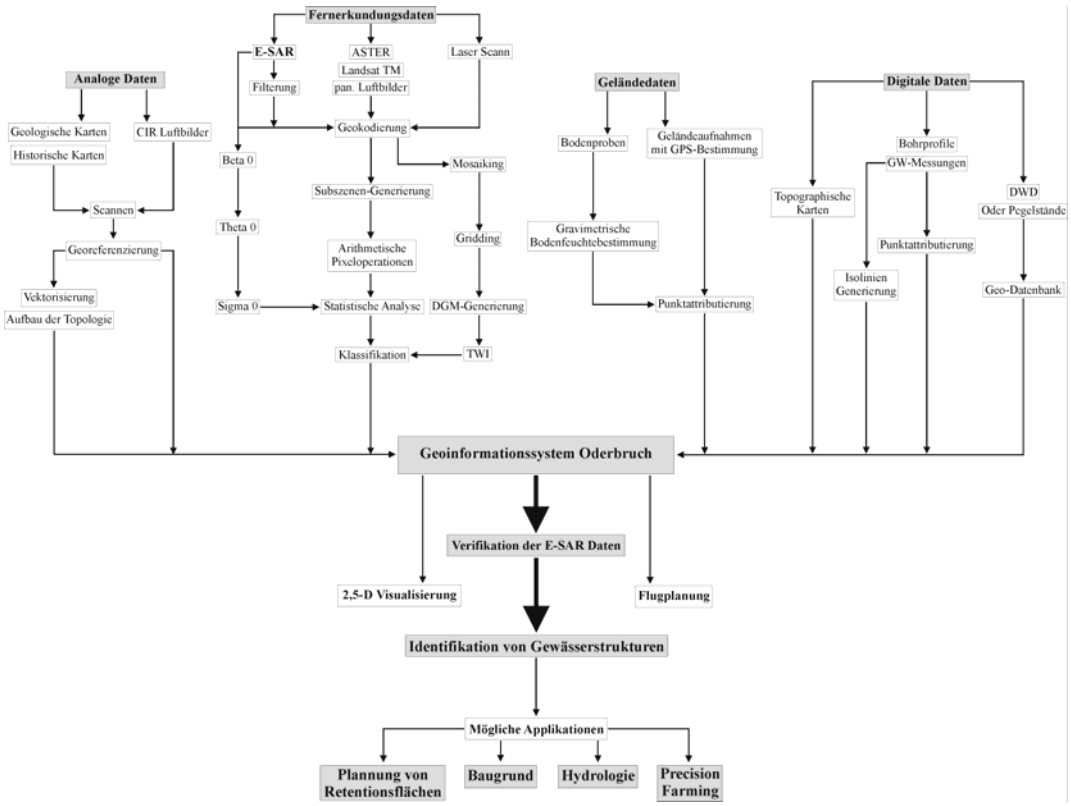


Abb. 5.1: Arbeitsschema zum Aufbau des Geoinformationssystems Oderbruch.

Für die Bearbeitung und Aufbereitung der Radar- sowie der weiteren Fernerkundungsdaten wurde das graphisch-interaktive Bildverarbeitungssystem ERDAS Imagine (**E**arth **R**esource **D**ata **A**nalysis **S**ystem) in der Version 8.5 eingesetzt. ERDAS Imagine bietet eine umfangreiche Funktionspalette zur Bearbeitung und Analyse von digitalen Rasterbilddaten und berücksichtigt dabei auch Vektordaten. ERDAS Imagine ermöglicht so, aus den digitalen Fernerkundungsdaten ein Höchstmaß an Informationen für gegebene Fragestellungen zu gewinnen.

Die Georeferenzierung des geologischen und historischen Kartenmaterials sowie der CIR-Luftbilder wurde mit der Georeferenzierungssoftware WGEO in der Version 3.0a durchgeführt. Dieses Programm ermöglicht das Georeferenzieren sowie das raumbezogene Bearbeiten von Rasterdateien und das Transformieren von Raster- und Vektordateien. Die Ergebnisse können in diversen GIS genutzt werden.

Die statistische Auswertung der E-SAR-Daten sowie die Bestimmung der Rahmenparameter im

Untersuchungsgebiet während der Befliegungskampagnen wurde mit der Tabellenkalkulation MS Excel durchgeführt.

Die Digitalisierung und Attributierung von Vektordaten wurde unter dem GIS ArcINFO und dem Desktop-GIS ArcView 3.2 organisiert. Über SQL (**S**tructured **Q**uery **L**anguage) konnte die Datenanbindung aus externen Datenbanken realisiert werden.

Zusätzlich waren in einigen Arbeitsschritten weitere Computerprogramme erforderlich, auf die im Text hingewiesen wird.

5.1 Lage der bearbeiteten Fernerkundungsdaten

Als Untersuchungsgebiet wurde eine typische Auenlandschaft ausgewählt, die im SE des ca. 60 km nordöstlich von Berlin gelegenen Oderbruchs liegt (Abb. 5.2). An der deutsch-polnischen Grenze bei Kietz, 20 km nördlich von Frankfurt/Oder gelegen, erstreckt sich das Areal in E-W-Richtung mit 14 km und in N-S-Richtung mit 16,5 km und deckt dabei eine Fläche von 231 km^2 ab. Die Eckkoordinaten des Untersuchungsgebietes sind:

NW-Eckpunkt: Rechtswert = $^{34}62590$ Hochwert = $^{58}30510$

SE-Eckpunkt: Rechtswert = $^{34}76585$ Hochwert = $^{58}13965$

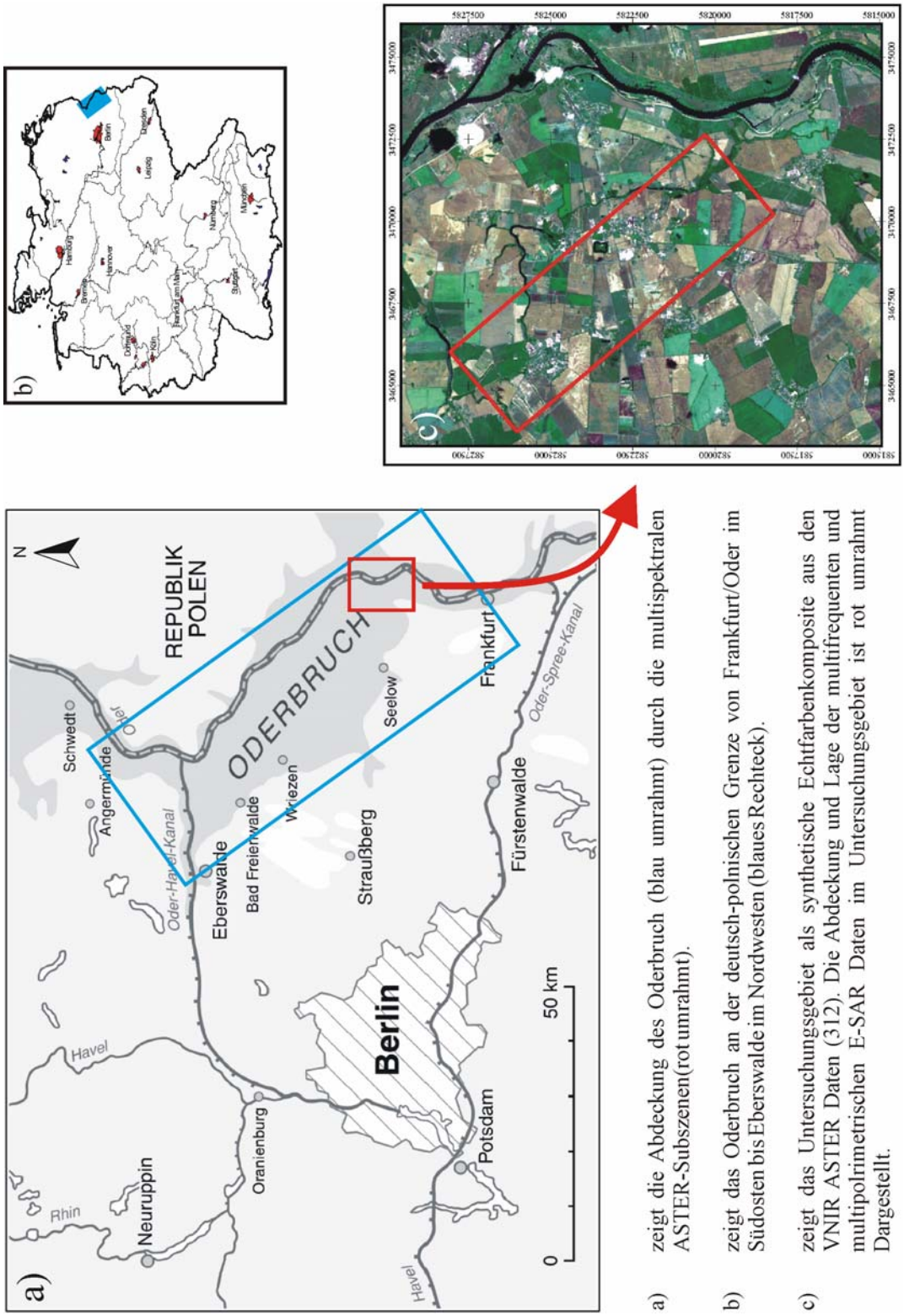
Die E-SAR-Daten decken den zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes bei Manschnow ab und erstrecken sich in NW-SE Richtung über 31,5 km^2. Die Eckkoordinaten sind:

NW-Eckpunkt: Rechtswert = $^{34}63674$ Hochwert = $^{58}26038$

SE-Eckpunkt: Rechtswert = $^{34}72978$ Hochwert = $^{58}19671$

Das Untersuchungsgebiet befindet sich auf den Topographischen Kartenblättern (TK25) Seelow (3452) und Gorgast-Küstrin (3453). Die Fernerkundungsdaten wurden auf Grundlage der Universalen Transversalen Mercator-Projektion (UTM) mit dem amtlichen Lagebezugssystem ETRS89 (European Terrestrial Reference-System - Epoche 1989.0) georeferenziert.

Die wichtigsten Lokalitäten, auf die sich im folgenden bezogen wird, sind zur Orientierung in einer Luftbildkarte verzeichnet (Anhang F).



a) zeigt die Abdeckung des Oderbruch (blau umrahmt) durch die multispektralen ASTER-Subszenen (rot umrahmt).

b) zeigt das Oderbruch an der deutsch-polnischen Grenze von Frankfurt/Oder im Südosten bis Eberswalde im Nordwesten (blaues Rechteck).

c) zeigt das Untersuchungsgebiet als synthetische Echtfarbenkomposite aus den VNIR ASTER Daten (312). Die Abdeckung und Lage der multifrequenten und multipolrimetrischen E-SAR Daten im Untersuchungsgebiet ist rot umrahmt Dargestellt.

Abb. 5.2: **Lage des Untersuchungsgebietes und Abdeckung durch die verwendeten Fernerkundungssysteme.**

5.2 Grundlagen und Methoden der Datenaufbereitung

Alle zur Verfügung stehenden Daten wurden gemäß ihrer speziellen Charakteristika für die gegebene Fragestellung aufbereitet und innerhalb eines gemeinsamen Raumbezugssystems in einem Geoinformationssystem (GIS) zusammengeführt. Zu diesem Zweck müssen sie in digitaler Form vorliegen bzw. digital aufbereitet werden.

5.2.1 Digitale Aufbereitung des geologischen und historischen Kartenmaterials

Ein grundlegender Arbeitsschritt der Datenaufbereitung stellt das Scannen des analogen Kartenmaterials sowie der analog vorliegenden Luftbilder dar. Scannen ist die einfachste und schnellste Art der Analog-Digital-Umwandlung.

Durch das Scannen konnte die analog vorliegende Reichsbodenschätzung aus dem Jahre 1900 (1:25.000) in einen Rasterdatensatz überführt werden.

Um das historische Kartenmaterial zu schonen, wurde die Analog-Digital-Umwandlung mit Hilfe einer Digitalkamera durchgeführt.

Nach dem ersten Arbeitsschritt der Analog-Digital-Umwandlung beinhalten die erzeugten Rasterdaten aus der Reichsbodenschätzung und den historischen Karten lediglich die Koordinaten des Flächenrasters (Zeilennummer, Spaltennummer) und somit über keinen räumlichen Bezug. Für die weitere Nutzung in einem GIS war es notwendig, die Datensätze auf Grundlage der UTM-Projektion in das amtliche Lagebezugssystem ETRS89 zu transformieren. Diese Transformation zwischen der Geometrie des ursprünglichen Rasterdatensatz und einer geometrischen Kartenprojektion wird als Geokodierung bzw. Georeferenzierung bezeichnet.

Für den Rasterdatensatz der Reichsbodenschätzung wurden 20 homogen verteilte, auch die Randbereiche abdeckende Passpunkte auf Basis des Koordinatengitters (mit den entsprechenden UTM-Koordinaten) versehen. Als Passpunkte werden Punkte bezeichnet, deren Koordinatenlage aus dem Kartenausschnitt selbst (z.B. eingetragenes Koordinatensystem) oder aus anderen Datenquellen (z.B. GPS-Ortsbestimmungen) genau bekannt sind. Auf Grundlage dieser Passpunkte wurde das Flächenraster mittels polynomischer Ausgleichsrechnungen geometrisch entzerrt, gedreht und in ein Koordinatensystem abgebildet, so dass jeder Rasterzelle eine eindeutige Lage und Ausdehnung im Raum zugeordnet werden kann. Dabei kam die rechenaufwendige kubische Interpolation (es werden insgesamt 16 Elemente zur Bestimmung der Ausgabematrix verwendet) als Resampling-Verfahren zum Einsatz.

Die Georeferenzierung des gescannten historischen Kartenmaterials gestaltete sich aufgrund schwer lokalisierbarer Passpunkte als überaus problematisch. Wegen des starken Wandels der Infrastruktur des Untersuchungsgebietes in den vergangenen 250 Jahren konnten als markante Punkte zur Entzerrung nur die im historischen Kartenmaterial eingezeichneten Ortsnamen mit dem zugehörigen Ortsymbol sowie die in den aktuellen topographischen Karten noch verzeichneten Oderschlingen mit den entsprechenden Ungenauigkeiten genutzt werden.

Im Anschluss an die Überführung des analogen Kartenmaterials in das Rasterdatenformat und

der Georeferenzierung wurden die Informationsebenen des Kartenmaterials, die für die weiteren Untersuchungen von Bedeutung sind, im GIS aufbereitet. Folgende Arbeitsschritte wurden dabei durchlaufen:

- Mit der **Vektorisierung** des thematischen Inhaltes der Karten erfolgt die Transformation der Rasterdaten in Vektorform. Dabei werden die geometrischen Inhalte des Kartenmaterials, z.B. die Bodenschätzung und das Drainagenetz sowie Bohr- und Messpunkte diskret nach dem *Layer*-Prinzip in unterschiedlichen Ebenen digitalisiert und abgespeichert (ZUMSPREKEL 2002).

  Der auf diese Weise aufgegliederte Karteninhalt bleibt aufgrund des einheitlichen geodätischen Bezugssystems gemeinsam abrufbar, gleichzeitig sind jedoch auch Verknüpfungen einzelner *Layer* mit anderen raumbezogenen Daten (z.B. Fernerkundungsdaten) möglich. Die Objekte können ihrer Geometrie entsprechend durch die drei Geometrietypen Punkt (*point*), Linie (*line*) und Fläche (*polygon*) vollständig beschrieben bzw. vektorisiert werden.

- **Aufbau topologischer Beziehungen**: Nach der Erfassung der geometrischen Strukturen wird die Topologie eines Vektor-*Layer* aufgebaut. Die topologischen Eigenschaften von Vektorobjekten äußern sich in den Beziehungen ihrer Nachbarschaft, des Enthaltenseins und der Überschneidung (BARTELME 1995). Im Unterschied zu graphischen Systemen bedeutet Topologie hier, dass eine Grenze nur einmal digitalisiert werden muss. Sie wird sowohl zur Objektbildung der linken wie auch der rechten Fläche verwendet. Der Grenze wiederum ist bekannt, welche Flächen sie begrenzt. Flächenüberschneidungen und andere Digitalisierfehler, z.B. kreuzende oder nicht geschlossene Linien werden auf diese Weise sichtbar und können bereinigt werden. Diese Informationen und Verknüpfungen werden bei dem Topologieaufbau automatisch generiert.

- **Attributierung** der Vektordaten: In dem abschließenden Arbeitsschritt der Digitalisierung werden alle Informationen, die einen räumlichen Bezug haben, aber keine eigentlichen Geometriedaten sind, mit den zugehörigen Punkten, Linien bzw. Polygonen verknüpft. Relevante Sachdaten, wie die Grundwasserstände eines betreffenden Punktes, können in dem GIS in einer objekt-orientierten Tabelle (*feature attribute table*) aufgenommen werden. Die Daten können auch in einer relationalen Datenbank gespeichert und über eine gemeinsame Schlüsselnummer den entsprechenden Objekten zugeordnet werden. Grosse Datenmengen werden zunehmend mittels komplexer Datenbankmanagementsysteme (DBMS) verwaltet.

5.2.2 Digitale Aufbereitung der CIR-Luftbilder

Mit Hilfe eines Scanners wurden die analogen CIR-Luftbilder in Rasterdatensätze überführt. Für die Befliegungskampagne im August 2001 standen lediglich 13 Aufnahmen zur Verfügung, während der nahezu wolkenlose Himmel im August 2002 die Aufnahme von 31 CIR-Luftbildern ermöglichte.

Für die weitere Nutzung in einem GIS wurden die digitalen CIR-Luftbilder auf Grundlage der UTM-Projektion in das amtlichen Lagebezugssystem ETRS89 transformiert. Hierzu wurden für die 44 Rasterdatensätze zwischen 15 und 20 homogen verteilte, auch die Randbereiche abdeckende Passpunkte auf Basis der topographischen Karte (TK10) gesetzt.

Die Transformation zwischen der Geometrie der originalen Rasterdatensätze und der geometrischen Kartenprojektion wurde nach demselben Verfahren durchgeführt wie in Kap. 5.2.1 beschrieben.

5.2.3 E-SAR

Aus den Befliegungskampagnen stehen jeweils vier E-SAR-Datensätze aus folgenden Bändern und Polarisationen zur Verfügung:

X_{HH} L_{HH} L_{HV} L_{VH} L_{VV} P_{HH} P_{HV} P_{VH} P_{VV}

Die E-SAR-Daten wurden in einem ersten Arbeitsschritt vom Institut für Hochfrequenztechnik des DLR Oberpfaffenhofen unter Berücksichtigung von Systemparametern und den Aufnahmebedingungen aufbereitet. Die Aufbereitung der Rohdaten umfasste die Korrektur der Verzerrungen durch Bewegungen des Flugzeugs (*Motion Compensation*), die Erzeugung diskreter Bildpunktsignale aus den Radar-Rohdaten (*Prozessierung*), die radiometrische Kalibrierung, die Generierung von Bilddaten in Ground-Range- und Slant-Range-Geometrie sowie die Erzeugung von Multilook-Bildern.

Die E-SAR-Datensätze der beiden Befliegungskampagnen in 2001 wurden auf EXAByte-Bändern ausgeliefert. Diese Magnetbänder mussten zunächst in einer zeitaufwendigen Prozedur ausgelesen und für die weitere Verarbeitung auf CD-Rom archiviert werden. Die immens großen Datenmengen, die durch die multifrequente und multipolarisierte Aufzeichnung von E-SAR-Daten generiert wurden, stellen eine besondere Herausforderung für die Hard- und Software sowie die Logistik und Projektplanung dar. Für das Untersuchungsgebiet sind je Befliegungskampagne ca. 14 GB Daten aufgezeichnet und generiert worden. So wurden für die Archivierung der Daten aus 2001 48 CD-Roms benötigt. Die E-SAR-Daten der Befliegungskampagnen aus 2002 wurden vom DLR auf DVD ausgeliefert, so dass der Arbeitschritt der Archivierung eingespart werden konnte.

Die E-SAR-Daten stehen als Intensitätsdaten im 16bit-Format wahlweise in Slant-Range- oder Ground-Range-Projektion zur Verfügung. Die Intensitäten lassen sich nach der Gleichung $\sigma^0 = 10\log_{10}(I)$ als Rückstreukoeffizient ausdrücken. Sie stellen die aufgenommenen quadrierten Amplituden des Rückstreusignals ($I = A^2$) dar. Diese Daten stehen in keinem Koordinatensystem und sind nicht untereinander koregistriert. Zusätzlich wurden geokodierte Multilook-Bilddaten im 16bit-Format sowie SLC-Daten (**S**ingle **L**ook **C**omplex) in Slant-Range-Projektion ausgeliefert.

5.2.3.1 Preprocessing

Im Rahmen dieser Arbeit wurde für die Generierung von multifrequenten und multipolarisierten E-SAR-Mehrkanalbildern folgende Kanalbelegung per Definition festgelegt:

- Die Reihenfolge der Kanäle beginnt mit der kürzesten Wellenlänge (X-Band – 3,1 cm), geht über die mittlere Wellenlänge (L-Band – 23 cm) und endet mit der längsten Wellenlänge (P-Band – 68 cm).
- Die multipolarimetrischen Datensätze werden dabei in der Reihenfolge von der horizontalen Polarisation (HH) über die Kreuzpolarisationen (HV, VH) zur vertikalen Polarisation (VV) berücksichtigt.
- Synthetisch erzeugte Datensätze wie Ratios oder Hauptkomponenten werden immer an das Ende der Kanalbelegung gestellt.

Bei der Generierung eines Mehrkanalbildes für das RGB-Farbsystem werden die in Graustufen (*DN*) kodierten Rückstreuintensitäten der einzelnen Bänder und Polarisationen des E-SAR Sensors den Kanälen ROT, GRÜN und BLAU zugeordnet. Erst durch die Kombination dreier Kanäle erhält man eine Farbkomposite auf Basis des additiven RGB-Farbwürfels (Abb. 5.3).

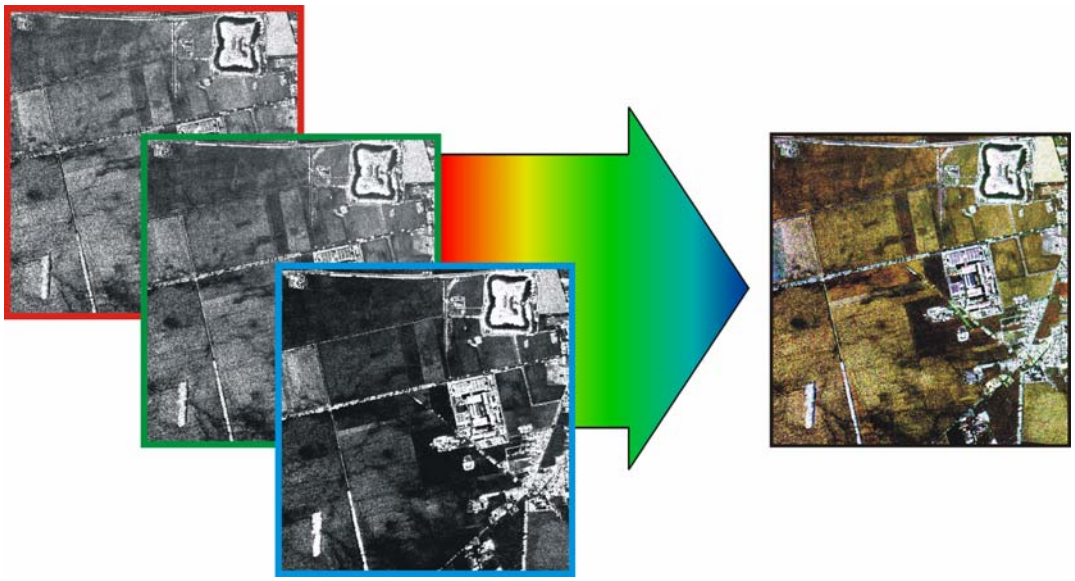


Abb. 5.3: Funktionsweise der Generierung eines Mehrkanalbildes für das RGB-Farbsystem.

Aus den insgesamt 9 primären Kanälen der E-SAR-Daten lassen sich insgesamt 270 verschiedene Farbkompositen erzeugen (9x6x5). Einen unterschiedlichen Aussagegehalt besitzen wegen der Permutationen (3x2x1) aber nur (270/6) 45 Farbkompositen.

So setzt sich z.B. eine 6-Kanal Farbkomposite auf Basis des X-, L- und P-Band sowie dem synthetisch erzeugten Datensatz der 1. Hauptkomponente aus folgender Kanalbelegung zusammen:

1. Kanal	2. Kanal	3. Kanal	4. Kanal	5. Kanal	6. Kanal
X_{HH}	L_{HH}	L_{HV}	L_{VV}	P_{HH}	L_{HK1}

Eine erste visuelle Prüfung der neun Einzelkanäle aller Befliegungskampagnen ergab, dass das P-Band in der Kreuzpolarisation und der vertikalen Polarisation durch starke Störungen gekennzeichnet ist (Abb. 5.4). Dieses Rauschen ließ sich nicht herausfiltern, so dass diese Kanäle für die weitere Verarbeitung nicht genutzt werden konnten. Die horizontale Polarisation des P-Bandes weist schwächere Störungen auf, so dass diese Polarisation mit Einschränkungen für die weitere Auswertung herangezogen wurde. Vermutlich sind diese Störungen auf das Systemrauschen des Sensors sowie auf TV-/Mobilfunk Sende- und Empfangsanlagen im Untersuchungsgebiet zurückzuführen (MÜLLENHOFF 2003).

Die statistische Auswertung der horizontalen Polarisation des P-Bands und aller daraus abgeleiteten Ergebnisse müssen jedoch immer in Relation zu den Bildstörungen gesehen werden.

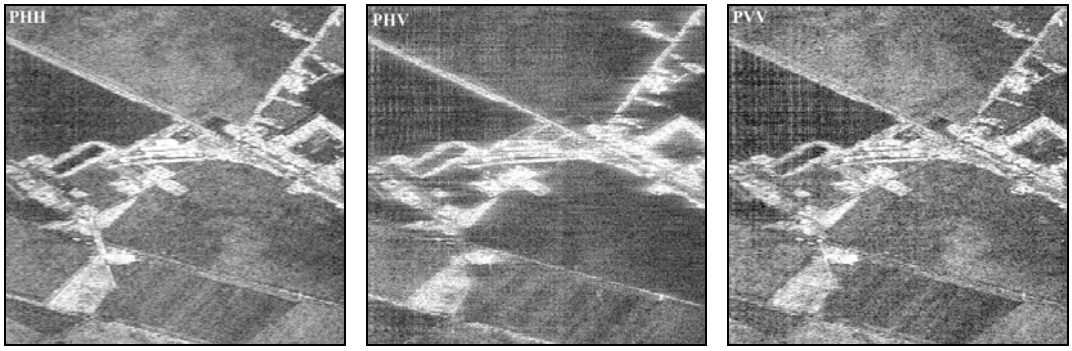


Abb. 5.4: Bildqualität der einzelnen P-Band Polarisationen an einem Beispiel südlich von Golzow. Lediglich die horizontale Polarisation kann aufgrund der geringsten Störungen im P-Band eingeschränkt zur Auswertung herangezogen werden.

5.2.3.2 Radiometrische Korrektur

Die Aufnahmegeometrie des SAR-Systems (Kap. 3.1.2.2) führt zu z.T. extremen Grauwertunterschieden vom Near- zum Far-Range-Bereich, so dass eine Ausgleichung dieses Unterschiedes zwingend erforderlich wird. Die radiometrische Korrektur der geokodierten E-SAR-Daten wurde mit dem Programm RADGEO (KOCH 2002) durchgeführt.

Die E-SAR Intensitätsdaten bestehen aus einem Bildbereich, der Informationen enthält sowie dem sogenannten Randbereich, der keine verwendbare Information enthält (Abb. 5.5). Um diese Bereiche voneinander zu trennen, werden in einem ersten Schritt die vier Eckkoordinaten (das Gelände wird streifenweise abgetastet) des gesamten Bildbereiches gesucht.

Aus den Ecken werden Vektoren berechnet, die als Grundlage für die Festlegung der Anzahl von Zeilen und Spalten des affin transformierten Bildes dienen. Das Mittel der beiden kürzesten Vektoren bildet die Spaltenrichtung und legt somit die Anzahl der Spalten fest, das Mittel der beiden längsten Vektoren bildet die Zeilenrichtung des affin transformierten Bildes und legt

somit die Anzahl der Zeilen fest. Die Ecken dieses Bereiches dienen als korrespondierende Punkte zu den gesuchten Eckpunkten. Aus diesen gemeinsamen vier Passpunkten werden die Affintransformationsparameter auf der Grundlage der Gl. 5.1 und 5.2 berechnet.

$$SP' = a_0 + a_1\ SP + a_2\ ZE \qquad \text{(Gl. 5.1)}$$

$$ZE' = b_0 + b_1\ SP + b_2\ ZE \qquad \text{(Gl. 5.2)}$$

Die einzelnen Spalten können aus dem so transformierten Bild aufsummiert werden. Hierbei werden wiederum nicht gültige Pixelwerte berücksichtigt, indem diese nicht in die Mittelwertbildung mit eingehen. Es werden *n* Mittelwerte gebildet, wobei *n* die Anzahl der Spalten des affin transformierten Bildes darstellt.

Die Kalibrierfunktion wird dargestellt durch ein Polynom 3. Grades:

$$Y = a_0 + a_1\ X + a_2\ X^2 + a_3\ X^3 \qquad \text{(Gl. 5.3)}$$

Die Funktion wird mit Hilfe einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen ermittelt. Stützpunkte sind dabei die errechneten Mittelwerte, d.h. die aufsummierten Spalten. Die radiometrische Korrektur der Bilddaten wird durchgeführt, indem von den jeweiligen Pixelwerten der Wert der Kalibrierfunktion abgezogen wird.

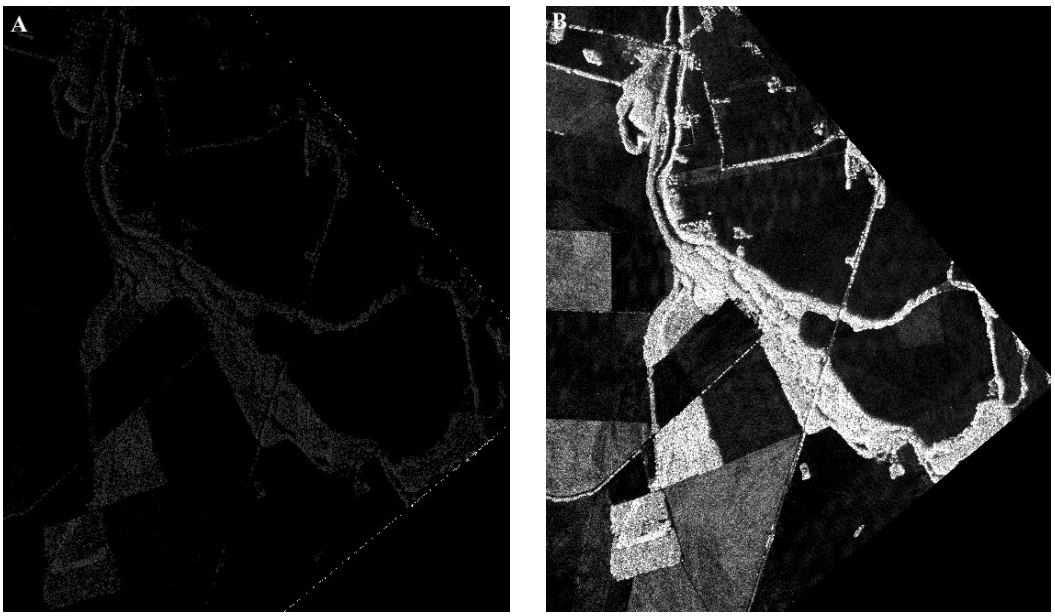


Abb. 5.5: E-SAR L_{VH} (August 2001) vor (A) und nach der radiometrischen Korrektur (B) unter Berücksichtigung der fehlerhaften Pixel. Testgebiet östlich von Rathstock.

5.2.3.3 Statistische Analyse

Die statistische Analyse der Grauwerte (*DN*s) multifrequenter und multipolarimetrischer SAR-Daten stellt eine wichtige Grundlage dar, um die visuelle Analyse und Interpretation anhand mathematischer Parameter zu stützen. Durch die Berechnung statistischer Kenngrößen können Rückschlüsse auf die Helligkeit und den Kontrastreichtum von einzelnen Kanälen eines

multifrequenten und multipolarimetrischen Datensatzes gezogen werden. Zudem lässt sich abschätzen, inwieweit sich die einzelnen Bänder und ihre Polarisationen hinsichtlich ihres Informationsgehaltes gleichen. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass statistische Variationen in multifrequenten und multipolarimetrischen Daten auf Einflüssen von Aufzeichnungsfehlern und atmosphärischen Effekten beruhen oder durch ein markantes Rückstreuverhalten von geologisch wenig relevanten Oberflächenobjekten hervorgerufen werden können. Eine Fernerkundungsanalyse kann somit nicht ausschließlich nach statistischen Kriterien durchgeführt werden, sondern muss zusätzlich interpretatorisches Wissen berücksichtigen.

Die Verteilung von Grauwerten einzelner Kanäle eines multifrequenten und multipolarimetrischen Radar Datensatzes kann grafisch in einem Histogramm dargestellt werden. Mit Hilfe von Form und Verlauf des Histogramms lassen sich generelle Aussagen über den Kontrastreichtum und die Gesamthelligkeit des Kanals machen. Statistische Kenngrößen wie der niedrigste bzw. höchste Grauwert einer Verteilung (DN_{min} bzw. DN_{max}), ihr arithmetischer Mittelwert DN_{mean} und ihre Standardabweichung σ erlauben es, die Gesamthelligkeit und den Kontrastreichtum von Einzelkanälen zu quantifizieren. DN_{mean} als Maß für die Gesamthelligkeit eines Bildes berechnet sich nach der Formel (KRAUS 1991):

$$DN_{mean} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{n} DN_i \qquad \text{(Gl. 5.4)}$$

mit n = Anzahl der Pixel

Die Standardabweichung σ eines Kanals als Maß für den Kontrastreichtum errechnet sich aus (KRAUS 1991):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{n} (DN_{mean} - DN_i)^2} \qquad \text{(Gl. 5.5)}$$

Nach der Einbuße der Kanäle P_{HV}, P_{VH} und P_{VV} wegen des hohen Rauschanteils (Kap. 5.4.1), bilden für die weiteren statistischen Auswertungen folgende multifrequente und multipolarimetrische 6-Kanal-Bilddaten die Basis.

1. Kanal	2. Kanal	3. Kanal	4. Kanal	5. Kanal	6.Kanal
X_{HH}	L_{HH}	L_{HV}	L_{VH}	L_{VV}	P_{HH}

Die statistischen Parameter der E-SAR-Daten aus 2001 und 2002 für das Untersuchungsgebiet sind in Tab. 5.1 bis Tab. 5.4 aufgeführt.

Die E-SAR-Daten der Befliegungskampagne April 2001 sind durch durchschnittlich hohe Helligkeit und Kontrastreichtum gekennzeichnet. Die horizontale Polarisation des X-Bands (X_{HH}) verfügt über den höchsten maximalen Grauwert (DN_{max} = 246) und Mittelwert (DN_{mean} = 14,309) sowie über die höchste Standardabweichung (σ = 9,551) und damit über den größten Kontrastreichtum. Diese statistischen Werte sind auf die speziellen Eigenschaften des kurzwelligen X-Bands zurückzuführen, nicht in ein Medium einzudringen, sondern direkt an der Oberfläche zu reflektieren (Kap. 3.1.3.1.1). So wird ein hoher Anteil der ausgesendeten Energie

vom Sensor wieder empfangen. Die horizontale und vertikale Polarisation des L-Bands zeichnet sich durch eine mittlere Helligkeit sowie eine hohe Standardabweichung aus. Durch die Eigenschaft des langwelligen L-Bands, in ein Medium eindringen zu können, und der damit verbundenen Volumenstreuung wird ein geringerer Anteil der ausgesendeten Energie wieder zum Sensor zurückgestreut (Kap. 3.1.3.1.1).

Tab. 5.1: Statistische Parameter der Befliegungskampagne April 2001.

E-SAR 6-Kanal (April 2001)

Kanal	DN_{min}	DN_{max}	DN_{mean}	DN_{median}	DN_{mode}	σ^2	σ
X_{HH}	**1**	**246**	**14,309**	**13**	**12**	**91,222**	**9,551**
L_{HH}	**1**	**232**	**8,616**	**6**	**6**	**87,161**	**9,336**
L_{HV}	1	54	3,488	2	2	16,909	4,112
L_{VH}	1	52	3,613	2	2	15,547	3,943
L_{VV}	**1**	**164**	**8,778**	**7**	**6**	**50,851**	**7,131**
P_{HH}	1	136	5,813	3	3	80,389	8,966

Tab. 5.2: Statistische Parameter der Befliegungskampagne August 2001.

E-SAR 6-Kanal (August 2001)

Kanal	DN_{min}	DN_{max}	DN_{mean}	DN_{median}	DN_{mode}	σ^2	σ
X_{HH}	**1**	**242**	**21,174**	**19**	**18**	**140,517**	**11,854**
L_{HH}	**1**	**140**	**8,466**	**7**	**5**	**38,639**	**6,216**
L_{HV}	1	35	4,050	3	2	14,661	3,829
L_{VH}	1	34	3,915	3	2	13,141	3,625
L_{VV}	**1**	**74**	**7,812**	**6**	**5**	**26,041**	**5,103**
P_{HH}	1	139	5,813	3	3	59,475	7,712

Tab. 5.3: Statistische Parameter der Befliegungskampagne April 2002.

E-SAR 6-Kanal (April 2002)

Kanal	DN_{min}	DN_{max}	DN_{mean}	DN_{median}	DN_{mode}	σ^2	σ
X_{HH}	**1**	**234**	**15,018**	**14**	**13**	**65,238**	**8,077**
L_{HH}	**1**	**252**	**8,303**	**6**	**5**	**92,506**	**9,618**
L_{HV}	1	55	3,743	2	1	25,090	5,009
L_{VH}	1	36	3,785	2	1	24,621	4,962
L_{VV}	**1**	**182**	**7,747**	**6**	**5**	**46,036**	**6,785**
P_{HH}	1	240	5,080	2	2	90,649	9,521

Tab. 5.4: Statistische Parameter der Befliegungskampagne August 2002.

E-SAR 6-Kanal (August 2002)

Kanal	DN_{min}	DN_{max}	DN_{mean}	DN_{median}	DN_{mode}	σ^2	σ
X_{HH}	**1**	**233**	**11,801**	**11**	**10**	**46,444**	**6,815**
L_{HH}	**1**	**83**	**7,279**	**6**	**4**	**32,160**	**5,671**
L_{HV}	1	68	3,600	2	1	13,846	3,721
L_{VH}	1	35	3,611	2	1	11,404	3,377
L_{VV}	**1**	**73**	**7,295**	**6**	**4**	**27,995**	**5,291**
P_{HH}	1	112	6,068	4	3	55,801	7,470

Da die Kreuzpolarisationen lediglich die depolarisierte Strahlung widerspiegeln, liegt hier die Ursache für die geringen Helligkeits- und Kontrastwerte. In einer zu generierenden RGB-Farbkomposite, die aus jeweils drei E-SAR-Kanälen besteht, ist daher X_{HH}, L_{HH} und L_{VV} nach statistischen Kriterien bevorzugt zu verwenden. Die horizontale Polarisation des P-Bands zeigt durchweg hohe statistische Werte für die Helligkeit und den Kontrastreichtum. Diese Werte sind zu einem hohen Anteil auf die Störungen im P-Band zurückzuführen.

Die E-SAR-Daten der übrigen Befliegungskampagnen zeigen ebenfalls eine durchschnittlich hohe Helligkeit und Kontrastreichtum. Die Tendenzen für die horizontale Polarisation des X-Bands (X_{HH}) sowie das vollpolarimetrische L-Band und P_{HH} verhalten sich ähnlich wie für die April-2001-Daten beschrieben. Für eine zu generierende E-SAR RGB-Farbkomposite aus den Daten der Befliegungskampagnen April 2002 sowie August 2001 und 2002 ist daher ebenfalls X_{HH}, L_{HH} und L_{VV} nach statistischen Kriterien bevorzugt zu verwenden.

Vergleicht man den durchschnittlichen Kontrastreichtum der einzelnen Befliegungskampagnen untereinander, so lässt sich feststellen, dass die Augustdaten einen durchweg geringeren Kontrastreichtum aufweisen als die Daten aus den April-Kampagnen. Dieser Trend ist auch für den durchschnittlichen Kontrastreichtum des vollpolarimetrischen L-Bands kennzeichnend.

Diese statistischen Eigenschaften sind auf die unterschiedliche Vegetationsentwicklung im Frühjahr und im Spätsommer zurückzuführen. Die höhere Pflanzenvitalität im Sommer bedingt das Eindringen und das teilweise Durchdringen der Vegetation durch die langwelligen Radarstrahlen. Der damit verbundene höhere Anteil der Volumenstreuung führt dazu, dass ein geringerer Anteil der ausgesendeten Energie wieder zum Sensor zurückgestreut wird (Kap. 3.1.3.1.1). Im Frühjahr dominierten aufgrund der geringeren Pflanzenvitalität die Anteile der Oberflächenstreuung, so dass ein höherer Anteil der ausgesendeten langwelligen Radarstrahlen vom Sensor wieder empfangen wird. Unterstützt wird diese Vermutung, da das kurzwellige X-Band, das durch die Oberflächenstreuung gekennzeichnet ist, diese Variationen zwischen Frühjahrs- und Spätsommer-Befliegungen nicht zeigt.

Die Bildqualität ist anhand der aufgeführten Parameter der einzelnen SAR-Kanäle quantitativ erfassbar. Aussagen, inwieweit die Radarrückstreuung zweier Kanäle miteinander korreliert und eine Datenredundanz in beiden Kanälen vorliegt, sind auf ihrer Grundlage jedoch nicht möglich.

Für die Darstellung und Interpretation von SAR-Daten in RGB-Farbkompositen sind daher möglichst redundanzfreie Kanalkombinationen vorzuziehen.

Die Korrelation der einzelnen E-SAR Bänder und ihrer Polarisationen kann auch statistisch als Matrix der Korrelationskoeffizienten $r_{1,2}$ angegeben werden (Tab. 5.5 – Tab. 5.8). Der Korrelationskoeffizient errechnet sich aus der Kovarianz $\sigma_{1,2}$ (Gl. 5.6) und kann Werte in einem Bereich von -1 bis +1 annehmen (Gl. 5.7).

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^{n} (DN_{1,i} - DN_{mean,1}) \times (DN_{2,i} - DN_{mean,2}) \qquad \text{(Gl. 5.6)}$$

$$r_{1,2} = \frac{\sigma_{1,2}}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \qquad \text{(Gl. 5.7)}$$

Eine vollständige positive bzw. negative Korrelation würde bei r = 1 bzw. r = - 1 erreicht. Je stärker r gegen den Wert 0 strebt, desto unabhängiger ist die Information der Kanäle.

Tab. 5.5: Korrelationsmatrix der E-SAR-Bänder und Polarisationen der Befliegungskampagne April 2001.

E-SAR 6-Kanal (April 2001)

Kanal	$XS3_{HH}$	$LS3_{HH}$	$LS3_{HV}$	$LS3_{VH}$	$LS3_{VV}$	$PS3_{HH}$
$XS3_{HH}$	1	0,466	0,383	**0,382**	0,423	**0,322**
$LS3_{HH}$	0,466	1	0,658	0,654	0,782	0,624
$LS3_{HV}$	0,383	0,658	1	0,976	0,626	0,645
$LS3_{VH}$	**0,382**	0,654	0,976	1	0,623	0,641
$LS3_{VV}$	0,423	0,782	0,626	0,623	1	0,517
$PS3_{HH}$	**0,322**	0,624	0,645	0,641	0,517	1

Tab. 5.6: Korrelationsmatrix der E-SAR-Bänder und Polarisationen der Befliegungskampagne August 2001.

E-SAR 6-Kanal (August 2001)

Kanal	$XS3_{HH}$	$LS3_{HH}$	$LS3_{HV}$	$LS3_{VH}$	$LS3_{VV}$	$PS3_{HH}$
$XS3_{HH}$	1	0,471	0,403	**0,400**	0,452	**0,299**
$LS3_{HH}$	0,471	1	0,646	0,643	0,756	0,630
$LS3_{HV}$	0,403	0,646	1	0,986	0,590	0,570
$LS3_{VH}$	**0,400**	0,643	0,986	1	0,586	0,567
$LS3_{VV}$	0,452	0,756	0,590	0,586	1	0,479
$PS3_{HH}$	**0,299**	0,630	0,570	0,567	0,479	1

Tab. 5.7: Korrelationsmatrix der E-SAR-Bänder und Polarisationen der Befliegungskampagne April 2002.

E-SAR 6-Kanal (April 2002)

Kanal	$XS3_{HH}$	$LS3_{HH}$	$LS3_{HV}$	$LS3_{VH}$	$LS3_{VV}$	$PS3_{HH}$
$XS3_{HH}$	1	0,493	0,385	**0,263**	0,459	**0,357**
$LS3_{HH}$	0,493	1	0,686	0,508	0,801	0,681
$LS3_{HV}$	0,385	0,686	1	0,680	0,626	0,630
$LS3_{VH}$	**0,263**	0,508	0,680	1	0,457	0,508
$LS3_{VV}$	0,459	0,801	0,626	0,457	1	0,570
$PS3_{HH}$	**0,357**	0,681	0,630	0,508	0,570	1

Tab. 5.8: Korrelationsmatrix der E-SAR-Bänder und Polarisationen der Befliegungskampagne August 2002.

E-SAR 6-Kanal (August 2002)

Kanal	$XS3_{HH}$	$LS3_{HH}$	$LS3_{HV}$	$LS3_{VH}$	$LS3_{VV}$	$PS3_{HH}$
$XS3_{HH}$	1	0,430	0,354	**0,255**	0,373	**0,300**
$LS3_{HH}$	0,430	1	0,633	0,450	0,743	0,624
$LS3_{HV}$	0,354	0,633	1	0,625	0,560	0,581
$LS3_{VH}$	**0,255**	0,450	0,625	1	0,389	0,454
$LS3_{VV}$	0,373	0,743	0,560	0,389	1	0,443
$PS3_{HH}$	**0,300**	0,624	0,581	0,454	0,443	1

Die statistische Auswertung der E-SAR-Daten für das Untersuchungsgebiet zeigt eine generell mittelhohe bis hohe Korrelation (r < 0,681) zwischen der horizontalen Polarisation des P-Bands (P_{HH}) und den L-Band-Polarisationen (L_{HH}, L_{HV}, L_{VH} u. L_{VV}). Diese Werte entstehen aus den analogen Eigenschaften des langwelligen L- und P-Band, in Materie eindringen zu können (Kap. 3.1.1.1) und die damit verbundene Modifizierung der Rückstreuung zum Sensor. Eine Kombination aus den L-Band Polarisationen und P_{HH} zeigt somit ähnliche Variationen in der Rückstreuung an. Die L-Band-Polarisationen weisen eine hohe Korrelation untereinander auf, besonders zwischen der horizontalen und der vertikalen Polarisation (r_{0401} = 0,782; r_{0801} = 0,756; r_{0402} = 0,801; r_{0802} = 0,743). Ebenso sind die Kreuzpolarisationen des L-Bands durch eine hohe Korrelation (r > 0,625 und < 0,986) gekennzeichnet, was auf nahezu kongruente Rückstreueigenschaften schließen lässt. Die horizontale Polarisation des X-Bands zeigt generell eine geringe Korrelation mit dem vollpolarimetrischen L-Band und der horizontalen Polarisation des P-Bands (r < 0,493). Diese Werte beruhen auf den großen Unterschieden zwischen dem kurzwelligen X-Band und dem langwelligen L- und P-Band bezüglich der Möglichkeit, in Materie eindringen zu können (Kap. 3.1.1.1) und der damit verbundenen Rückstreueigenschaften von Objekten. Am Niedrigsten korrelieren die Kreuzpolarisation des L-Bands sowie die horizontalen Polarisation des X-Bands (r < 0,403), was eine Kombination dieser Kanalgruppen für Farbdarstellungen im RGB-System favorisiert. Die niedrigen Korrelationswerte der horizontalen Polarisation des P-Bands sind aufgrund der Störungen im P-Band mit Vorbehalt zu betrachten.

Die statistische Analyse sowie die Korrelationsmatrix der Kreuzpolarisationen des L-Bands (Tab. 5.1 – Tab. 5.8) belegen eine nahezu deckungsgleiche Rückstreuung der HV und VH

Kanäle, so dass im weiteren Verlauf der Datenaufbereitung zur Datenreduktion auf die Kreuzpolarisation (VH) verzichtet wurde.

CHAVEZ et al. (1982) haben zur Verknüpfung der beiden Parameter Standardabweichung und Korrelation von Kanälen den Optimum-Index-Faktor (OIF) aufgestellt. Dieser Parameter wird durch eine Division der Summe der Standardabweichungen σ und der Beträge der Korrelationskoeffizienten r für n Kanäle berechnet:

$$OIF = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sigma_i}{\sum_{i=1}^{n} |r_i|} \qquad \text{(Gl. 5.8)}$$

mit n =Anzahl der Kanäle (n = 3)

Für die Auswahl geeigneter Farbkompositen aus der Kombination von drei Kanälen im RGB-Farbsystem kann der OIF eine statistische Entscheidungshilfe darstellen. Je mehr Rückstreuvariationen in der jeweiligen Kanalkombination zu erwarten sind, desto höher ist sein Wert.

Die Berechnung des OIF aus den statistischen Parametern der E-SAR-Daten für das Untersuchungsgebiet ist in Tab. 5.9 bis Tab. 5.10 aufgeführt.

Tab. 5.9: OIF-Verteilung für Drei-Kanal-Kombinationen der E-SAR-Daten aus April und August 2001. Die ersten vier OIF-Ränge sind fett hervorgehoben.

E-SAR 6-Kanal (April 2001)	
Kanalkombination	OIF-Wert
156	**20,336**
126	**19,729**
136	**16,766**
146	**16,703**
125	15,576
123	15,274
124	15,204
135	14,525
145	14,448
256	13,227
236	11,634
246	11,594
356	11,303
456	11,258
134	10,113
235	9,960
245	9,912
234	7,601
346	7,525
345	6,823

E-SAR 6-Kanal (August 2001)	
Kanalkombination	OIF-Wert
156	**20,045**
126	**18,407**
136	**18,399**
146	**18,308**
123	14,405
135	14,377
124	14,326
145	14,299
125	13,797
134	10,792
256	10,201
356	10,153
456	10,066
236	9,620
246	9,538
235	7,605
245	7,529
346	7,145
234	6,012
345	5,807

Tab. 5.10: OIF-Verteilung für Drei-Kanal-Kombinationen der E-SAR-Daten aus April und August 2002. Die ersten vier OIF-Ränge sind fett hervorgehoben.

E-SAR 6-Kanal (April 2002)	
Kanalkombination	OIF-Wert
146	**20,017**
124	**17,923**
126	**17,777**
156	**17,604**
145	16,822
136	16,482
123	14,519
246	14,205
125	13,962
456	13,868
134	13,596
135	13,519
256	12,635
245	12,101
236	12,091
356	11,674
346	10,724
234	10,457
235	10,135
345	9,509

E-SAR 6-Kanal (August 2002)	
Kanalkombination	OIF-Wert
156	**17,535**
146	**17,496**
145	**15,217**
126	**14,736**
136	14,578
124	13,972
456	12,546
135	12,297
125	11,496
123	11,437
134	11,276
246	10,810
356	10,412
256	10,187
236	9,181
245	9,061
346	8,779
345	7,872
235	7,588
234	7,478

Dass die Interpretation der E-SAR-Daten nicht ausschließlich auf die statistische Analyse der Bilddaten basieren kann, zeigt das Beispiel der Kanalkombination L_{HH}, L_{HV} und L_{VV} (235). Diese Kanalkombination, die ausschließlich aus den L-Band Polarisationen besteht, ist im OIF-Ranking für alle Befliegungskampagnen im unteren Drittel angesiedelt. Dennoch weist diese Kanalkombination in der visuellen Auswertung ein großes Potential für die Identifizierung von ehemaligen Flussläufen in Auengebieten auf.

Die Bildverarbeitung und Auswahl von multifrequenten und multipolarimetrischen SAR-Bilddaten für eine geologische Interpretation stellt den Bearbeiter grundsätzlich vor das Problem, subjektive und objektive Entscheidungskriterien miteinander zu verknüpfen. Subjektive Faktoren sind ein erforderlicher Bestandteil bei der Fernerkundungsanalyse. Sie können ihren Verlauf positiv beeinflussen, wenn z.B. der Bearbeiter über das Untersuchungsgebiet bereits geologische Informationen aus Literaturquellen oder aus Felduntersuchungen vorliegen hat (ZUMSPREKEL & BISCHOFF 2003). Sie können sich jedoch auch negativ auswirken, wenn sich z.B. die Auswahl von Bilddaten unbewusst nach einem subjektiven Farbempfinden richtet. Hier besteht die Gefahr, Bilddaten einer Interpretation den Vorzug zu geben, die nicht den optimalen Informationsgehalt enthalten.

Die Abb. 5.6a – 5.6c zeigt E-SAR Farbkompositen der ersten OIF-Ränge. Die Kanalkombination L_{VV}, L_{HH} und L_{HV} (523) aus dem unteren Drittel des OIF-Ranking ist zum Vergleich in Abb. 5.6d abgebildet. Obwohl die L-Band-Polarisationen untereinander eine hohe Korrelation aufweisen (Tab. 5.5 – 5.8), sind auch in dieser Farbkomposite eindeutig mäanderähnliche Strukturen im S und W des Bildbereichs zu erkennen. Die Ursache hierfür liegt in der Eigenschaft des langwelligen L-Bands, in Materie eindringen und z.T. durchdringen

zu können (Kap. 3.1.3.1.1). Das L-Band wird demzufolge nicht so stark von der Vegetationsbedeckung beeinflusst und liefert im Gegensatz zum X-Band Informationen über Substratwechsel im Oberboden.

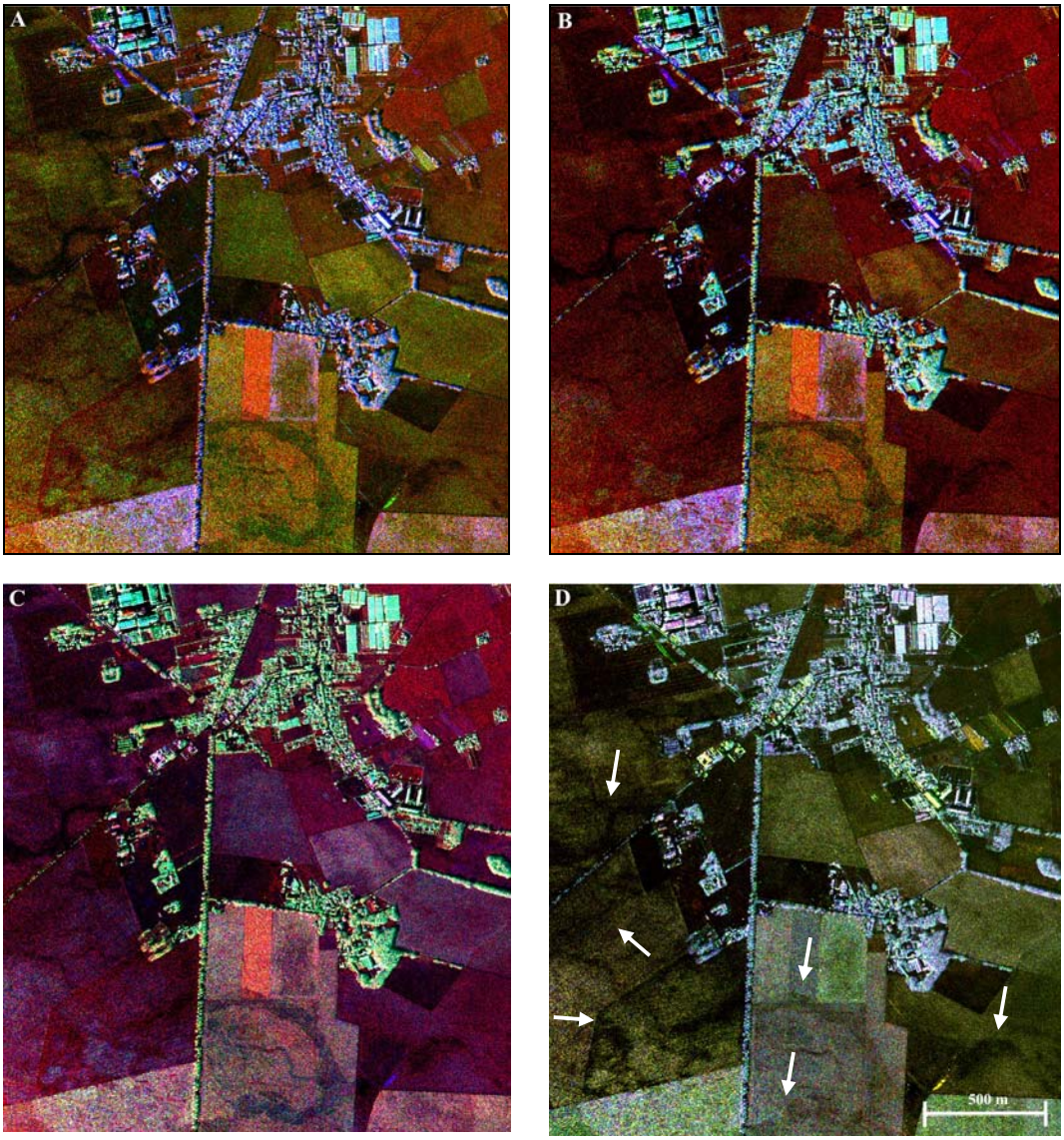


Abb. 5.6: **Basis für die folgenden Farbkompositen sind E-SAR-Daten der August 2002 Befliegungskampagne für ein Testgebiet bei Manschnow. A) Farbkomposite aus den Kanälen X_{HH}, L_{VV}, P_{HH} (156) – OIF-Rang 1. B) Farbkomposite aus den Kanälen X_{HH}, L_{HV}, P_{HH} (146) – OIF-Rang 2. C) Farbkomposite aus den Kanälen X_{HH}, L_{VH}, L_{VV} (145) – OIF-Rang 3. D) Farbkomposite aus den L-Band Polarisationen L_{VV}, L_{HH}, L_{HV} (523) – OIF-Rang 19. Die weißen Pfeile weisen exemplarisch auf die mäanderähnlichen Strukturen hin.**

5.2.3.4 Ratiobildungen

Die Bildung von Ratios (Verhältniswerte) als einfache arithmetische Pixeloperation an E-SAR-Daten stellt z.T. ein geeignetes Verfahren zur Steigerung des Informationsgehaltes der Bilddaten dar. Hierbei werden die Grauwerte für jedes Pixel dividiert (Gl. 5.9) und ein neuer synthetischer Datensatz errechnet, der weniger redundante Informationen beinhaltet und die Rückstreuunterschiede zwischen verschiedenen Objektklassen hervorhebt. In dem neu berechneten Bild erscheinen Oberflächen und Strukturen mit stark variierender Rückstreuung besonders hell bzw. dunkel, während Oberflächen mit gleicher Rückstreuung in beiden Kanälen im neuen Bild zurücktreten.

$$\frac{DN_x}{DN_y} = DN_{Ratiox/y} \qquad \text{(Gl. 5.9)}$$

Diese Pixeloperation ist besonders effektiv bei Kanälen, in denen ein und dasselbe Material in einem Wellenlängenbereich stark zum Sensor hin reflektiert wird bzw. hohe Intensitäten aufweist, während es im anderen überwiegend zerstreut wird bzw. geringe Intensitäten zeigt. Aufgrund ihres geringen Kontrastes müssen in den meisten Fällen die neu berechneten Ratios auf die gesamte Grauwertskala von 0 bis 255 gestreckt werden.

Sensorell bedingte Aufzeichnungsfehler, wie z.B. Streifungen im Bild (*line striping*) oder punktuell fehlende Grauwerte (*dropout*) können in Ratiobildern verstärkt auftreten (DRURY 1993).

Analog zur Vorgehensweise bei der statistischen Analyse der E-SAR-Daten wurde auf der Grundlage von Standardabweichungen (Tab. 5.11 – 5.14) und Korrelationskoeffizienten (Tab. 5.15 – 5.18) auch für sämtliche Ratiobildungen der OIF-Faktor möglicher Drei-Kanal-Kombinationen berechnet.

Tab. 5.11: Statistische Parameter der Ratiobildungen (April 2001).

E-SAR Ratios (April 2001)

Ratio	Kanal	DN_{min}	DN_{max}	DN_{mean}	DN_{median}	DN_{mode}	σ^2	σ
X_{HH}/L_{HH}	1	1	55	5,525	4	3	26,978	5,194
X_{HH}/L_{HV}	2	1	30	6,914	6	4	23,175	4,814
X_{HH}/L_{VV}	3	1	66	4,955	4	3	19,018	4,361
X_{HH}/P_{HH}	4	1	29	5,429	4	3	19,448	4,410
L_{HH}/L_{HV}	5	1	90	7,103	6	6	27,186	**5,214**
L_{HH}/L_{VV}	6	1	54	4,305	4	4	7,129	2,670
L_{HH}/P_{HH}	7	1	51	4,819	4	4	17,556	4,190
L_{HV}/L_{VV}	8	1	55	4,101	3	2	14,175	3,765
L_{HV}/P_{HH}	9	1	43	4,036	3	5	10,511	3,242
L_{VV}/P_{HH}	10	1	79	6,035	5	3	31,058	**5,573**

Tab. 5.12: Statistische Parameter der Ratiobildungen (August 2001).

E-SAR Ratios (August 2001)

Ratio	Kanal	DN_{min}	DN_{max}	DN_{mean}	DN_{median}	DN_{mode}	σ^2	σ
X_{HH}/L_{HH}	1	1	44	3,426	3	2	11,820	3,438
X_{HH}/L_{HV}	2	1	46	8,634	7	4	42,850	**6,546**
X_{HH}/L_{VV}	3	1	35	3,238	3	2	7,964	2,822
X_{HH}/P_{HH}	4	1	64	7,436	6	4	40,704	6,380
L_{HH}/L_{HV}	5	1	87	9,691	8	6	46,991	**6,855**
L_{HH}/L_{VV}	6	1	77	4,675	4	4	7,751	2,784
L_{HH}/P_{HH}	7	1	39	4,625	4	2	14,273	3,778
L_{HV}/L_{VV}	8	1	127	5,219	4	3	21,959	4,686
L_{HV}/P_{HH}	9	1	47	3,259	3	3	9,822	3,134
L_{VV}/P_{HH}	10	1	49	5,263	4	3	22,639	4,758

Tab. 5.13: Statistische Parameter der Ratiobildungen (April 2002).

E-SAR Ratios (April 2002)

Ratio	Kanal	DN_{min}	DN_{max}	DN_{mean}	DN_{median}	DN_{mode}	σ^2	σ
X_{HH}/L_{HH}	1	1	51	5,897	4	4	34,351	5,861
X_{HH}/L_{HV}	2	1	32	8,410	7	1	32,342	5,687
X_{HH}/L_{VV}	3	1	35	3,167	2	2	8,922	2,987
X_{HH}/P_{HH}	4	1	37	7,550	6	1	31,742	5,634
L_{HH}/L_{HV}	5	1	52	6,732	6	8	20,830	4,564
L_{HH}/L_{VV}	6	1	19	2,799	3	3	2,570	1,603
L_{HH}/P_{HH}	7	1	74	8,459	7	5	51,639	**7,186**
L_{HV}/L_{VV}	8	1	56	4,046	3	1	16,524	4,065
L_{HV}/P_{HH}	9	1	60	4,515	4	4	13,148	3,626
L_{VV}/P_{HH}	10	1	90	9,750	7	6	72,386	**8,508**

Tab. 5.14: Statistische Parameter der Ratiobildungen (August 2002).

E-SAR Ratios (August 2002)

Ratio	Kanal	DN_{min}	DN_{max}	DN_{mean}	DN_{median}	DN_{mode}	σ^2	σ
X_{HH}/L_{HH}	1	1	37	4,027	3	3	13,587	3,686
X_{HH}/L_{HV}	2	1	57	5,542	4	2	16,950	4,117
X_{HH}/L_{VV}	3	1	72	4,866	4	3	19,263	4,389
X_{HH}/P_{HH}	4	1	27	3,870	3	2	11,479	3,388
L_{HH}/L_{HV}	5	1	50	5,780	5	6	15,777	3,972
L_{HH}/L_{VV}	6	1	41	3,960	4	4	5,827	2,414
L_{HH}/P_{HH}	7	1	88	5,730	4	4	34,246	**5,852**
L_{HV}/L_{VV}	8	1	56	4,859	4	2	17,447	4,177
L_{HV}/P_{HH}	9	1	17	1,892	1	1	2,223	1,491
L_{VV}/P_{HH}	10	1	101	4,556	3	3	37,823	**6,150**

Die Ratiobildungen aus den E-SAR-Daten aller Befliegungskampagnen zeichnen sich durch eine durchschnittlich hohe Helligkeit und Kontrastreichtum aus. Vergleicht man den durchschnittlichen Kontrastreichtum der Ratiobildungen mit dem Kontrastreichtum der originalen Kanäle, so wird ein deutlich geringerer Kontrastreichtum in den Ratiobildungen deutlich.

Das Ratio aus der vertikalen Polarisation des L-Bands und der horizontalen Polarisation des P-Bands zeichnet sich allgemein durch hohe Werte aus.

Die statistische Auswertung der Korrelationskoeffizienten (Tab. 5.15 – 5.18) zeigt für die Ratios, in denen die horizontale Polarisation des X-Bands sowie des P-Bands mit einer L-Band-Polarisation kombiniert sind, durchgängig niedrige Korrelationen ($r_{0401} < 0{,}297$, $r_{0801} < 0{,}304$, $r_{0402} < 0{,}343$, $r_{0802} < 0{,}221$), was eine Kombination dieser Kanalgruppen für Farbdarstellungen im RGB-System überordnet. Lediglich das Ratio X_{HH}/P_{HH} zeigt eine hohe Korrelation mit Ratiobildungen aus P_{HH} ($r_{0401} < 0{,}622$, $r_{0801} < 0{,}682$, $r_{0402} < 0{,}673$, $r_{0802} < 0{,}620$).

Die Ratiobildungen aus dem multipolarisierten L-Band weisen ebenfalls eine niedrige bis mittelhohe Korrelation untereinander auf ($r < 0{,}202$). Auch sie sind für eine Farbdarstellung im RGB-System gut geeignet. Eine Ausnahme bilden die Ratiobildungen aus L_{HV}/L_{VV} zu den übrigen Ratios aus den L-Band Polarisationen. Diese Kombination der Ratiobildungen ist durchweg durch mittelhohe Korrelationskoeffizienten gekennzeichnet ($r_{0401} = 0{,}529$; $r_{0801} = 0{,}601$; $r_{0402} = 0{,}613$; $r_{0802} = 0{,}573$).

Die übrigen Ratiobildungen sind durch mittelhohe bis hohe Korrelationskoeffizienten geprägt.

Tab. 5.15: Korrelationskoeffizient der Ratiobildungen (April 2001).

E-SAR Ratios (April 2001)

Ratio	X_{HH}/L_{HH}	X_{HH}/L_{HV}	X_{HH}/L_{VV}	X_{HH}/P_{HH}	L_{HH}/L_{HV}	L_{HH}/L_{VV}	L_{HH}/P_{HH}	L_{HV}/L_{VV}	L_{HV}/P_{HH}	L_{VV}/P_{HH}
X_{HH}/L_{HH}	1	0,497	0,642	0,483	-0,276	-0,293	-0,182	0,047	0,045	**-0,022**
X_{HH}/L_{HV}	0,497	1	0,452	0,490	0,503	-0,112	0,061	-0,445	-0,297	0,084
X_{HH}/L_{VV}	0,642	0,452	1	0,418	-0,122	0,331	-0,081	0,380	0,024	-0,212
X_{HH}/P_{HH}	0,483	0,490	0,418	1	0,029	-0,117	0,597	-0,118	0,550	0,622
L_{HH}/L_{HV}	-0,276	0,503	-0,122	0,029	1	0,202	0,320	-0,529	-0,361	0,150
L_{HH}/L_{VV}	-0,293	-0,112	0,331	-0,117	0,202	1	0,122	0,496	-0,025	-0,296
L_{HH}/P_{HH}	-0,182	0,061	-0,081	0,597	0,320	0,122	1	-0,171	0,629	0,824
L_{HV}/L_{VV}	0,047	-0,445	0,380	-0,118	-0,529	0,496	-0,171	1	0,298	-0,325
L_{HV}/P_{HH}	0,045	-0,297	0,024	0,550	-0,361	-0,025	0,629	0,298	1	0,629
L_{VV}/P_{HH}	**-0,022**	0,084	-0,212	0,622	0,150	-0,296	0,824	-0,325	0,629	1

Tab. 5.16: Korrelationskoeffizient der Ratiobildungen (August 2001).

E-SAR Ratios (August 2001)

Ratio	X_{HH}/L_{HH}	X_{HH}/L_{HV}	X_{HH}/L_{VV}	X_{HH}/P_{HH}	L_{HH}/L_{HV}	L_{HH}/L_{VV}	L_{HH}/P_{HH}	L_{HV}/L_{VV}	L_{HV}/P_{HH}	L_{VV}/P_{HH}
X_{HH}/L_{HH}	1	0,497	0,659	0,449	-0,173	-0,273	-0,151	-0,006	**0,002**	-0,016
X_{HH}/L_{HV}	0,497	1	0,448	0,474	0,625	-0,145	0,099	-0,501	-0,304	0,136
X_{HH}/L_{VV}	0,659	0,448	1	0,387	-0,072	0,342	-0,080	0,308	0,007	-0,210
X_{HH}/P_{HH}	0,449	0,474	0,387	1	0,152	-0,114	0,679	-0,151	0,518	0,682
L_{HH}/L_{HV}	-0,173	0,625	-0,072	0,152	1	0,077	0,335	-0,601	-0,337	0,244
L_{HH}/L_{VV}	-0,273	-0,145	0,342	-0,114	0,077	1	0,078	0,525	0,030	-0,314
L_{HH}/P_{HH}	-0,151	0,099	-0,080	0,679	0,335	0,078	1	-0,179	0,605	0,850
L_{HV}/L_{VV}	-0,006	-0,501	0,308	-0,151	-0,601	0,525	-0,179	1	0,356	-0,343
L_{HV}/P_{HH}	**0,002**	-0,304	0,007	0,518	-0,337	0,030	0,605	0,356	1	0,548
L_{VV}/P_{HH}	-0,016	0,136	-0,210	0,682	0,244	-0,314	0,850	-0,343	0,548	1

Tab. 5.17: Korrelationskoeffizient der Ratiobildungen (April 2002).

E-SAR Ratios (April 2002)

Ratio	X_{HH}/L_{HH}	X_{HH}/L_{HV}	X_{HH}/L_{VV}	X_{HH}/P_{HH}	L_{HH}/L_{HV}	L_{HH}/L_{VV}	L_{HH}/P_{HH}	L_{HV}/L_{VV}	L_{HV}/P_{HH}	L_{VV}/P_{HH}
X_{HH}/L_{HH}	1	0,512	0,718	0,451	-0,202	-0,296	-0,227	-0,043	-0,040	-0,050
X_{HH}/L_{HV}	0,512	1	0,436	0,513	0,569	-0,241	0,031	-0,552	-0,343	0,157
X_{HH}/L_{VV}	0,718	0,436	1	0,419	-0,133	0,223	-0,124	0,227	**0,002**	-0,192
X_{HH}/P_{HH}	0,451	0,513	0,419	1	0,145	-0,153	0,608	-0,238	0,470	0,673
L_{HH}/L_{HV}	-0,202	0,569	-0,133	0,145	1	0,016	0,335	-0,613	-0,355	0,278
L_{HH}/L_{VV}	-0,296	-0,241	0,223	-0,153	0,016	1	0,106	0,557	0,066	-0,306
L_{HH}/P_{HH}	-0,227	0,031	-0,124	0,608	0,335	0,106	1	-0,185	0,627	0,840
L_{HV}/L_{VV}	-0,043	-0,552	0,227	-0,238	-0,613	0,557	-0,185	1	0,326	-0,383
L_{HV}/P_{HH}	-0,040	-0,343	**0,002**	0,470	-0,355	0,066	0,627	0,326	1	0,545
L_{VV}/P_{HH}	-0,050	0,157	-0,192	0,673	0,278	-0,306	0,840	-0,383	0,545	1

Tab. 5.18: Korrelationskoeffizient der Ratiobildungen (August 2002).

E-SAR Ratios (August 2002)

Ratio	X_{HH}/L_{HH}	X_{HH}/L_{HV}	X_{HH}/L_{VV}	X_{HH}/P_{HH}	L_{HH}/L_{HV}	L_{HH}/L_{VV}	L_{HH}/P_{HH}	L_{HV}/L_{VV}	L_{HV}/P_{HH}	L_{VV}/P_{HH}
X_{HH}/L_{HH}	1	0,586	0,654	0,490	-0,195	-0,242	-0,183	**-0,003**	-0,040	-0,023
X_{HH}/L_{HV}	0,586	1	0,490	0,658	0,530	-0,109	0,163	-0,446	-0,219	0,221
X_{HH}/L_{VV}	0,654	0,490	1	0,429	-0,073	0,403	-0,069	0,358	-0,010	-0,205
X_{HH}/P_{HH}	0,490	0,658	0,429	1	0,260	-0,061	0,618	-0,203	0,448	0,620
L_{HH}/L_{HV}	-0,195	0,530	-0,073	0,260	1	0,137	0,475	-0,573	-0,231	0,348
L_{HH}/L_{VV}	-0,242	-0,109	0,403	-0,061	0,137	1	0,136	0,548	0,045	-0,297
L_{HH}/P_{HH}	-0,183	0,163	-0,069	0,618	0,475	0,136	1	-0,210	0,626	0,818
L_{HV}/L_{VV}	**-0,003**	-0,446	0,358	-0,203	-0,573	0,548	-0,210	1	0,269	-0,407
L_{HV}/P_{HH}	-0,040	-0,219	-0,010	0,448	-0,231	0,045	0,626	0,269	1	0,543
L_{VV}/P_{HH}	-0,023	0,221	-0,205	0,620	0,348	-0,297	0,818	-0,407	0,543	1

Aus den Standardabweichungen und den Korrelationskoeffizienten der Ratiobildungen wurde der OIF-Faktor berechnet. Die ersten vier OIF-Ränge für die vier Befliegungskampagnen sind in Tab. 5.19 und Tab. 5.20 dargestellt. In Anhang A sind die weiteren OIF-Ränge aufgeführt.

Die errechneten Werte fanden bei der Auswahl geeigneter Farbkompositen zur visuellen Interpretation und Klassifikation Berücksichtigung.

Tab. 5.19: Die ersten vier OIF-Ränge der Ratiobildungen für 2001.

E-SAR Ratio April 2001	
Ratiokombinationen	**OIF-Wert**
[L_{HH}/L_{HV}, L_{HH}/L_{VV}, L_{VV}/P_{HH}]	244,675
[X_{HH}/L_{HV}, L_{HH}/L_{VV}, L_{HV}/L_{VV}]	184,150
[X_{HH}/L_{HV}, X_{HH}/P_{HH}, L_{HV}/L_{VV}]	178,149
[X_{HH}/L_{HH}, X_{HH}/P_{HH}, L_{HH}/L_{VV}]	167,688

E-SAR Ratio August 2001	
Ratiokombinationen	**OIF-Wert**
[L_{HH}/L_{HV}, L_{HH}/L_{VV}, L_{HV}/L_{VV}]	32542,826
[L_{HH}/L_{HV}, L_{HH}/L_{VV}, L_{VV}/P_{HH}]	2215,494
[X_{HH}/L_{HH}, X_{HH}/L_{HV}, L_{HV}/L_{VV}]	1362,568
[X_{HH}/L_{HH}, L_{HH}/L_{HV}, L_{HV}/L_{VV}]	1307,307

Tab. 5.20: Die ersten vier OIF-Ränge der Ratiobildungen für 2002.

E-SAR Ratio April 2002	
Ratiokombinationen	**OIF-Wert**
[X_{HH}/L_{HH}, X_{HH}/P_{HH}, L_{HH}/L_{VV}]	7982,110
[X_{HH}/P_{HH}, L_{HH}/L_{HV}, L_{HH}/L_{VV}]	1520,174
[L_{HH}/L_{HV}, L_{HH}/L_{VV}, L_{VV}/P_{HH}]	1215,105
[X_{HH}/L_{HH}, L_{HH}/L_{HV}, L_{VV}/P_{HH}]	726,533

E-SAR Ratio August 2002	
Ratiokombinationen	**OIF-Wert**
[X_{HH}/L_{HV}, L_{HH}/L_{VV}, L_{HV}/L_{VV}]	1568,857
[X_{HH}/P_{HH}, L_{HV}/L_{VV}, L_{VV}/P_{HH}]	1359,607
[X_{HH}/L_{HV}, X_{HH}/P_{HH}, L_{HV}/L_{VV}]	1275,967
[X_{HH}/L_{VV}, L_{HH}/L_{HV}, L_{VV}/P_{HH}]	205,126

In Abbildung 5.7a bis 5.7d ist die Ratiokombination [L_{HH}/L_{HV}, L_{HH}/L_{VV}, L_{VV}/P_{HH}], die in allen Befliegungskampagnen einen hohen OIF-Rang belegt, für ein Testgebiet südwestlich von Manschnow dargestellt. Es zeigt sich, dass die Ratiokombinationen stark von der Vegetationsbedeckung zu den jeweiligen Befliegungskampagnen beeinflusst werden. Mögliche Gewässerstrukturen lassen sich nicht durchgehend anhand eines guten OIF-Rang in den Ratiobildungen lokalisieren. Eine visuelle Prüfung der Ratiobildungen auf ihre Eignung relevante Strukturen hervorzuheben, die auf ehemalige Flussarme schließen lassen, wird somit notwendig.

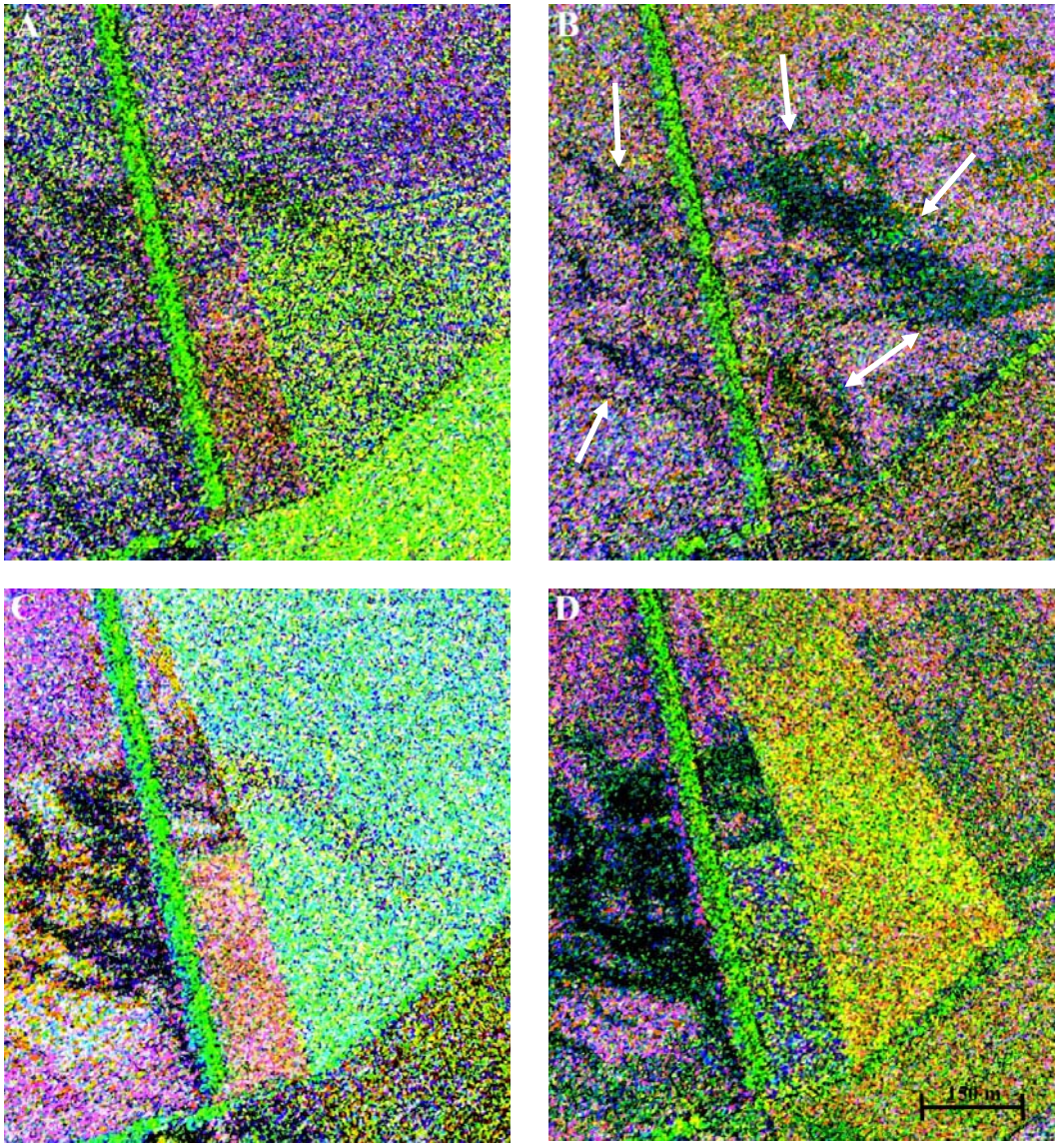


Abb. 5.7: Farbkompositen aus der Ratiokombination [L_{HH}/L_{HV}, L_{HH}/L_{VV}, L_{VV}/P_{HH}] südwestlich von Manschnow. A) April 2001. B) August 2001. C) April 2002. D) August 2002. Die weißen Pfeile kennzeichnen lokalisierte Gewässerstrukturen.

5.2.3.5 Kontrastverbesserung

Zur Kontrastverbesserung der Einzelkanäle werden Streckungsoperationen an den Grauwertverteilungen der Kanäle durchgeführt. Hierbei wird die ursprüngliche Grauwertverteilung, die zumeist nicht die gesamte Skala von 0 bis 255 (für 8bit-Daten) abdeckt, durch definierte mathematische Funktionen (*look-up-tables*) in neue Grauwerte transformiert. Auf diese Weise wird die ursprüngliche Grauwertverteilung gestreckt. Die Übertragungsfunktion kann linear, abschnittsweise definiert, exponentiell oder logarithmisch gewählt werden, um spezielle Grauwertbereiche hervorzuheben oder zu unterdrücken.

Die Kontrastverbesserung an den E-SAR-Daten wurde mit einem im

Bildverarbeitungsprogramm ERDAS Imagine für 8bit-Daten implementierten Streckungsverfahren durchgeführt. Dabei werden alle Grauwerte, die im Merkmalsraum zwischen $DN_{mean} + 2\sigma$ und $DN_{mean} - 2\sigma$ streuen, durch eine lineare Funktion in Ausgabewerte transformiert. Auf diese Weise werden bei einer Gauß'schen Normalverteilung annähernd 95% der Grauwerte auf die mögliche Skala von 0 bis 255 gestreckt (ERDAS 1998).

5.2.3.6 Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse (HKA) erzeugt einen synthetischen Sekundärdatensatz, der die Reflexion aller Kanäle enthält, und ermöglicht, übergeordnete Rückstreuvariabilitätsmuster aus verschiedenen Kanälen abzuleiten. Mit Hilfe der Hauptkomponententransformation wird die Datenredundanz in stark korrelierten multifrequenten und multipolarimetrischen Radar-Datensätzen reduziert. Sie beruht auf statistischen Verfahren wie Standardabweichungen, Kovarianzmatrizen oder Eigenvektoren. Dabei können beliebig viele Kanäle miteinander verknüpft werden. Die höherwertigen Hauptkomponenten zeigen dabei eine Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses sowie weiterer radiometrischer Effekte (z.B. geringeres Speckle) und eignen sich deshalb besonders für quantitative Auswerteverfahren.

Die Verfahrensweise kann graphisch nach DRURY (1993) am Beispiel der Grauwertverteilung zweier Kanäle erläutert werden (Abb. 5.8). In einem von zwei Kanälen aufgespannten Merkmalsraum streuen die Grauwerte gering entlang einer linear durch den Ursprung verlaufenden Geraden, was auf eine hohe Korrelation der Kanäle hinweist. Zunächst wird der Ursprung des Koordinatensystems durch Verschieben der Achsen an den Punkt versetzt, an dem die Mittelwerte der beiden Kanäle definiert sind. Anschließend werden die Achsen an diesem Punkt rotiert, so dass sie mit der breitesten Streuung der Pixelwolke zusammenfallen. Die neu definierten Achsen stellen die erste bzw. zweite Hauptkomponente (HK) des Datensatzes dar. Die Grauwerte werden senkrecht auf die Hauptkomponente projiziert und auf diese Weise in dekorrelierte, neue Grauwerte überführt.

Die HKA kann analog auch für einen n-dimensionalen Raum durchgeführt werden, wobei aus den Ursprungsdaten n neu definierte HK errechnet werden. Hauptkomponenten höherer Ordnung erfassen dabei zunehmend geringere Streuungsunterschiede, die vor allem durch sensorbedingte Störungen (z.B. Rauschen) entstehen.

Die Anzahl der Hauptkomponenten entspricht der Anzahl der Originalkanäle, wobei die wichtigsten Bildinhalte hauptsächlich in den ersten Hauptkomponenten auftreten. Höhere HK sind durch einen geringeren Informationsgehalt und durch stärkeres Rauschen geprägt.

Diese neu generierten Datensätze besitzen infolge geringerer Redundanz eine höhere Informationsdichte und stellen eine wertvolle Ergänzung der Originalkanäle bzw. Kanalverknüpfungen dar.

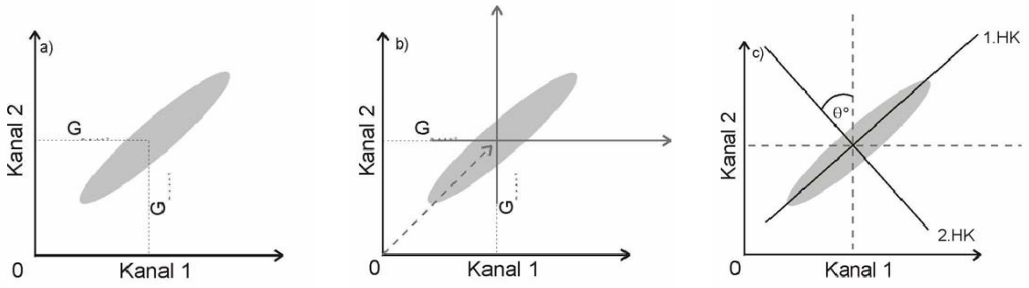


Abb. 5.8: Prinzip der Hauptkomponententransformation (nach DRURY 1993). A) Grauwertverteilung zweier hoch korrelierter Kanäle im zweidimensionalen Merkmalsraum. B) Translation des Achsenursprungs zum Mittelwert beider Kanäle. C) Rotation des Achsenkreuzes parallel zur maximalen Ausdehnung der Pixelwolke.

Da die Rückstreuungsintensitäten des kurzwelligen X-Bands aufgrund der dominierenden Oberflächenstreuung kaum Informationen über den Oberboden beinhalten, wurde bei der Hauptkomponentenanalyse auf diese Frequenz verzichtet. Wegen des verhältnismäßig hohen Störanteils in der horizontalen Polarisation des langwelligen P-Bands wurde ebenfalls auf diesen Kanal bei der HKA verzichtet. Die Abb. 5.9 zeigt die vier HK aus den multipolarisierten L-Band-Daten. Nach visuellen Kriterien erweist sich die 1. Hauptkomponente aus den L-Band-Daten als nützlich für die weitere Analyse der Bilddaten. Sie gibt am Besten die Rückstreueigenschaften des Oberbodens wieder. Sie weist deutlich mäanderähnliche Strukturen auf, die nicht auf die landwirtschaftliche Nutzung zurückzuführen sind. Die blauen Pfeile weisen auf vermutete Mäanderstrukturen mit den entsprechend assoziierten Sedimentablagerungen (Uferwall-Sande, Altarm-Mudden) hin. Die zweite und dritte HK scheinen vorwiegend durch die Vegetation und damit vom Pflanzenwassergehalt beeinflusst zu werden. Sie spiegeln kaum Informationen über den Oberboden wider. Die vierte HK weist die geringsten Streuungsunterschiede auf. Sie sind vor allem durch sensorbedingte Störungen (z.B. Rauschen) entstanden.

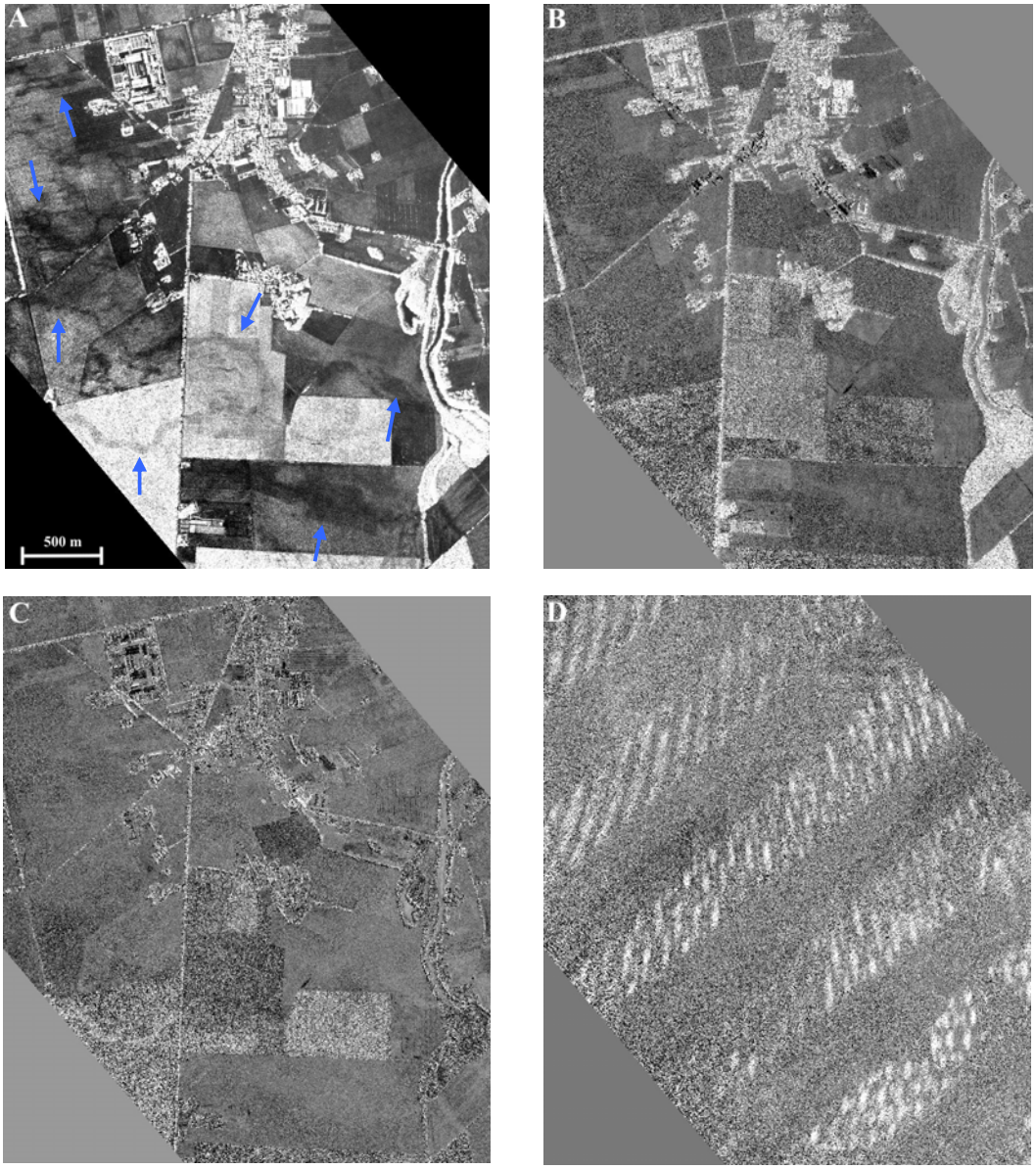


Abb. 5.9: **Hauptkomponenten 1 (A) bis 4 (D) aus den multipolarisierten L-Band-Daten (August 2001) bei Manschnow. Die blauen Pfeile weisen auf vermutete Altarmstrukturen hin.**

Die Ergebnisse der visuellen Interpretation der Hauptkomponenten wird durch die statistische Auswertung in Tabelle 5.21 gestützt. Sie fasst die Eigenschaften der ermittelten Hauptkomponenten (HK) zusammen. Die 1. HK zeichnet sich durch eine hohe Korrelation mit allen L-Band-Polarisationen aus (r > 0,779). Sie vereint den Informationsgehalt aller Polarisationen zu einem hohen Grad. Die 2. und 3. HK zeigen eine mittelhohe Korrelation zu den Kreuzpolarisationen und eine niedrige Korrelation zu HH und VV. Diese Hauptkomponenten sind offensichtlich von den Vegetationseigenschaften geprägt. Die vierte HK weist niedrige Korrelationen zu allen Polarisationen auf und weist damit nur einen geringen Zusammenhang zu den L-Band Polarisationen auf.

Tab. 5.21: Korrelationskoeffizienten der vier Hauptkomponenten und der L-Band Polarisationen.

E-SAR Hauptkomponenten (April 2001)

Kanal	L_{HH}	L_{HV}	L_{VH}	L_{VV}
L_{HK1}	**0,971**	**0,855**	**0,860**	**0,939**
L_{HK2}	-0,060	0,562	0,558	0,168
L_{HK3}	-0,088	-0,012	-0,025	-0,528
L_{HK4}	0,153	0,059	0,245	0,185

E-SAR Hauptkomponenten (August 2001)

Kanal	L_{HH}	L_{HV}	L_{VH}	L_{VV}
L_{HK1}	**0,965**	**0,890**	**0,892**	**0,940**
L_{HK2}	-0,236	0,343	0,337	-0,264
L_{HK3}	-0,168	-0,295	-0,300	-0,593
L_{HK4}	0,119	0,038	0,178	0,129

E-SAR Hauptkomponenten (April 2002)

Kanal	L_{HH}	L_{HV}	L_{VH}	L_{VV}
L_{HK1}	**0,977**	**0,872**	**0,786**	**0,939**
L_{HK2}	-0,283	0,201	0,424	-0,312
L_{HK3}	-0,314	-0,322	-0,346	-0,696
L_{HK4}	0,150	-0,258	0,319	0,154

E-SAR Hauptkomponenten (August 2002)

Kanal	L_{HH}	L_{HV}	L_{VH}	L_{VV}
L_{HK1}	**0,959**	**0,856**	**0,779**	**0,943**
L_{HK2}	0,031	0,410	0,570	-0,178
L_{HK3}	-0,091	-0,320	-0,429	-0,500
L_{HK4}	0,072	-0,315	0,278	0,059

Die Hauptkomponentenanalyse erfolgt ausgehend von der Varianz-Kovarianz-Matrix eines Datensatzes durch die Berechnung von Eigenvektoren und Eigenwerten der HK. Die Eigenvektoren beschreiben dabei die Projektion der ursprünglichen Koordinatenachsen auf das HK-Achsensystem. Somit lässt sich der Anteil der E-SAR-Kanäle an einer Hauptkomponente durch die Ladung und den Wert ihrer jeweiligen Eigenvektoren abschätzen. In einer Hauptkomponente, deren Eigenvektoren in einem Kanal einen hohen positiven, im anderen einen stark negativen Wert aufweisen, drücken sich vorwiegend Unterschiede in der Rückstreuung innerhalb dieser beiden Kanäle aus. Der Kontrastreichtum der HK wird durch die aus den Varianzen der Originalkanäle errechneten Eigenwerte angegeben.

In Tab. 5.22 sind die Eigenvektoren (EV) und die Eigenwerte der Hauptkomponenten aufgeführt. Die 1.HK der aus den L-Band-Polarisationen aller Befliegungskampagnen beinhaltet insbesondere Unterschiede zwischen der horizontalen Polarisation und der Kreuzpolarisation HV, während die 2.HK Variationen zwischen der Kreuzpolarisation HV und der vertikalen

Polarisation enthält. Die 3.HK weist für jede Befliegungskampagne unterschiedliche Hauptkomponentenkombinationen mit der größten Variation aus. Die 4.HK wurde aufgrund der starken Störungen (Abb. 5.9d) nicht weiter berücksichtigt.

Tab. 5.22: Eigenvektoren (EV) und Eigenwerte der Hauptkomponenten (HK) aus den E-SAR-Daten 2001 und 2002. Maximale Differenzen der Eigenvektoren sind fett hervorgehoben.

E-SAR Hauptkomponenten (April 2001)

Kanal	L_{EV1}	L_{EV2}	L_{EV3}	L_{EV4}	Eigenwert
L_{HK1}	**0,766**	**-0,497**	0,408	0,001	151,510
L_{HK2}	0,262	**0,618**	0,263	**-0,693**	15,870
L_{HK3}	**0,250**	0,595	0,254	**0,721**	14,365
L_{HK4}	0,531	0,133	-0,837	0,001	0,407

E-SAR Hauptkomponenten (August 2001)

Kanal	L_{EV1}	L_{EV2}	L_{EV3}	L_{EV4}	Eigenwert
L_{HK1}	**0,711**	**-0,336**	0,617	0,001	87,105
L_{HK2}	0,340	**0,637**	-0,044	**-0,691**	13,318
L_{HK3}	0,322	0,609	**-0,041**	**0,723**	9,061
L_{HK4}	0,524	-0,332	-0,784	0,002	0,219

E-SAR Hauptkomponenten (April 2002)

Kanal	L_{EV1}	L_{EV2}	L_{EV3}	L_{EV4}	Eigenwert
L_{HK1}	**0,730**	**-0,361**	0,560	0,155	125,392
L_{HK2}	0,380	**0,432**	0,010	**-0,817**	20,913
L_{HK3}	0,313	**0,770**	**-0,065**	0,552	9,280
L_{HK4}	0,474	-0,300	-0,826	0,052	7,300

E-SAR Hauptkomponenten (August 2002)

Kanal	L_{EV1}	L_{EV2}	L_{EV3}	L_{EV4}	Eigenwert
L_{HK1}	**0,716**	**-0,018**	0,685	0,131	67,303
L_{HK2}	0,303	**0,482**	-0,149	**-0,808**	11,426
L_{HK3}	**0,232**	**0,711**	-0,334	0,573	8,163
L_{HK4}	0,584	-0,511	-0,630	0,030	3,867

5.2.3.7 Addition

Durch die Addition von multifrequenten E-SAR-Daten und ihrer Polarisationen können die Verhältnisse zwischen Oberflächenkategorien mit durchgehend hohem Reflexionsverhalten sowie Oberflächenkategorien mit allgemein niedriger Rückstreuintensitäten verstärkt werden. Die Basis der Additionsfunktion bildet Gl. 5.10:

$$DN_{add} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{n} DN_i \qquad \text{(Gl. 5.10)}$$

mit DN_i = Grauwert im E-SAR-Kanal i

n = Anzahl der E-SAR-Kanäle

DN_{add} = Grauwert des Additionsbildes

Ein Additionsbild hebt insbesondere die mäanderähnlichen Strukturen hervor, die auf einen Substratwechsel im Untergrund hindeuten. Je mehr Kanäle aus den E-SAR-Daten miteinander addiert werden, desto höher wird der Kontrast zwischen den Bereichen, in denen die Oberflächenreflexion dominiert, und den Bereichen, in denen die Volumenstreuung vorherrscht.

In Abb. 5.10 ist exemplarisch eine sukzessive Addition der multifrequenten E-SAR Bänder und ihrer Polarisationen der Befliegungskampagne August 2001 dargestellt. Die roten Pfeile weisen auf die vermuteten Relikte alter Oderarme hin.

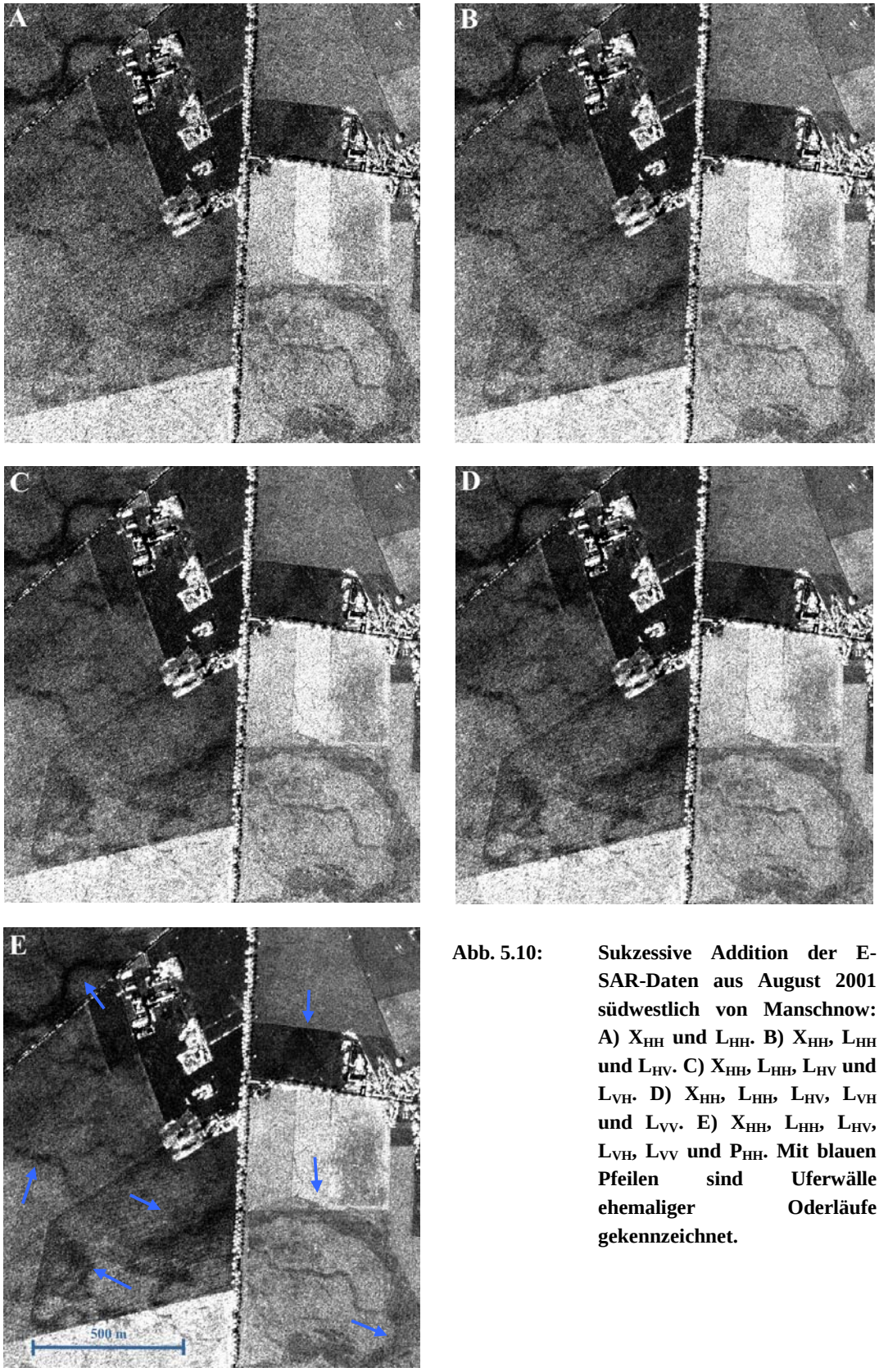


Abb. 5.10: **Sukzessive Addition der E-SAR-Daten aus August 2001 südwestlich von Manschnow: A) X_{HH} und L_{HH}. B) X_{HH}, L_{HH} und L_{HV}. C) X_{HH}, L_{HH}, L_{HV} und L_{VH}. D) X_{HH}, L_{HH}, L_{HV}, L_{VH} und L_{VV}. E) X_{HH}, L_{HH}, L_{HV}, L_{VH}, L_{VV} und P_{HH}. Mit blauen Pfeilen sind Uferwälle ehemaliger Oderläufe gekennzeichnet.**

5.2.3.8 Speckle Reduktion

Zusätzlich zu den Methoden, die bereits bei der Multi-Look-Prozessierung von SAR-Daten zu einer Minimierung des Speckle führen, werden in der Praxis häufig Filtertechniken angewendet, um zu einer weiteren Reduzierung der körnigen Bildstruktur zu gelangen. Bei diesen Verfahren konkurrieren je nach Filtergröße und Methodik räumliche Auflösung und Speckle-Verringerung. Insbesondere bei einer groben Filterung ist eine Unschärfe an Kanten, Linearen und punkthaften Strukturen als eine problematische Folge von Filterverfahren zu sehen (KLENKE 1999).

Die räumliche Filterung eines Datensatzes erfolgt nach dem Moving-Window-Verfahren: Eine quadratische Filtermatrix wandert über jedes Pixel des Ausgangsbildes (Abb. 5.11), wobei die benachbarten Pixelwerte mit dem zentralen Pixelwert verknüpft werden. Der neu errechnete Wert wird dem Zentralpixel zugeordnet.

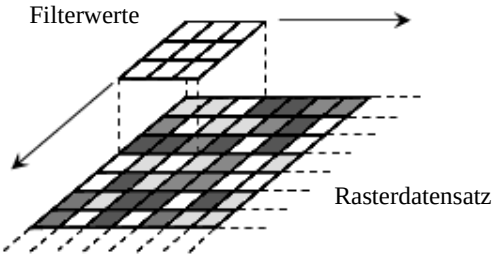


Abb. 5.11: Prinzip des Moving-Window-Verfahren für Rasterdaten.

Auf dem Moving-Window-Verfahren basierende Filteroperationen finden in der Bildverarbeitung nicht nur zur Unterdrückung störender oder nicht relevanter Einzelinformationen Verwendung (Tiefpassfilterung), sondern dienen auch der Hervorhebung von linearen Strukturen im Bild (z.B. Hochpassfilterung mit Laplace-Filtern zur Kantenverstärkung).

Um den Speckle-Effekt in den E-SAR-Daten zu reduzieren, kamen verschiedene Filterverfahren mit unterschiedlichen Fenstergrößen (3x3, 5x5 und 7x7) zum Einsatz. Die Ergebnisse nach Anwendung eines Lee-Filters (LEE 1981; LOPES et al. 1990) mit einer quadratischen Filtermatrix von 3x3 und 5x5 führte zu einer Minderung des Speckle-Rauschens mit einhergehendem Verlust an räumlicher Detailinformation (Abb. 5.12b u. c). Ein vergleichbares Ergebnis erzielte die Verwendung des Local-Region-Filter (NAGAO & TAKASHI 1978) mit einer quadratischen Filtermatrix von 7x7 (Abb. 5.12d). Die beste visuelle Bildverbesserung ergab eine iterative Filterung mit dem Frost-Filter (FROST et al. 1982; BÄHR & VÖGTLE 1998) mit einer Fenstergröße von 7x7 (Abb. 5.12e). Diese Filterung führte zu einer Verminderung der körnigen Bildstruktur bei gleichzeitiger Erhaltung von Kanten und Linearen sowie punktueller Strukturen. Insgesamt wirkt das Speckle-gefilterte Bild jedoch etwas unschärfer, was auch beim Frost-Filter auf einen gewissen Verlust an räumlicher Detailinformation hinweist.

Grundlegend für den Filteralgorithmus ist die Berechnung des Variationskoeffizienten (σ):

$$\sigma = \frac{\sqrt{Varianz}}{Mittelwert} \qquad \text{(Gl. 5.11)}$$

Der theoretisch zu erwartende Variationskoeffizient beträgt nach LEE (1981) im Falle eines mit drei Looks prozessierten Bildes 0.26. Die neuen Pixelwerte werden folgendermaßen berechnet:

$$DN_{out} = (Mean) + K(DN_{in} - Mean) \qquad \text{(Gl. 5.12)}$$

mit DN_{out} als Ausgabewert des Pixels; *Mean* dem Mittelwert innerhalb des Fensters und DN_{in} als Eingabewert des Pixels und

$$K = \frac{Var(x)}{(DN_{mean})^2 \sigma^2 + Var(x)} \qquad \text{(Gl. 5.13)}$$

Var (x) berechnet sich aus:

$$Var(x) = \left(\frac{Var_{window} + (Mean_{window})^2}{\sigma^2 + 1} \right) - (Mean_{window})^2 \qquad \text{(Gl. 5.14)}$$

mit Var_{window} als Varianz im Fensterbereich und $Mean_{window}$ als Mittelwert im Fensterbereich.

Exemplarisch sind die Resultate aus der Speckle-Filterung der E-SAR-Daten in Abbildung 5.12 dargestellt.

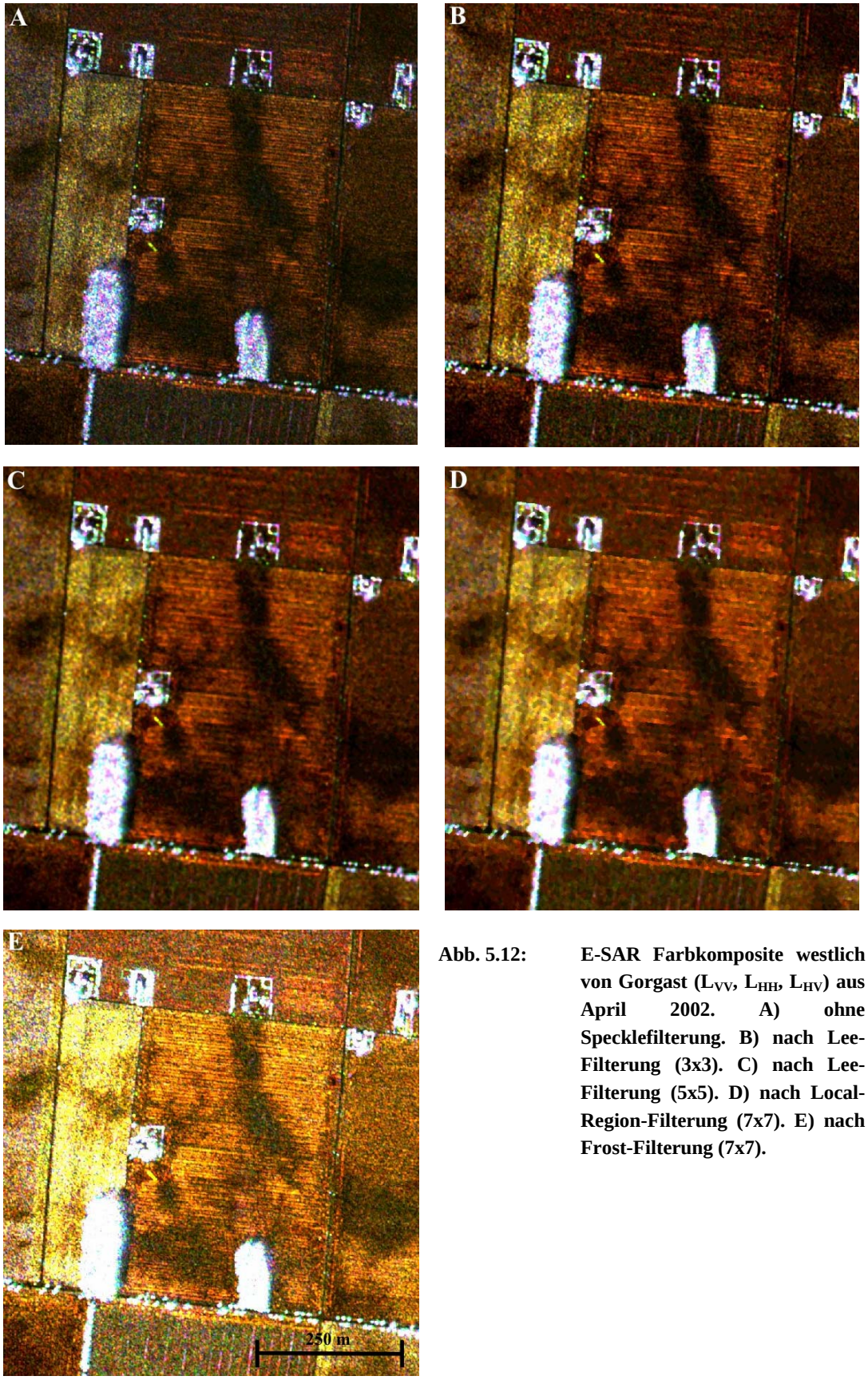


Abb. 5.12: **E-SAR Farbkomposite westlich von Gorgast (L_{VV}, L_{HH}, L_{HV}) aus April 2002. A) ohne Specklefilterung. B) nach Lee-Filterung (3x3). C) nach Lee-Filterung (5x5). D) nach Local-Region-Filterung (7x7). E) nach Frost-Filterung (7x7).**

5.2.3.9 PAULI-Dekomposition

Polarimetrische Daten enthalten Informationen über die in einem Auflösungselement vorhandenen Streumechanismen. Die Analyse der [S]-Matrix ermöglicht die Unterscheidung der Streumechanismen und die Ableitung von Streueigenschaften der aufgenommenen Geländeoberfläche.

Emittierte und empfangene Radarsignale bestimmter Polarisation werden jeweils durch einen Vektor dargestellt (Kap. 3.1.3.1.2). Die lineare Transformation zwischen beiden Systemen erfolgt mit einer 2x2-Transformationsmatrix, welche alle Informationen über den Streuprozess enthält. Nach Beseitigung von Fehlereinflüssen entlang des Wellenausbreitungsweges beschreibt die Matrix die Streuung am Objekt. Demnach können Informationen über die Streuung durch eine Analyse der Transformationsmatrix gewonnen werden. In der Radarfernerkundung findet häufig die Jones-Matrix bzw. [S]-Matrix (Sinclair / Scattering Matrix) für die Vektordarstellung verwendet (HELLMANN 2000).

Die Darstellung einer polarisierten Welle mittels Stokes-Vektor bzw. Jones-Vektor (vierdimensionaler Vektor mit reellwertigen Elementen) ermöglicht die vektorielle Beschreibung ebener, polarisierter Wellen mit Amplitude A, Phase φ, Orientierung ψ und Elliptizität χ der Polarisation.

Das ausgesendete und empfangene elektromagnetische Feld in einem Radar-System kann mit dem Jones-Vektor wie folgt beschrieben werden:

$$\vec{E}^{trans} = \vec{h}E_h^{trans} + \vec{v}E_v^{trans} \qquad \text{(Gl. 5.15)}$$

$$\vec{E}^{re} = \vec{h}E_h^{re} + \vec{v}E_v^{re} \qquad \text{(Gl. 5.16)}$$

Die Beschreibung des Rückstreuprozesses erfolgt durch eine lineare Transformation mit der Jones-Matrix bzw. Sinclair- oder [S]-Matrix:

$$\vec{E}^{re} = [S]E^{trans} = \frac{e^{i\varphi_0 r}}{r}\begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} E_H^{trans} \\ E_V^{trans} \end{bmatrix} \qquad \text{(Gl. 5.17)}$$

Es handelt es sich um eine 2x2 komplexe Matrix, welche die Information über die Streuung enthält. Die Elemente von [S] enthalten die vier komplexen Rückstreuungen, die sich jeweils aus den Amplituden $|S_{ij}|$ und den Phasen φ_{ij} der verschiedenen Polarisationen zusammensetzen:

$$S_{ij} = |S_{ij}|e^{i\varphi_{ij}} \qquad \text{(Gl. 5.18)}$$

mit $\quad i, j \in \{H, V\}$

Für statische bzw. reziproke SAR-Systeme, bei denen sich Sender und Empfänger an derselben Position befinden, sind die Terme der Kreuzpolarisationen identisch:

$$S_{HV} = S_{VH} \equiv S_X.$$

Dadurch reduziert sich die Anzahl der unabhängigen Messwerte der [S]-Matrix auf 3 Amplituden und 3 Phasen. Aufgrund der Phasenmehrdeutigkeit (*Ambiguity*) der absoluten Phase

muss eine Phase als Referenz definiert werden, wodurch sich die Anzahl der unabhängigen Parameter auf insgesamt 5 verringert.

$$[S] = e^{i\varphi_0} \begin{bmatrix} |S_{HH}| & |S_X| e^{i(\varphi_X - \varphi_0)} \\ |S_X| e^{i(\varphi_X \varphi_0)} & |S_{VV}| e^{i(\varphi_{VV} - \varphi_0)} \end{bmatrix} \qquad \text{(Gl. 5.19)}$$

Die gewählte Polarisationsbasis bestimmt die Darstellung der Elemente der [S]-Matrix. Sie können mit einer Transformation ineinander überführt werden, wobei die Symmetrie der [S]-Matrix und die Spur der Matrix erhalten bleibt. Eine Anwendung ist die Transformation der [S]-Matrix von der linearen Polarisationsbasis in die zirkulare Polarisationsbasis.

Zusätzlich zu den Amplituden enthalten auch die Phasenverhältnisse zwischen den Polarisationen nützliche Information. Aus diesem Grund wurde an den E-SAR-Daten die Zerlegung der komplexen Streumatrix [S] auf Basis des PAULI-Dekompositionstheorem durchgeführt (REIGBER 2001). Sie ermöglichen die Zerlegung der Gesamtrückstreuung in mehrere Streuprozesse, wodurch die unterschiedlichen Streumechanismen bestimmt werden können (PAPATHANASSIOU 1999; CLOUDE & POTTIER 1996).

Aus den einzelnen Polarisationen für monostatische SAR-Systeme (HH, VV, HV = VH) lassen sich die drei PAULI-Komponenten berechnen (Abb. 5.13):

$$\text{PAULI-1} = S_{HH} + S_{VV}$$

$$\text{PAULI-2} = S_{HH} - S_{VV}$$

$$\text{PAULI-3} = S_{HV} \times S_{VH}$$

Man kann hierbei drei verschiedene physikalisch interpretierbare Streumechanismen unterscheiden. Eine isotrope Einfach- oder Dreifachreflexion (*odd bounce*, *single bounce*), wie sie an flachen Oberflächen, Wasserflächen und Dreifach-Corner-Reflektoren auftritt, wird durch die erste PAULI-Komponente, welche dem ersten Element des PAULI-Streuvektors entspricht, dargestellt. Die Streuungen werden durch gleiche ko-polare Terme $S_{HH} = S_{VV}$ und $S_{HV} = S_{VH} = 0$ charakterisiert. Die isotrope Doppelreflexion (*even bounce*, *double bounce*), verursacht durch Reflektion an zwei zueinander senkrecht stehenden Ebenen, wie sie bei Baumstämmen oder Hauswänden auftritt, ist in der zweiten PAULI-Komponente, somit dem zweiten Element des PAULI-Streuvektors enthalten. Die zweite PAULI-Matrix beschreibt eine Phasendifferenz von 2π zwischen den ko-polaren Termen und wird charakterisiert durch $S_{HH} = -S_{VV}$ sowie $S_{HV} = S_{VH} = 0$. Die dritte PAULI-Komponente enthält den Anteil der Rückstreuung, der durch Reflexion an zwei, um 45° zur Blickrichtung des Radars gedrehten Ebenen entsteht (*volume scattering*). Dieser Streumechanismus wird beispielsweise im Laubdach von Bäumen und in Lockersedimenten erzeugt.

Es zeigt sich, dass isotrope Einfach- oder Dreifachreflexion im Untersuchungsgebiet nur vereinzelt vorkommen (Abb. 5.13a). Isotrope Doppelreflexionen und Volumenstreuung stellen die dominierenden Rückstreumechanismen dar (Abb. 5.13b u. c).

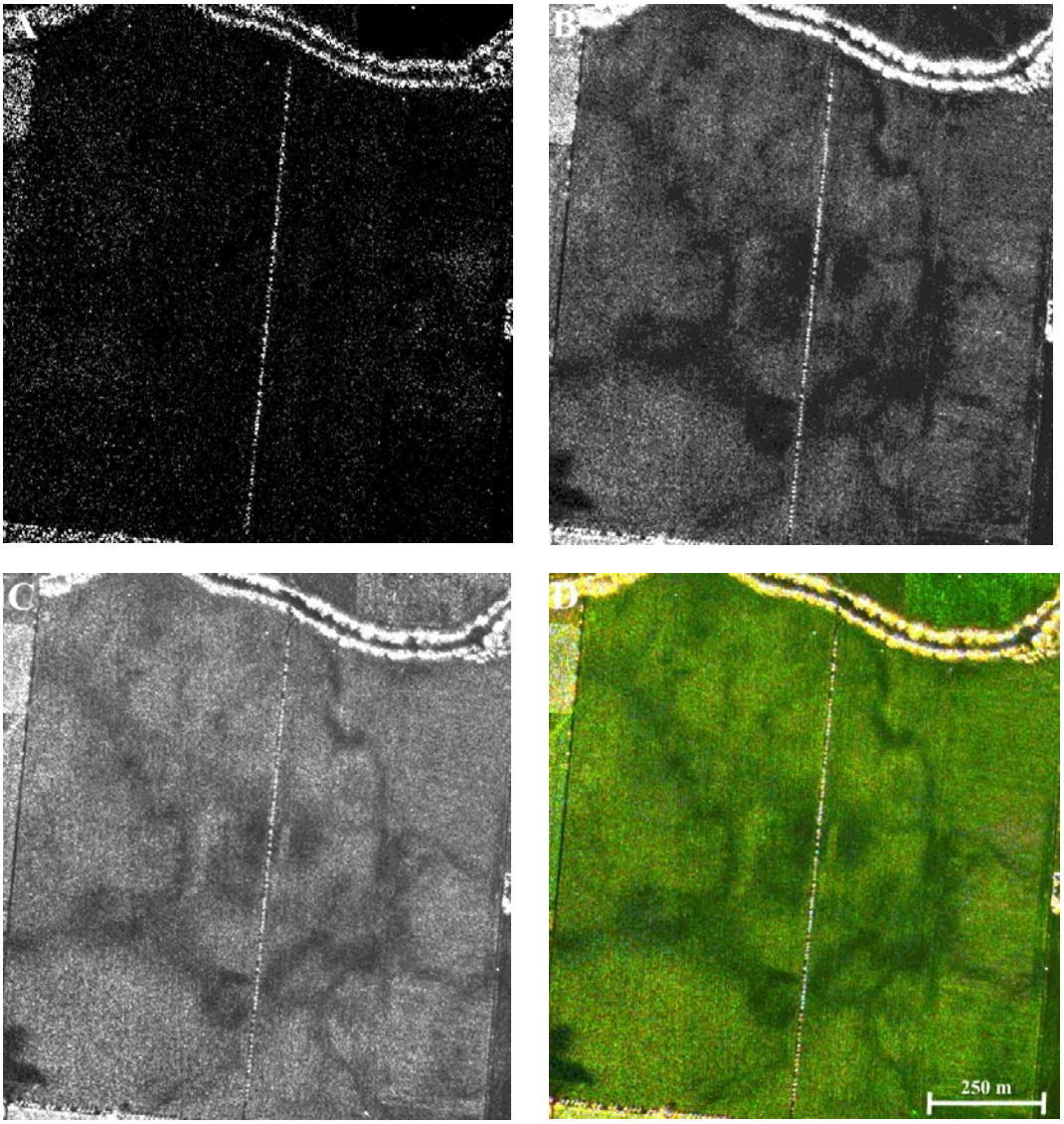


Abb. 5.13: PAULI-Komponenten der multipolarimetrischen L-Band-Daten südlich des Golzower Strom (August 2002). A) PAULI-1. B) PAULI-2. C) PAULI-3. D) Farbkomposite aus den PAULI-Komponenten (PAULI-2, PAULI-3, PAULI-1).

Die PAULI-Zerlegung ist in vielen Fällen nicht ausreichend für eine vollständige Interpretation der Radar-Daten, da nur zwischen drei Streumechanismen unterschieden werden kann.

Im Rahmen der Bildverarbeitung wurden aus den L-Band Polarisationen der E-SAR-Daten synthetische Sekundärdatensätzen auf Basis der PAULI-Dekomposition generiert. Besonders die zweite und die dritte PAULI-Komponente sind geeignet um gewässerähnliche Strukturen zu lokalisieren (Abb. 5.13b u. c). Im weiteren Verlauf der Bildverarbeitung wurden diese Datensätze mit den zuvor erzeugten Primär- und Sekundärdatensätze zu verschiedenen Farbkompositen generiert, die so Hinweise auf Substratwechsel im Oberboden liefern.

5.2.3.10 Radarrückstreukoeffizient (σ^0)

Für die Bestimmung des Radarrückstreukoeffizienten wurden die im 16bit-Format vorliegenden E-SAR-Intensitätsdaten in Ground-Range Projektion aufbereitet. Die Intensitäten lassen sich als Rückstreuungskoeffizient nach der Gleichung $\sigma^0 = 10\log_{10}$ (I) ausdrücken. Bei den Intensitäten handelt es sich um die aufgenommenen quadrierten Amplituden des Rückstreuungssignals ($I = A^2$). Diese Daten stehen in keinem Koordinatensystem und sind nicht untereinander koregistriert.

Die Normierung des Rückstreuquerschnitts auf die Bodenpixelfläche ist der wichtigste Bestandteil der Berechnung des Rückstreukoeffizienten (σ^0). Sie muss durchgeführt werden, da aufgrund der Aufnahmegeometrie des SAR-Seitensichtverfahrens in einem unbearbeiteten SAR-Bild in Ground-Range-Geometrie die einzelnen Pixel unterschiedlich große Geländeoberflächen repräsentieren. Auf Flächen mit einem kleinen lokalen Einfallswinkel, (in Near Range oder auf dem Sensor zugewandten Flächen) repräsentiert ein Pixel eine kleinere Geländeoberfläche als bei einem größeren lokalen Einfallswinkel (θ – in Far Range bzw. auf dem Sensor abgewandten Flächen). Dies zieht einerseits die bekannten geometrischen Verzerrungen wie Foreshortening und Layover (Kap. 3.1.3.2.3) nach sich und hat andererseits auch radiometrische Verzerrungen zur Folge.

Der Rückstreukoeffizienten (σ^0) wird in Dezibel (dB) angegeben. In der Hochfrequenz- und Nachrichtentechnik hat sich zur Behandlung von Signalpegeln, Verstärkungen und Dämpfungen die Quasi-Einheit Dezibel (dB) als nützliches Hilfsmittel erwiesen. Die Grundidee ist hierbei, Verstärkungen (oder allgemein Verhältnisse von Leistungen oder Spannungen) nicht linear, sondern logarithmiert anzugeben. Das Dezibel ist keine echte Einheit, sondern vielmehr nur der Hinweis, dass der angegebene Zahlenwert der dekadische Logarithmus eines Verhältnisses ist.

Den Rückstreukoeffizienten (σ^0) erhält man durch die Normierung des Rückstreuquerschnitts (σ) auf die Bodenpixelfläche. Dies geschieht durch die Multiplikation der *radar brightness* (β^0) mit dem Sinus des lokalen Einfallswinkels (θ). Die Schätzung der Helligkeit (*radar brightness*) aus dem Reflexionsvermögen basiert auf der mittleren Energie pro Pixel, die durch die Rückstreuung des beleuchteten Materials unter konstanten Bedingungen hervorgerufen wird. Das System braucht dabei nicht kalibriert zu werden und die Kenntnis über den jeweiligen Einfallswinkel für jedes einzelne Pixel ist nicht erforderlich. Die Helligkeit (β^0) steht somit für das radiometrische Standardprodukt einer nicht kalibrierten Radaraufnahme (RANEY et al. 1994).

$$\sigma^0(dB) = \beta^0 \times \sin(\theta) \qquad \text{(Gl. 5.20)}$$

Die *radar brightness* (β^0) erhält man wie folgt:

$$\beta^0(dB) = 10 \times \text{alog}_{10}(DN + 32768)^2 - 60 \qquad \text{(Gl. 5.21)}$$

mit DN = Digital Number / Grauwert (FLOAT)

60 = Kalibrationskonstante des E-SAR (dB)

Die Berechnung des lokalen Einfallswinkels (θ) für Untersuchungsgebiete mit geringer Reliefenergie lautet:

$$\theta = \arctan\left(\frac{GR}{H}\right) \qquad \text{(Gl. 5.22)}$$

mit H = Flughöhe über Meeresspiegel minus Geländehöhe

GR = *ground range distance* (*ground range swath start* plus Pixelzahl x *ground range* pixel spacing)

Für Untersuchungsgebiete mit hoher Reliefenergie ist es notwendig, ein Digitales Geländemodell (DGM) zur genauen Berechnung des lokalen Einfallswinkels einzusetzen. Aufgrund der geringen Reliefenergie des Untersuchungsgebietes konnte jedoch auf die Verwendung des DGM verzichtet werden.

Die Angabe eines Rückstreukoeffizienten (σ^0) ist immer spezifisch für eine Frequenz und Polarisation und gilt in der Regel nur für einen bestimmten Einfallswinkel.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde für die Berechnung des Rückstreukoeffizienten (σ^0) in Dezibel ein Modell für die Bildbearbeitungssoftware ERDAS Imagine mit der Skriptsprache SML (Spatial Modeler Language) programmiert (Abb. 5.14).

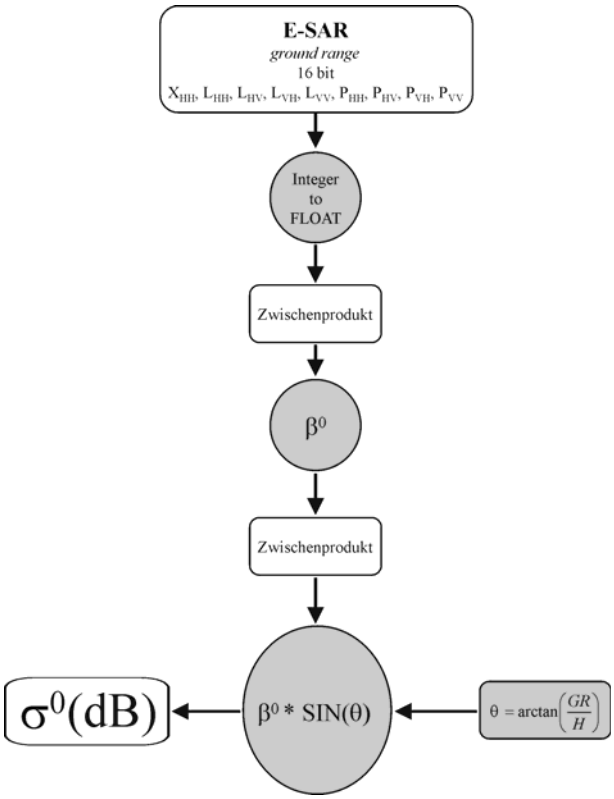


Abb. 5.14: Modell zur Berechnung des Rückstreukoeffizienten (σ^0) in Dezibel aus E-SAR-Ground-Range-Daten.

Durch den Einsatz des kurzwelligen X-Bandes (3,1 cm) in der horizontalen Polarisation sowie der vollpolarisierten langwelligen L- (23,5 cm) und P-Bänder (68 cm) stehen neun Kanäle und ihre jeweiligen Rückstreuintensitäten für die Auswertung zur Verfügung.

5.2.4 ASTER

Zunächst erfolgte die Georeferenzierung der ASTER Subszene auf Grundlage der Universalen Transversalen Mercator-Projektion (UTM) mit dem amtlichen Lagebezugssystem ETRS89.

Von der Annahme ausgehend, dass sich Substratwechsel im Untergrund der Agrarflächen auf die Vitalität und das Wachstum der Vegetation auswirken, dienten die multispektralen ASTER-Daten primär der Generierung von Echt- und Falschfarbenkompositen sowie der Berechnung des **N**ormalized **D**ifference **V**egetation **I**ndex (NDVI) für die Vegetationsanalyse und damit für die Verifikation der E-SAR-Daten.

Aus optischen Gesichtspunkten, und um dem menschlichen Wahrnehmungsempfinden Rechnung zu tragen, wurde eine Echtfarbkomposite aus den ASTER-Daten generiert (Abb. 5.2b). Da der vom ASTER-Sensor abgedeckte Spektralbereich keinen blauen Kanal im sichtbaren Bereich aufweist (Kap. 4.4), müssen die natürlichen Farben aus den ASTER-Kanälen des VNIR nach folgendem Schema für eine RGB-Farbkomposite simuliert werden:

$$R = ASTER1$$

$$G = \frac{3 \times (ASTER2 + ASTER3)}{4} \qquad \text{(Gl. 5.23)}$$

$$B = ASTER3$$

Die Falschfarbenkomposite aus den ASTER Kanälen 321 ermöglichen die Vegetationsanalyse, wobei zwei sichtbare (Kanal 1: 0.52 – 0.60 µm, Kanal 2: 0.63 – 0.69 µm) und ein Infrarotkanal (Kanal 3: 0.76 – 0.86 µm) miteinander kombiniert werden. Vegetationslose Flächen erscheinen in dieser Falschfarbenkomposite türkis oder grünlich, Wasser ist je nach Wassertiefe blau oder schwarz, Vegetation erscheint je nach Vitalität und Wachstum in unterschiedlichen Rottönen.

5.2.4.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Der NDVI (ROUSE et al. 1973), der die normierte Differenz der Rückstrahlung des NIR-Bereiches gegenüber dem Rotbereich darstellt, kann zur Erfassung der Biomasse bzw. des Blattflächenindex herangezogen werden. Vegetationsindizes machen sich die Tatsache zu Nutze, dass die in den Blättern enthaltenden Pigmente von gesunder Vegetation einfallende (Sonnen-) Strahlung in ganz besonderer Weise reflektieren. Während gesunde Vegetation vom sichtbaren Licht nur relativ wenig reflektiert wird, ist die Reflektion im daran anschließenden nahen Infrarot (NIR) deutlich höher. Dieser Anstieg ist um so stärker, je vitaler und dichter die Vegetation ist. Dieser charakteristische Unterschied zwischen sichtbarem Licht und nahem Infrarot ist bei den meisten anderen Oberflächenmaterialien, einschließlich erkrankter oder

vertrockneter Vegetation, nicht zu beobachten. Im Vergleich zu grünem, gesundem Gras reflektiert z.B. trockener Boden oder trockenes Gras im sichtbaren Bereich mehr, während sie im NIR deutlich weniger reflektiert. Neben der Unterscheidung der Vegetation von anderen Objekten lässt sich somit die Stärke (und Vitalität) der Vegetation folgern. Der NDVI ergibt sich allgemein aus:

$$NDVI = \frac{VNIR - R}{VNIR + R} \qquad \text{(Gl. 5.24)}$$

Im Bereich des Rot wird einfallende Sonnenstrahlung weitgehend durch die im Mesophyll der Blätter enthaltenen Pigmente, vor allem durch das Chlorophyll, absorbiert. Im nahen Infrarot dagegen wird der Großteil der auftreffenden Strahlung vom Blattgewebe reflektiert. Der NDVI bildet ein Maß für die photosynthetische Aktivität und ist stark mit Dichte und Vitalität der Vegetationsdecke korreliert. Die Normierung (durch Quotientenbildung) mindert topographische und atmosphärische Effekte und ermöglicht so die gleichzeitige Betrachtung großer Gebiete.

Der NDVI (definiert von –1 bis +1) ist naturgemäß für nicht eutrophe Wasserflächen –1. Vitale, chlorophyllreiche Vegetationsflächen erreichen Werte größer 0 bis hin zu 1.

5.2.5 Landsat-5-TM

Die Landsat-5-TM-Subszene wurde zunächst auf Grundlage der Universalen Transversalen Mercator-Projektion (UTM) mit dem amtlichen Lagebezugssystem ETRS89 georeferenziert. Aufgrund der großflächigen Abdeckung des Untersuchungsgebietes durch die Landsat-5-TM Subszene konnte diese für die 2,5-D Visualisierung des Oderbruchs vom Reitweiner Sporn im S bis zur Neuenhagener Insel im N (Kap. 2.1.3) verwendet werden. So wurde es möglich, einen guten Überblick über die deutlich begrenzte Aufweitung des mittleren Odertales zwischen Neumärkischer Hochfläche im E und Barnimer sowie Lebuser Platte im W zu erhalten.

Analog zu den Farbkompositen aus den ASTER-Daten wurde aus den Landsat-5-TM-Daten eine Echtfarbkomposite sowie eine Falschfarbenkomposite aus den Kanälen 432 generiert. Die Falschfarbenkomposite aus den TM Kanälen 432, ist analog zu der ASTER Farbkomposite 321 zu sehen und ermöglicht die Vegetationsanalyse, wobei ein Infrarotkanal (Kanal 4: 0.76 – 0.90 µm) und zwei sichtbare (Kanal 2: 0.52 – 0.60 µm, Kanal 3: 0.63 – 0.69 µm) miteinander kombiniert werden. Auch in dieser Falschfarbenkomposite erscheinen vegetationslose Flächen türkis oder grünlich und offene Wasserflächen je nach Wassertiefe blau oder schwarz. Vegetation wird je nach Vitalität und Wachstum in unterschiedlichen Rottönen wiedergegeben.

5.2.6 Laser-Scann

Die Laser-Scann-Daten lagen als ASCII-Datensatz vor, der in Subszenen entsprechend der TK10 unterteilt war. Die für das Untersuchungsgebiet benötigten Laser-Scann-Kacheln wurden zunächst mosaikiert. Für die weitere Nutzung in einem GIS musste das Laser-Scann-Mosaik auf Grundlage der UTM-Projektion in das amtlichen Lagebezugssystem ETRS89 transformiert

werden. Das für diese Arbeit erstellte Digitale Geländemodell (DGM) wurde als so genanntes 2,5-D-Modell vorwiegend mit dem Desktop GIS ArcVIEW verwaltet und analysiert, während die Oberflächengenerierung mit dem 3-D-Paket VirtualGIS unter ERDAS Imagine realisiert wurde.

5.2.6.1 Digitales Geländemodell (DGM)

Das Relief beschreibt die Form der Erdoberfläche und ist somit ein wichtiger landschaftsökologischer Faktor, der natürliche und technische Vorgänge beeinflusst. Das Relief als Hauptumsatzfläche für Strahlung und Wasserhaushalt ist Regler für die Bodenbildung, das Verhältnis von Abfluss und Versickerung, Stofftransporte sowie für das Mikroklima. Es trägt somit entscheidend zur standörtlichen Differenzierung der Landschaft bei.

Die Basis der digitalen Relief-Analyse bildet das DGM. Digitale Geländemodelle erleichtern die Analyse von geologischen Gegebenheiten, welche eine morphologische Ausprägung besitzen (z.B. Senken, Drainagesystem, Störungsmuster, Faltenbau, tektonische Lagerungsverhältnisse etc.) und ermöglichen so indirekt die Ableitung reliefbedingter Parameter. Im Hinblick auf die Auswertung von Fernerkundungsdaten eröffnen DGM zusätzliche Möglichkeiten der Oberflächenvisualisierung von spektralen Anomalien. Die folgende Definition wurde MOORE et al. (1992) entnommen: Ein Digitales Geländemodell ist die Repräsentation einer Geländeoberfläche durch digital abgespeicherte x-, y-, z-Koordinaten, wobei die x- und y-Koordinaten die horizontale Position festlegen und die z-Koordinate die Höhe.

Die Parametrisierung des Reliefs wurde im Desktop GIS ArcVIEW realisiert. Die GIS-Analyse des Reliefs stellt einen wichtigen Faktor in der Verifizierung der multifrequenten und multipolarimetrischen E-SAR-Daten dar.

5.2.6.2 Datenstruktur

Die Datenstruktur in der das DGM vorliegt, bestimmt im Wesentlichen die Verfahren, die für die Ableitung von Reliefparametern Anwendung finden. Man unterscheidet grundsätzlich drei Methoden der Datenstrukturierung für ein DGM:

In einem **rasterbasiertem** DGM (Abb. 5.15a) liegen die Höhendaten in einem regelmäßig angeordneten Raster vor. Im Allgemeinen kommen rechtwinklige oder quadratische Raster zur Anwendung, bei denen die explizite Angabe von X-, Y-Koordinaten für jeden Höhenwert entfallen kann, da sie aus dem Rasterformat hervorgeht. Der einzelne Höhenwert spiegelt entweder die Höhe eines diskreten Geländepunktes wider, oder er ist ein Mittelwert über den Geländeausschnitt, dem ein Gitterpunkt des Rasters zugeordnet ist.

Um kontinuierliche Oberflächen abzubilden, werden alternativ zu den Rasterdaten sogenannte **TIN** (Triangulierte Irreguläre Netzwerke – Abb. 5.15b) genutzt. Ein TIN wird meist mittels einer Delaunay-Triangulation in der Grundrissebene aus den Messpunkten erzeugt, wobei die Höhe für die Knoten bekannt ist (SCHMIDT 2003). Im Gegensatz zum Raster-DGM zeichnet sich das TIN durch eine räumlich variable Auflösung aus. In Bereichen, in denen die zu

interpolierende Werteoberfläche (Punkte mit Z-Koordinate) verdichtet ist, ist auch das TIN detailliert. Liegen sie verstreuter, ist das TIN weitmaschiger. Für jede beliebige X, Y-Koordinate wird im TIN ein Höhenwert interpoliert. Jedes Dreieck erhält einen Wert für seine Neigung/Steigung (*slope*) und seine Ausrichtung in Bezug auf die von Himmelsrichtung (*aspect*).

Vektor- oder höhenlinienbasierte DGM (Abb. 5.15c) bestehen aus digitalisierten Höhenlinien in Form von X-, Y-Koordinaten. Die Höhe muss nur einmal pro Linie zugewiesen werden. Die Reihenfolge, in der die Punkte zu einer Linie angeordnet werden, geht aus ihrer Reihenfolge im Speichermedium hervor.

Bei der Generierung von DGM ist die Strukturierung der Daten von entscheidender Bedeutung für die spätere Auswertung. Von den drei Grundstrukturen Höhenlinien (Vektor), trianguliertes irreguläres Netzwerk (TIN) und reguläres Raster (GRID) soll hier nur das GRID näher betrachtet werden. Im Hinblick auf die Ableitung von hydrologisch motivierten Reliefparametern erwies sich die Rasterstruktur als vorteilhaft (HUTCHINSON & GALLANT 2000; MCCULLAGH 1998; BLÖSCHL 1996).

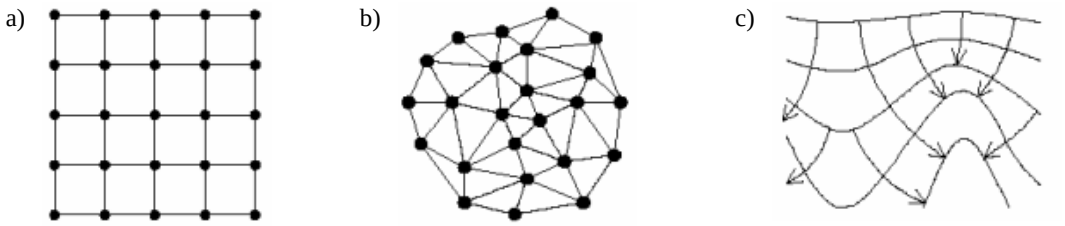


Abb. 5.15: Die drei Methoden der Datenstrukturierung für ein DGM (nach MOORE et al. 1992). A) Raster-DGM. B) TIN. C) Vektor-DGM mit Abflusslinien.

Die Vorteile der Rasterstruktur liegen in der einfachen Implementierung und Entwicklung von Verfahren zur Parameterableitung. Das Rasterformat ist aber auch durch verschiedene Nachteile gekennzeichnet. Aufgrund der konstanten Horizontaldistanz der Elemente eines Raster-DGM zu ihren Nachbarelementen stellt die Darstellung abrupter Höhenänderungen ein Problem für diese Datenstruktur dar. Die konstante, starre Datendichte der Rasterstruktur berücksichtigt keine Unterschiede von z.B. engräumig komplexen und weiträumig monotonen Reliefbereichen. Diese mangelnde Flexibilität spiegelt sich in einer lokalen Redundanz der Daten wider. In Bereichen mit starkem Relief kann es wegen der fehlenden Anpassung zu einer unscharfen Wiedergabe kommen.

Um das Rastermodell aus den Höhenmesspunkten des Laserscanning zu erhalten, ist eine Interpolation der Messpunkte notwendig, das heißt aus den diskreten Punkten wird durch Idealisierung und Abstraktion eine abgeleitete mathematische Fläche gebildet. Je geringer die Stützpunktdichte ist, desto stärker beeinflusst die Wahl des Interpolationsverfahrens das Erscheinungsbild der berechneten Oberfläche. Der Begriff der Filterung beschreibt nach WILD (1983) den Unterschied zwischen den gemessenen Stützwerten und den Werten einer Prädiktionsfunktion in den Stützpunkten. Dadurch ist eine Glättung der berechneten

Geländefläche möglich, um auf Ungenauigkeiten des Messverfahrens zu reagieren. Jedoch ist ein durch Interpolation aus Höhenmesspunkten generiertes Rastermodell immer nur so genau wie die Qualität der Ausgangsdaten.

Die berechnete bzw. interpolierte Geländeoberfläche stellt nur eine Idealisierung bzw. Abstraktion der Realität dar (FRIEDRICH 1996). Unabhängig von der Datengrundlage entstehen durch den Prozess der Generalisierung lokale Minima der Höhenwerte, die dem realen Gelände nicht entsprechen. Diese „künstlichen“ Depressionen treten bevorzugt in Tiefenlinien auf, in denen das Gefälle im Vergleich zu Hangbereichen nicht mehr sehr ausgeprägt ist und stellen vor allem ein Problem für hydrologische Anwendungen dar.

5.2.6.3 Die Parametrisierung des Reliefs

Nach SPEIGHT (1974) unterscheidet man zunächst **primäre** Reliefparameter und **sekundäre** Reliefparameter. Primäre Reliefparameter lassen sich direkt aus den Höhenwerten des Reliefs ableiten, während sekundäre Reliefparameter, die aus der Kombination von primären Reliefparametern hervorgehen, in der Regel auch reliefunabhängige Daten mit einbeziehen.

Die primären Reliefparameter werden weiter danach differenziert, ob sie die **Reliefgeometrie**, beschreiben, oder ob sie Bezug auf die relative Position im Gelände nehmen, also einer Parametrisierung der **Relieftopologie** dienen (MARTZ & DE JONG 1988).

Die Reliefgeometrie eines Punktes auf der Geländeoberfläche kann durch die Angabe der geomorphometrischen Parameter Hangneigung β, Exposition ψ, sowie der Oberflächenwölbung χ und deren richtungsabhängige Komponenten (Horizontalwölbung ω bzw. Vertikalwölbung f) beschrieben werden. Reliefparameter sind Attribute, die sich aus der Beziehung eines Rasterpunktes zu seiner unmittelbaren Nachbarschaft ermitteln lassen. Sie werden daher auch als lokale Variablen bezeichnet. Tab. 5.23 gibt eine Übersicht der gängigen primären Reliefparameter.

Die **Hangneigung** (engl.: *slope, slope gradient*) in Grad [°] gibt den Winkel an, in dem sich die Geländeoberfläche mit einer horizontalen Bezugsebene schneidet. Da die Hangneigung immer in Gefällerichtung berechnet wird, hat sie ein negatives Vorzeichen, das jedoch laut Konvention nicht mit angegeben wird (ZEVENBERGEN & THORNE 1986). Der Wertebereich liegt zwischen 0° und 90°. Die Hangneigung beeinflusst über die Hangabtriebskraft die Abflussraten von Wasser und Sediment.

Die Neigung N in [°] zu jeder Nachbarzelle berechnet sich wie folgt:

$$N_i = \arctan\left(\frac{\Delta z_i}{\Delta L_i}\right) \qquad \text{(Gl. 5.25)}$$

Der Index i bezeichnet die von Norden im Uhrzeigersinn durchnummerierten Nachbarzellen. Der Vertikalabstand bzw. die Höhendifferenz zwischen zentraler Rasterzelle und jeweiliger Nachbarzelle wird durch Δz gekennzeichnet. λ definiert die Rasterweite und ist in X-und Y-Richtung identisch. Der Horizontalabstand ΔL_i entspricht für kardinale Richtungen der

Rasterweite λ, für diagonale Richtungen $\sqrt{2}\lambda$. Die Hangneigung der zentralen Rasterzelle ist damit:

$$\beta = \left| \underset{i=1}{\overset{8}{Min}} N_i \right| \qquad \text{(Gl. 5.26)}$$

Die **Exposition** (*aspect, slope direction*) gibt die Richtung der Hangneigung als Abweichung von der Nordrichtung an und wird im Uhrzeigersinn berechnet. Der Wertebereich der Exposition liegt somit zwischen 0° und 360°. Nach der Berechnung der Hangneigung kann der Exposition die Richtung der Nachbarzelle *i* mit der stärksten Neigung zugewiesen werden. Im quadratischen Raster ergeben die so berechneten Expositionswerte folglich immer ein Vielfaches von 45°.

Die **Wölbung** (*curvature*) der Geländeoberfläche wird häufig durch ihre horizontale bzw. vertikale Komponente ausgedrückt. Alternativ wird auch der Wölbungsradius, der Kehrwert einer Wölbung angewendet. Ein Maß für die Oberflächenwölbung erhält man aus der Summierung aller Neigungswerte:

$$X = \sum_{i=1}^{8} N_i \qquad \text{(Gl. 5.27)}$$

Die **Vertikalwölbung** (*profile curvature*) beschreibt die Oberflächenwölbung in Richtung der Hangneigung und gibt die Änderung der Hangneigung pro Längeneinheit an. Die Vertikalwölbung ergibt sich entsprechend der Oberflächenwölbung, indem die Neigung in Richtung der Exposition, die soeben als Hangneigung definiert wurde, und die Neigung in entgegengesetzter Richtung ($N_{\psi+180°}$) summiert werden:

$$\Phi = N_{\psi} + N_{\psi+180°} \qquad \text{(Gl. 5.28)}$$

Die **Horizontalwölbung** (*plan/contour curvature*) gibt den isohypsen-parallelen Anteil der Oberflächenwölbung an, und somit die Änderung der Exposition pro Längeneinheit. Wird als Längeneinheit (m) benutzt so lautet die Einheit der Wölbungen (° m^{-1}) oder analog zur dimensionslosen Form der Hangneigung (m^{-1}). Dabei indizieren negative Wölbungswerte konkave Oberflächen, positive Wölbungswerte konvexe Oberflächen. Der alternativ oft benutzte Wölbungsradius (m) ist direkt proportional zum Kehrwert der Wölbung (ZEVENBERGEN & THORNE 1986).

Für die Abschätzung der Horizontalwölbung muss der zentrale Rasterpunkt isohypsen-parallel auf das Neigungswerte-Feld projiziert werden. Im Gegensatz zur Ermittlung der Exposition können hier durch lineare Interpolation Ergebnisse erzielt werden, die genauer als Vielfache von 45° sind. Für einfache Hangbereiche ergeben sich auf diese Weise zwei Richtungswinkel, aus deren Winkeldifferenz $\Delta\psi$ man nun ein Maß für die horizontale Wölbung pro Rasterweite erhält.

Tab. 5.23: Reliefparameter (nach GEBBERS & SCHMIDT 1999).

Attribut / Parameter	Definition	Bedeutung
Höhe	Höhe über NN	Klima, Vegetation, potentielle Energie
Neigung	Neigungswinkel in Hangfallrichtung (Gradient der Höhe)	Ober- und unterirdische Fließgeschwindigkeit und Abflussrate, Verdunstung, Vegetation, Geomorphologie, Bodenwassergehalt, Landnutzungseignung
Exposition	Aspekt, Neigungsrichtung (Hangfallrichtung)	Solarstrahlung, Evapotranspiration, Verteilung und Abundanz der Flora und Fauna
Vertikalkrümmung	Neigungsänderung, erste Ableitung der Neigung	Abflussbeschleunigung, Erosion / Akkumulation, Geomorphologie
Horizontalkrümmung	Änderung des Konturverlaufs (Isohypsenverlaufs)	Konvergenz / Divergenz des Abflusses, Bodenwassergehalt
Zuflussgebiet	Zuflussgebiet zum Beobachtungspunkt hin	Abflussvolumen, Gleichgewichts-Abflussrate
Abflussgebiet / Entwässerungsgebiet	Abflussgebiet vom Beobachtungspunkt ausgehend	Bodenentwässerung, Bodenwasserversickerung
Einzugsgebiet	Fläche des Gebietes, das zur Vorflut entwässert	Abflussvolumen
Zuflusslänge	maximale Entfernung, die Wasser aus dem Zuflussgebiet zum Beobachtungspunkt zurücklegen kann	Erosionsstärke, Erosionsfracht (Sediment), Zeit der Abflusskonzentration
Abflusslänge	Abstand des Beobachtungspunktes zur Abflussbasis	Verzögerung der Bodenwasserversickerung
Einzugsgebietsneigung	mittlere Neigung im Einzugsgebiet	Zeit der Abflusskonzentration
Einzugsgebietslänge	Abstand vom höchsten Punkt des Einzugsgebietes zur Abflussbasis	Abschwächung des Oberflächenabflusses
Zuflussgebietshöhe	mittlere Höhe des Zuflussgebietes des Beobachtungspunktes	Potentielle Energie
Zuflussgebietsneigung	mittlere Neigung des Zuflussgebietes des Beobachtungspunktes	Abflussgeschwindigkeit
Zuflussgebietslänge	mittlere Länge der Zuflüsse zum Beobachtungspunkt	Fließbescheunigung, Erosionsrate
Abflussgebietsneigung	mittlere Neigung des Abflussgebietes	Bodenwasserversickerung

Ein typisches Problem von rasterbasierten DGM stellen **lokale Minima** der Höhenwerte (*pit, sink*) dar. Sie entstehen durch den Prozess der Generalisierung bei der Übertragung von Höhendaten in ein Rasterformat. Während lokale Minima für die Beschreibung der Reliefgeometrie nahezu belanglos sind, können sie für die Abflusssimulation eine bedeutende Fehlerquelle darstellen, da der Abfluss generell nur von höheren zu tieferen Rasterzellen weitergegeben wird.

In einem Karstgebiet kann ein lokales Minimum (z.B. Doline) eine reale Geländeform widerspiegeln und somit kein Artefakt darstellen.

Um zu verhindern, dass Abflusspfade vor Erreichen des Kartenrandes in lokale Minima abgebrochen werden, wurden verschiedene Verfahren entwickelt:

- Alle Rasterzellen des Senkenbereiches werden als eine Einheit behandelt. Der über ihre Fläche generierte Abfluss wird mit dem von außerhalb in den Senkenbereich

gelangenden Abfluss zusammengefasst und komplett an den Überlauf weitergereicht (MARTZ & DE JONG 1988).

- Die Höhenwerte im Senkenbereich werden so weit angehoben, dass ein minimales Gefälle innerhalb des Senkenbereiches in Richtung Überlauf vorliegt (MORRIS & HEERDEGEN 1988).
- Für alle Rasterzellen des Senkenbereichs wird eine feste Abflussrichtung vorgegeben, die den Abfluss zum Überlauf leitet (JENSON & DOMINGUE 1988).

5.2.6.3.1 Topographic Wetness Index (TWI)

Die sekundären Reliefparameter werden aus mehreren primären zusammengesetzt oder mit weiteren Ableitungen bzw. empirischen Gleichungen kombiniert.

Bei diesen topographischen Indizes handelt es sich um die Quotienten aus berechneter potenzieller Zuflussmenge und der Geländeneigung sowie ggf. weiteren bodenkundlichen oder klimatologischen Parametern. Die verbreitetste Form nach BEVEN und KIRKBY (1979) ist der Topographic Wetness Index (TWI). Das Konzept des TWI bietet eine Methode zur flächenbezogenen Vorhersage der Bodenfeuchteverteilung. Er ist eine nichtlineare Verknüpfung aus dem spezifischen Einzugsgebiet (A_s) eines Punktes und seiner lokalen Neigung ($\tan\beta$):

$$\mathrm{TWI} = \ln (A_s/\tan\beta) \qquad \text{(Gl. 5.29)}$$

mit A_s = spezifisches Einzugsgebiet eines Punktes/einer Zelle,

$\tan\beta$ = lokale Geländeneigung

Dieser Index wurde ursprünglich entwickelt, um das Muster von zuerst gesättigten Bodenbereichen (Entstehung von Oberflächenabfluss) für Abflussmodelle vorherzusagen. Basis dieses Konzeptes ist die Annahme, dass die Geländeform die Bewegung des Wassers auch im oberen Bodenbereich bestimmt und somit über die räumliche Verteilung des Bodenwassergehaltes nach einem Niederschlagsereignis entscheidet. Die Wasserleitfähigkeit des Bodens im gesättigten Zustand wird dabei für die gesamte Landschaft als konstant (= 1) angenommen, so dass auf die k_f-Werte des Bodens verzichtet wird. Ein konvergierendes, flaches Gelände wird durch einen hohen Index-Wert charakterisiert, während niedrige Werte steile Gebiete mit kleinem Zuflussgebiet kennzeichnen. Dieses Konzept ist nur anwendbar, wenn ein wesentlicher Anteil am Gesamt-Bodenwasserfluss eines Einzugsgebietes durch den lateralen Fluss bestimmt wird (BARLING et al. 1994). Dieser entsteht, da die Durchlässigkeit der meisten natürlichen Böden mit der Tiefe exponential abnimmt. Sobald das Gelände eine Neigung und somit einen geländebedingten hydraulischen Gradienten aufweist, wird eine laterale Komponente des Abflusses ausgebildet. Auf Ackerflächen ist dieser Effekt überlagert durch die Pflugsohlenverdichtung, die eine laterale Abflusskomponente in der Tiefe erwarten lässt. Die vertikale Komponente der Bodenwasserbewegung wird als homogen innerhalb des Untersuchungsraumes betrachtet und deshalb als von geringer Varianz für die räumliche Verteilung der Bodenfeuchte angenommen. Das Konzept gilt nicht für Landschaften, in denen der bodennahe Fluss von geologischen Besonderheiten und nicht vom Relief maßgeblich

beeinflusst wird (z. B. Karstgebiete und artesische Becken).

Eine hohe Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Sättigung wurde von O'LOUGHLIN (1986) für Areale angenommen, in denen der akkumulierte Zufluss das Produkt aus der Bodendurchlässigkeit T (*transmissivity*) und dem lokalen Gefälle übersteigt, also in Bereichen, wo der Boden weder Wasser aufnehmen noch weitergeben kann. Im deutschen Sprachgebrauch wird die Transmissivität ($m^2 \times s^{-1}$) für den Grundwasserleiter wie folgt verwendet:

$$T = k_f \times M \qquad \text{(Gl. 5.30)}$$

mit M = Mächtigkeit des Aquifers

Im Gegensatz hierzu bezieht sich nach O'LOUGHLIN (1986) und BARLING et al. (1994) Transmissivität auch auf den Bereich eines gesättigten Bodenkörpers bis zur Geländeoberfläche und wird hier als Bodendurchlässigkeit T ($m^2 \times s^{-1}$) bezeichnet.

Die Grundannahmen, auf denen die Gültigkeit des Wetness-Index beruhen, lauten:

- gleiche Infiltrationsrate innerhalb des Einzugsgebietes,
- gleiche Grundwasserneubildung und homogener vertikaler Fluss,
- homogene Bodendurchlässigkeit,
- exponentielle Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit mit der Tiefe,
- piezometrische Druckhöhe verläuft parallel zur Geländeoberfläche,
- das Gleichgewicht des oberflächennahen Zu-/Abflusses hat sich an jedem Punkt eingestellt (*steady state*).

Die Herleitung des Wetness-Index basiert auf dem Bodenwasserflux q_i als Produkt der Geländeneigung (angenommen als angenähert parallel zur Oberfläche des Grundwasserspiegels) und der Bodendurchlässigkeit. Dabei wird die Bodendurchlässigkeit als Funktion der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und des Abstandes von der Geländeoberfläche zu einem Stauwasserspiegel angenommen. Der Flux gilt auch bei homogener Grundwasserneubildung als Produkt des spezifischen Einzugsgebietes und der Grundwasserneubildung. Nach WILSON & GALLANT (2000) ergibt die Kombination beider Gleichungen eine explizite Darstellung der Tiefe (z) des Stauwasserspiegels in Abhängigkeit von zwei topographischen Variablen (a, s), zwei Bodenvariablen (f, T) und einer vorwiegend klimatischen Variable, der Grundwasserneubildung:

$$z_i = -\frac{1}{n}\ln\left(\frac{A_s R}{T_0 \tan\beta}\right) \qquad \text{(Gl. 5.31)}$$

mit n = Abnahmerate der hydraulischen Leitfähigkeit mit der Tiefe nach $K_s(z) = K_0 e^{-nz}$

A_s = spezifisches Einzugsgebiet des Punktes i

R = Grundwasserneubildung

T_0 = Profil-Durchlässigkeit (*profile transmissivity*) = K_0/n

β = Winkel der Geländeneigung

Mittels einer über das Untersuchungsgebiet integrierten durchschnittlichen Wasserspiegeltiefe wird ein relativer Wetness-Index für jeden Punkt des Einzugsgebietes geschaffen.

Der relative Wetness-Index ist nur von den beiden topographischen Variablen A_s und $\tan\beta$ abhängig. Der Index weist im Prinzip die Bereiche eines Einzugsgebietes aus, in denen reliefbedingt zuerst Sättigung erreicht wird und somit Oberflächenabfluss einsetzt. Nach WILSON & GALLANT (2000) kann dieser Index auch als Langzeit-Bodenfeuchte-Index interpretiert werden. Der berechnete Wert des Index drückt jeweils nur die Abweichung vom Gebietsmittelwert aus. Ein höherer Index steht sachlich betrachtet für einen geringeren Grundwasserflurabstand.

5.3 Integration der Geodaten in ein Geoinformationssystem (GIS)

Für die geologische Anwendung eines GIS und dem Aufbau eines Geologischen Informationssystem i.e.S. ist die Schaffung und Pflege einer Datenbank mit allen verfügbaren raumbezogenen Geodaten für den Untersuchungsraum von zentraler Bedeutung.

Nach der Aufbereitung des analogen geologischen und historischen Kartenmaterials und der Verarbeitung der Fernerkundungsdaten (Kap. 5.2) beinhaltete der abschließende Arbeitsschritt die Zusammenführung der unterschiedlichen Geodaten in das Geoinformationssystem ArcView. Die Geodaten und ihre Attribute sind in ArcView nach den verschiedenen thematischen Bedeutungen in Ebenen angeordnet (Abb. 5.16). Dieser Aufbau unterscheidet sich grundlegend vom Objektklassenprinzip mit seiner hierarchischen Anordnung von unterschiedlichen Thematiken. Beim Ebenen- oder *Layer*-Prinzip sind sämtliche Ebenen gleichberechtigt. Somit leitet sich die Modellierung direkt aus dem analogen Folienprinzip der klassischen Kartographie ab (ZUMSPREKEL 2002). Im Gegensatz zu Analysen, die auf der Basis von Fernerkundungsdaten als einziger Datenquelle basieren, wird erst durch die realisierbare Verschneidung unterschiedlicher Informationseinheiten in einem GIS eine bessere Ergebnisqualität erreicht. In der Literatur (STIBIG & SCHARDT 1996) wird dieser Vorgang auch als Datenkonfusion bezeichnet. Diese Art der dynamischen Datenhaltung ermöglicht es darüber hinaus, jederzeit neue Daten hinzuzufügen sowie die vorhandenen Daten für weitere spezielle Fragestellungen neu zu kombinieren.

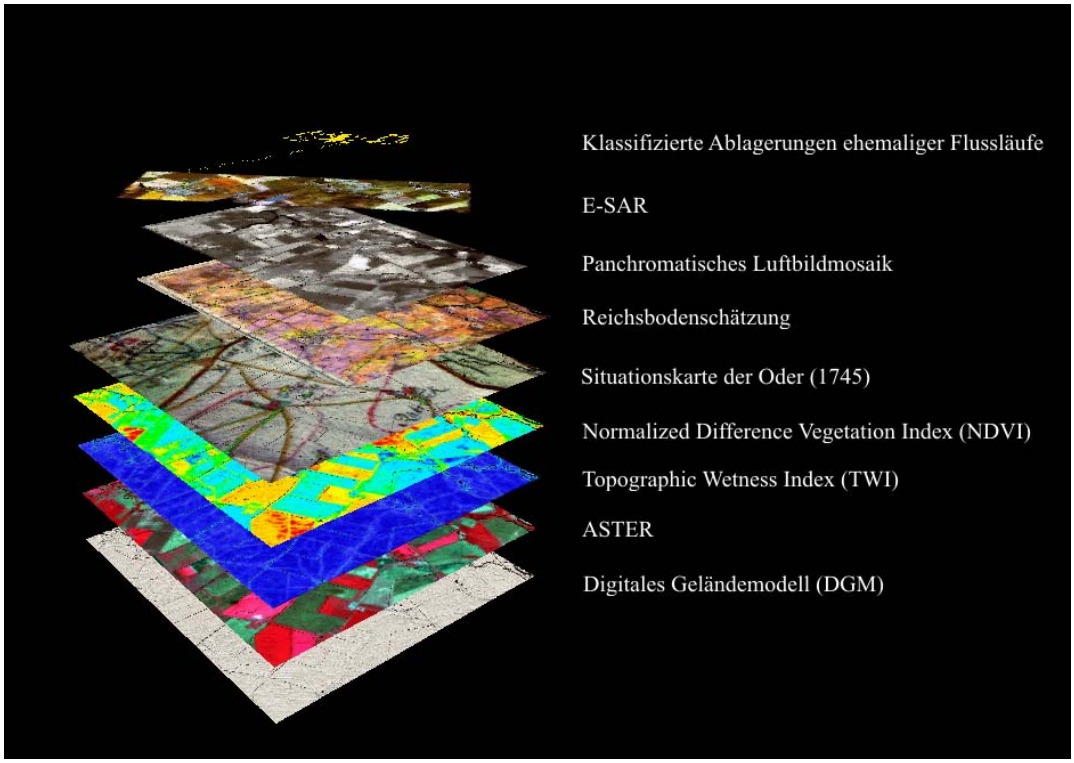


Abb. 5.16: Anordnung der verschiedenen Geodaten nach dem *Layer*-Prinzip im Geoinformationssystem am Beispiel des Oderbruch bei Golzow.

Die im Gelände aufgenommenen Lokalitäten konnten auf der Basis von GPS-Messungen (Modell Garmin GPS 12) in ArcView eingebunden werden. Die GPS-Messungen wurden mit der Schnittstellensoftware Waypoint ins ASCII-Format exportiert und über das Tabellenformat dBase in das Geoinformationssystem eingelesen. Nachfolgend wurden in ArcView die mit den GPS-Punkten verknüpften Tabellen um Attributdaten (z.B. Bodenfeuchtemessungen) erweitert. Die Verbindung von Geoobjekten mit den zugehörigen Attributdaten stellt neben der Topologie die entscheidende Verbesserung des *Layer*-Prinzip dar. Mithilfe von sog. *hot links* konnte den GPS-Punkten weitere Information wie Geländefotos, Bohrprofile und Rückstreuintensitäten von Oberflächenobjekten zugeordnet werden (Abb. 5.17).

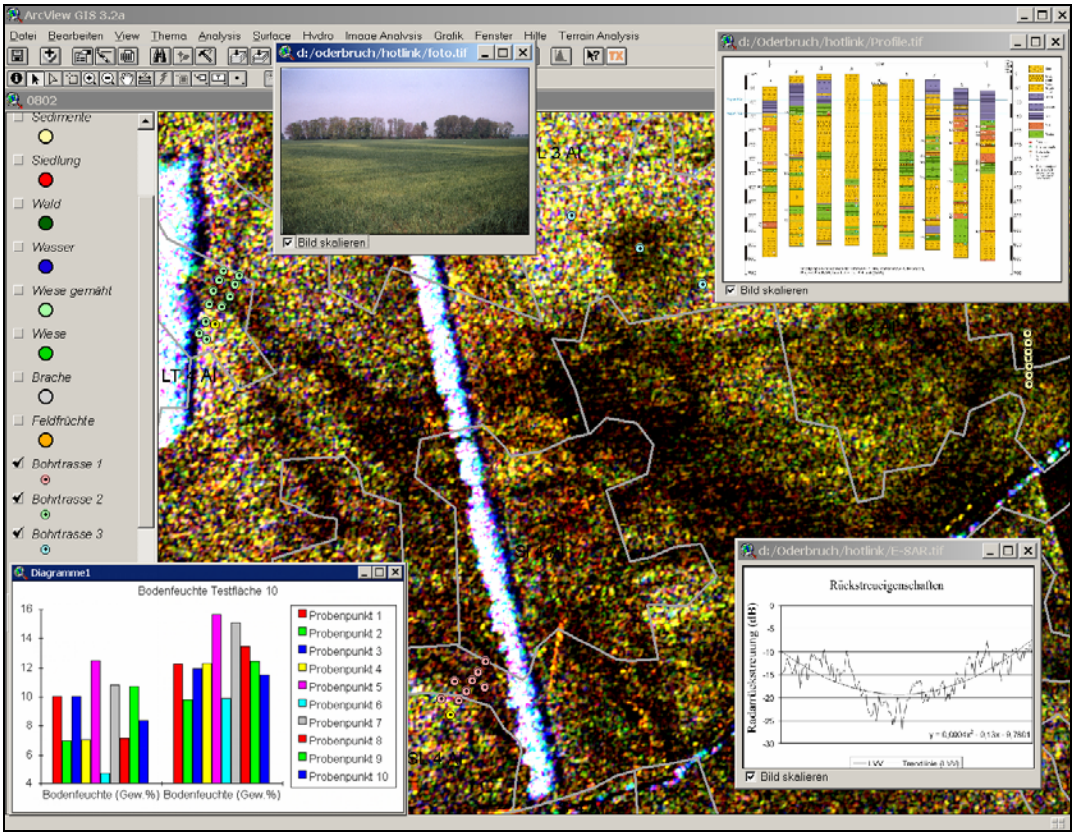


Abb. 5.17: Verknüpfung von Reichsbodenschätzung, Fernerkundungsdaten, Geländebefunden und Labormessungen in ArcView für das Untersuchungsgebiet südwestlich von Manschnow.

5.4 2,5-D-Visualisierung

Neben der zweidimensionalen Darstellung raumbezogener Raster- und Vektordaten nach dem in Abb. 5.16 schematisch wiedergegebenen Ebenenprinzip besteht die Möglichkeit einer perspektivischen Ansicht von DGM mit überlagerten Fernerkundungs- und Vektorinformationen. Diese Technik gestattet die Loslösung von der herkömmlichen Darstellung der Geodaten nach dem klassischen Kartenprinzip. Die Oberflächenvisualisierung der Morphologie eines Untersuchungsgebietes unter Einbeziehung einer zielgerichteten Kombination unterschiedlichster Informationsquellen innerhalb einer virtuellen Landschaft eröffnet ein vielfältiges Potenzial für naturwissenschaftlichen Fragestellungen.

Die Exploration der Geodaten innerhalb einer virtuellen Landschaft wird eingeschränkt, da eine vollständige dreidimensionale Geländedarstellung unter Einbeziehung des Untergrundes in den verwendeten GIS-Programmen bisher nicht verwirklicht ist.

Bei der in diesem Kapitel beschriebenen perspektivischen Verarbeitung der Geodaten handelt es sich daher streng genommen um eine 2,5D-Darstellung, da keine echten Tiefeninformationen vorliegen. Sie wurde mithilfe der Software VirtualGIS durchgeführt, die ein Erweiterungsmodul von ERDAS Imagine 8.5 darstellt.

Als Grundlage für die 2,5-D-Visualisierung des Untersuchungsgebietes diente ein Mosaik aus den zur Verfügung stehenden Laser-Scann-Daten mit einer Auflösung von 5 m pro Pixel. Da die Laser-Scann-Daten nicht für den gesamten Oderbruchs vorliegen, wurde für die perspektivische Visualisierung des gesamten Oderbruch aus dem frei zugänglichen GTOPO30-Datensatz des United States Geological Surveys (USGS) ein DGM für das Gebiet östlich der Oder erzeugt und mit dem DGM50 des Landes Brandenburg mosaikiert. Das DGM50 besitzt eine Auflösung von 50 m pro Pixel und wird aus dem DGM25 mit einer Auflösung von 25 m pro Pixel abgeleitet. Die GTOPO30-Daten werden unter http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.html (08.12.2003) vom USGS bereit gestellt. GTOPO30 enthält weltweit Höhenwerte im Abstand von 30 Winkelsekunden. 30 Winkelsekunden bedeuten im Bereich des Oderbruchs eine Auflösung von etwa 900 m. Die GTOPO30-Daten wurden zur Darstellung auf Grundlage der UTM-Projektion in das amtlichen Lagebezugssystem ETRS89 transformiert.

Wegen der geringen Reliefenergie des Untersuchungsgebietes mit Höhen zwischen 0,1 m und 23,75 m über NHN wurde ein Überhöhungsfaktor von 10 für das Laser-Scann DGM gewählt. Für das gesamte Oderbruch fand ebenfalls ein Überhöhungsfaktor von 10 für das DGM-Mosaik aus dem DGM50 sowie dem GTOPO30-Datensatz Anwendung. Der 2,5-D-Visualisierung wurde jeweils eine künstliche Seitenbeleuchtung aus nordöstlicher Richtung mit 45° Azimut hinzugefügt.

Als überlagerte Bilddatensätze wurden in dem Virtual GIS-Projekt Landsat-5-TM-Daten und E-SAR-Daten importiert. Die virtuelle Flugsequenz (Abb. 5.18; Anhang E) mit einer Detailgenauigkeit (*Level of Detail*, LOD) von 100 % für das DGM und die überlagerten Fernerkundungs- und Vektorinformationen führt aus 1100 m Höhe von S über den Reitweiner Sporn in das Untersuchungsgebiet. Im N des Oderbruchs wird bei Bad Freienwalde die Neuenhagener Insel umkreist und der Flug Richtung S in das zentrale Untersuchungsgebiet bei Manschnow fortgesetzt. Die Flughöhe verringert sich in Richtung S sukzessive bis auf 700 m im Bereich des Fort Gorgast. Zur besseren Orientierung werden die wichtigsten Ortsnamen während der Flugsequenz eingeblendet.

Zu Beginn der Flugsequenz findet eine Landsat-5-TM Echtfarbkomposite Anwendung, während für die Flugsequenz ab der Neuenhagener Insel Richtung S die Landsat-5-TM Falschfarbenkomposite 432 verwendet wurde. Diese Falschfarbenkomposite ist analog zur ASTER Falschfarbenkomposite 321 (Kap. 5.2.4) zu sehen. Zum Abschluss der Flugsequenz bei Manschnow wird zusätzlich die E-SAR Farbkomposite L_{VV}, L_{HH}, L_{HV} eingeblendet.

Die Flugsequenz gibt einen guten Überblick auf die begrenzte Aufweitung des mittleren Odertales zwischen Neumärkischer Hochfläche im Osten und Barnimer sowie Lebuser Platte im Westen (Kap. 2.1.1). Es wird ersichtlich, dass die umliegenden, zum Jungmoränengebiet gehörenden Hochflächen sich deutlich vom Oderbruch abheben, das im Holozän eine Flussauenlandschaft bildete, durch welche die Oder mäandrierte. Es wird ersichtlich, dass die Morphologie des Oderbruchs die flächenhaften Ablagerungen feinstkörniger Schwebfracht, dem sogenannten Auelehm sowie entlang von Strömungsrinnen umgelagerte Sande im gesamten Untersuchungsgebiet begünstigte.

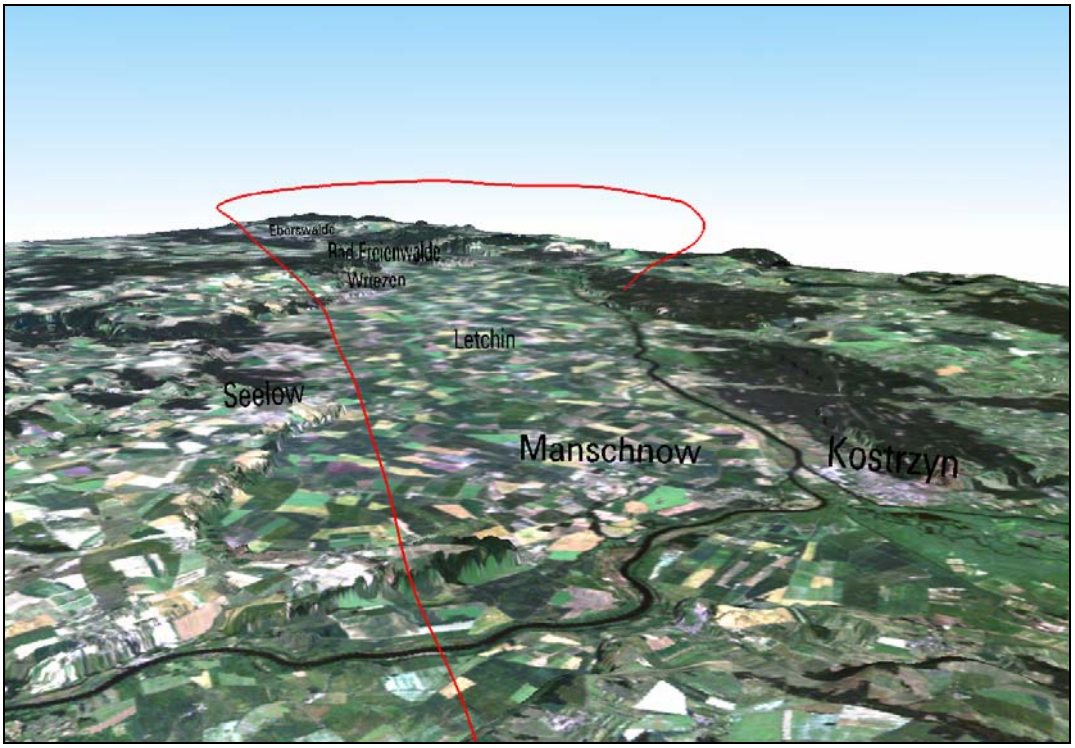


Abb. 5.18: Virtuelle Flugsequenz über das Oderbruch mit überlagerter Landsat-5-TM Echtfarbenkomposite (Blick aus südöstlicher Richtung). Die Flugroute ist rot eingezeichnet.

Die Abb. 5.19a gibt einen guten Eindruck von der geringen Reliefenergie im zentralen Untersuchungsgebiet wider. Das zugrunde liegende Laser-Scann DGM wurde um den Faktor 10 überhöht und mit dem Luftbildmosaik von 1997 überlagert. Der Blick geht über das Fort Gorgast Richtung SW. Neben der Festungsanlage sind lediglich die Straßendämme als deutliche Erhebungen zu erkennen. Der Blick vom Fort Gorgast Richtung W veranschaulicht plastisch die Begrenzung des Oderbruchs im W durch die Barnimer sowie Lebuser Platte (Abb. 5.19b). Basis für diese Abbildung bildet das DGM50 mit einem Überhöhungsfaktor von 10 sowie eine Landsat-5-TM Echtfarbkomposite.

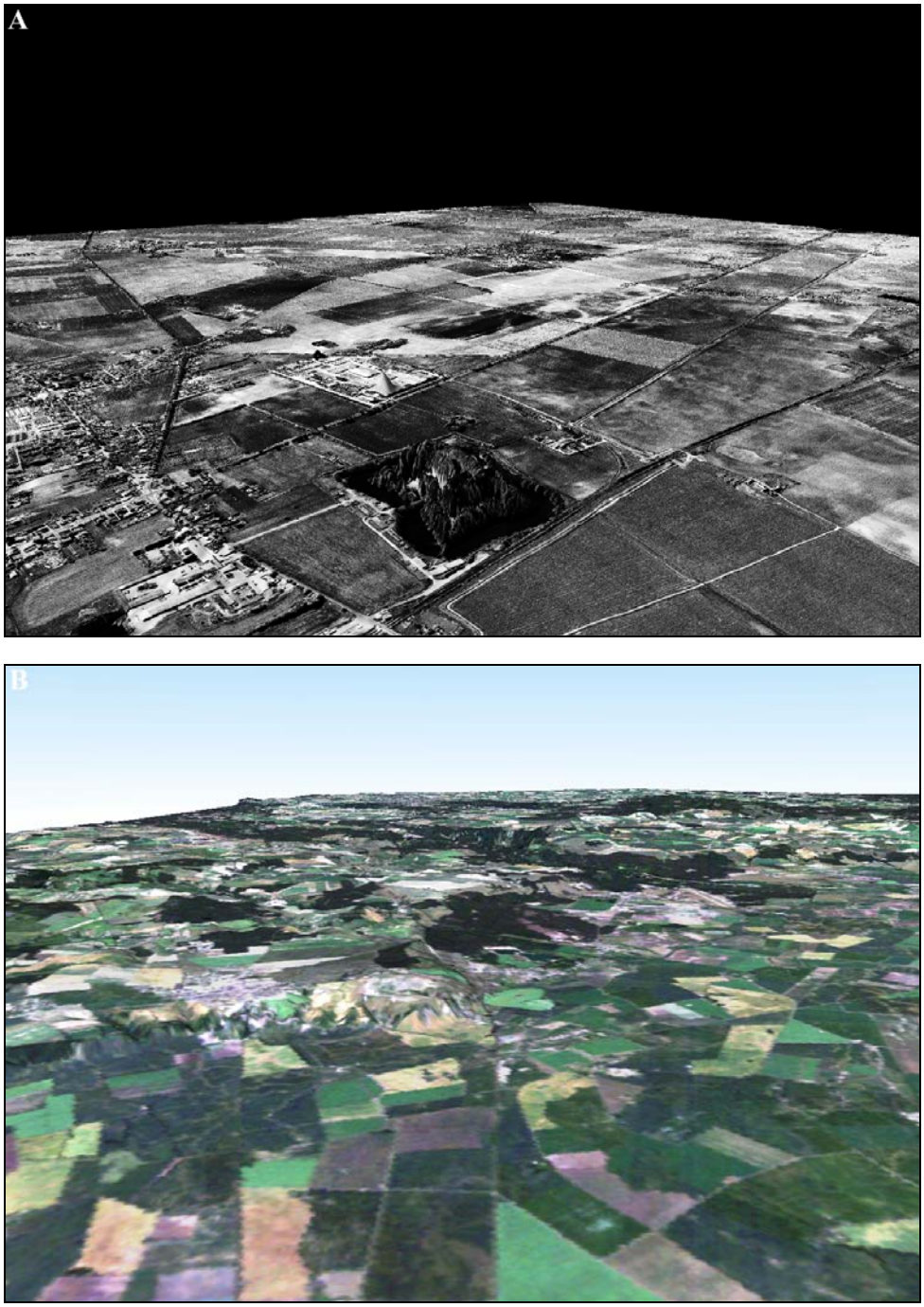


Abb. 5.19: **Perspektivische Ansicht des zentralen Untersuchungsgebiets. A) Luftbildmosaiks von 1997 im Bereich des Fort Gorgast (Blick Richtung SW). B) 2,5-D-Visualisierung der Landsat-5-TM Echtfarbkomposite für den Westrand des Oderbruchs (Blick Richtung W).**