

Verbundvorhaben (FKZ 0339566)

„Morphodynamik der Elbe“

Endbericht

TP. I.2: Pilotstudie Radarbefliegung der Elbaue

Projektpartner:

**Prof. Dr. P. Ergenzinger
Institut für Geographische Wissenschaften
Fachrichtung Physische Geographie
Freie Universität Berlin
Malteserstr. 74 – 100
D – 12249 Berlin
Tel.: 030/ 7792 253
Fax.: 030/ 76706439
Email: perg@gauss.geog.fu-berlin.de**

**Dr. C. Schmullius
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Hochfrequenztechnik
Postfach 1116
D – 82230 Wessling
Tel.: 08153/ 28 2331
Fax.: 08153/ 28 1449
Email: chris.schmullius@dlr.de**

Bearbeitung:

**Dipl.-Geogr. Irena Hajsek
Email: irena.hajsek@dlr.de**

Stand:

Juli 1999

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Wissenschaftliche Zielsetzung	3
1.2	Stand der Forschung	5
1.2.1	Vegetations- und Landnutzungsklassifikation	5
1.2.2	Modellierung und Invertierung von Oberflächenparameter	6
1.2.3	SAR-Interferometrie	7
2	Fernerkundung und Mikrowellen	7
2.1	Synthetisches Apertur Radar	8
2.2.1	Interaktion der elektromagnetischen Welle mit einer Oberfläche	10
2.2.1.1	Polarisation	12
2.2.1.2	Dielektrizitätskonstante	13
2.2.1.3	Oberflächenrauigkeit	14
2.2.1.4	Volumenstreuung	16
2.2	SAR-Interferometrie	17
2.3	E-SAR Spezifikation	19
3	Angewandte Methoden	20
3.1	Klassifikationsmethoden	21
3.1.1	Pixelbasierte Klassifikation	21
3.1.1.1	Unüberwachte Klassifikation	22
3.1.1.2	Überwachte Klassifikation	22
3.1.2	Texturbasierte Klassifikation	24
3.1.2.1	Co-Occurence Matrix	24
3.1.2.2	Haralick-Parameter	24
3.1.2.3	Context-Verfahren	25
3.2	Modellierung und Invertierung von Oberflächenparametern	26
3.2.1	Theoretische Modelle	26
3.2.2	OH-Modell	27
3.2.3	DUBOIS-Modell	29
4	Geographie des Untersuchungsgebietes	31
4.1	Geographische Lage, Größe und naturräumliche Zuordnung	31
4.2	Vegetationseinheiten und Landnutzung	34
4.2.1	Potentielle Vegetation der Elbaue	34
4.2.2	Rezente Vegetation der Elbaue	34
4.3	Geologie und Geomorphologie	36
4.4	Bodengeographie	37
4.4.1	Bodenarten	38
4.4.2	Bodentypen	40
4.5	Klima	40
4.6	Hydrographie und Hydrologie	41

4.6.1 Die Elbe und ihr Einfluß auf die Aue.....	41
4.6.2 Nebenflüße der Elbe im Untersuchungsgebiet.....	42
5 Erhebung von Datenmaterial.....	42
5.1 E-SAR Überflug.....	43
5.2 Geländekampagne.....	43
5.2.1 Bodenfeuchtemessung.....	44
5.2.1.1 Gravimetrische Bestimmung des Bodenwassergehaltes.....	45
5.2.1.2 TDR-Messung (Time Domain Reflectometry).....	45
5.2.2 Messung der Oberflächenrauigkeit.....	46
6 Datenaufbereitung.....	47
6.1 Radar-Daten (E-SAR).....	47
6.2 Gelände-Daten.....	50
7 Ergebnisse.....	50
7.1 Vegetations- und Landnutzungsklassifikation.....	50
7.1.1 Bilddatenaufbereitung.....	51
7.1.2 Texturbasierte Klassifikation.....	52
7.1.3 Unüberwachte Klassifikation.....	53
7.1.4 Überwachte Klassifikation.....	55
7.1.4.1 Naturschutzgebiet Garbe.....	55
7.1.4.2 Lütckenwischer Aussendeichbereich.....	59
7.1.4.3 Lenzener Rückdeichungsbereich.....	60
7.1.5 Jahreszeitlicher Vergleich.....	62
7.2 Modellierung und Invertierung von Oberflächenparametern.....	64
7.2.1 Gelände-Daten.....	64
7.2.2 Radar-Daten (E-SAR).....	67
7.2.3 Extraktion von Oberflächenparameter.....	68
7.2.3.1 Korrelationsanalysen.....	69
7.2.3.2 Modellierung des Rückstreukoeffizienten.....	69
7.2.3.3 Invertierung von Oberflächenparametern.....	70
7.3 SAR-Interferometrie versus Laser-Scanning Technik.....	76
7.3.1 Verfahren der SAR-Interferometrie.....	77
7.3.2 Verfahren des Laser-Scanner Messung.....	79
7.3.3 Verfahrensgegenüberstellung.....	80
7.3.4 Entwicklung der SAR-Interferometrie des E-SAR (DLR).....	81
8 Zusammenfassung.....	82
8.1 Vegetations- und Landnutzungsklassifikation.....	83
8.2 Modellierung und Invertierung von Oberflächenparametern.....	84
8.3 SAR-Interferometrie.....	86
9 Ausblick.....	86
10 Referenzen.....	87

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Schematische Darstellung des Arbeitsorganigrammes.....	4
Abbildung 2.1: Das Synthetische Apertur Radar-Prinzip.....	8
Abbildung 2.2: Schaubild zur Abhängigkeit des Radarrückstreuquerschnittes von System- und Objektparametern, sowie die Verarbeitungsschritte des Rückstreusignals.	11
Abbildung 2.3: Polarisationsellipse im Koordinatensystem (Vektoren h und v) der Wellenausbreitung in Richtung des Feldvektors k	12
Abbildung 2.4: Spiegelnde (kohärente) und diffuse (inkohärente) Komponente der Strahlung, die auf eine (a) ideal ebene, (b) mäßig rauhe und (c) eine sehr rauhe Oberfläche trifft. Die diffuse Komponente ist als Wolke dargestellt. θ_0 =Einfallswinkel, θ_s =Hauptrichtung der ausfallenden Strahlung, Quelle: SCHANDA (1986).....	15
Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des Prinzips der SAR-Interferometrischen Aufnahme.	17
Abbildung 2.6: E-SAR des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt.	20
Abbildung 3.1: Vorgehensweise einer unüberwachten Klassifizierung.....	22
Abbildung 3.2: Darstellung der Gültigkeitsbereiche der theoretischen und verwendeten empirischen Modelle im $ks - kl$ Raum.	31
Abbildung 5.1: Verwendetes Profilometers zur Messung der Oberflächenrauigkeit. Beispielfoto aufgenommen im August 1997.....	46
Abbildung 6.1: Vorgehensweise der E-SAR Daten Bearbeitung.	48
Abbildung 7.1: Darstellung der vier Texturmaße nach HARALICK (1973). Von links nach rechts: <i>Angular Second Moment, Dissimilarity, Correlation und Entropy</i>	52
Abbildung 7.2: Segmentierung der Waldmaske in 24 Cluster.....	54
Abbildung 7.3: Schema der Vorgehensweise einer Hybride-Klassifikation im Pilotprojekt.....	54
Abbildung 7.4: Naturschutzgebiet Garbe (X- und L-Band Komposite, RGB Darstellung der drei Hauptkomponenten, unüberwachte Klassifikation, überwachte Klassifikation).....	56
Abbildung 7.5: Darstellung der Scatterplots von den Trainingsgebieten (a) und nach der ML-Klassifikation (b).....	58
Abbildung 7.6: Lütckenwischer Aussendeichbereich (a= RGB Darstellung der drei Hauptkomponenten, b= unüberwachte Klassifikation, c=überwachte Klassifikation).....	59
Abbildung 7.7: Darstellung des Scatterplots von den Trainingsgebieten (a) und nach der ML-Klasifikation (b) am Beispiel des Lütckenwischer Aussendeichbereiches.	60
Abbildung 7.8a: Lenzener Rückdeichungsbereich (RGB Darstellung der ersten drei Hauptkomponenten).....	61
Abbildung 7.8: (b, c): Lenzener Rückdeichungsbereich (b= ML-Klassifikation, c=Scatterplot der Trainingsgebiete).....	62
Abbildung 7.9: <i>Change Detection</i> Darstellung der drei Gebietsausschnitte (a=Naturschutzgebiet Garbe, b=Lütckenwischer Aussendeichbereich, c=Lenzener Rückdeichungsbereich).	63

Abbildung 7.10: Jahreszeitliche Bodenfeuchteverteilung m_v [vol. %] in einer Tiefe von 0-4 cm.	65
Abbildung 7.11: Jahreszeitliche oberflächennahe Bodenrauigkeitsverteilung s [cm].	66
Abbildung 7.12: Gültigkeitsbereich der theoretischen und empirischen Modelle im Vergleich zu den erhobenen Geländeparameter für April (rote Rhomben) und August (blaue Rhomben).	67
Abbildung 7.13: Rückstreuquerschnitt σ^0 [dB] für April 97 im L – Band dargestellt für die 18 Testflächen.	67
Abbildung 7.14: Rückstreuquerschnitt σ^0 [dB] für August 97 im L – Band dargestellt für die 18 Testflächen.	68
Abbildung 7.15: Bodenfeuchte gemessen versus invertiert für L-Band im April 1997 im Vergleich mit zwei Bodentiefen nach dem DUBOIS-Modell.	72
Abbildung 7.16: Bodenfeuchte gemessen versus invertiert für L-Band im August 1997 im Vergleich mit zwei Bodentiefen nach dem DUBOIS-Modell.	72
Abbildung 7.17: Rauigkeit gemessen versus invertiert für L-Band im April 1997 nach dem DUBOIS-Modell.	73
Abbildung 7.18: Rauigkeit gemessen versus invertiert für L-Band im August 1997 nach dem DUBOIS-Modell.	73
Abbildung 7.19: Bodenfeuchte gemessen versus invertiert für L-Band im April 1997 im Vergleich mit zwei Bodentiefen nach dem OH-Modell.	74
Abbildung 7.20: Bodenfeuchte gemessen versus invertiert für L-Band im August 1997 im Vergleich mit zwei Bodentiefen nach dem OH-Modell.	74
Abbildung 7.21: Rauigkeit gemessen versus invertiert für L-Band im April 1997 nach dem OH-Modell.	74
Abbildung 7.22: Rauigkeit gemessen versus invertiert für L-Band im August 1997 nach dem OH-Modell.	74
Abbildung 7.22 : Vergleich zwischen den Höhen gewonnen aus der SAR-Interferometrie und den Geländemessungen (Reihe1=Phasenbild, Reihe2=insitu-Messungen).	81

Tabellenverzeichnis

Tab.2.1: Auflistung der möglichen Polariastionsebenen [Grad].	13
Tab.2.3: Systemparameter des E-SAR (Stand 1997).	20
Tab.3.1: Gültigkeitsbereiche für die drei theoretischen Radarrückstreumodelle.	27
Tab.3.2: Gültigkeitsbereiche der empirischen Modelle.	30
Tab.4.1: Testareale und Testgebiete des Untersuchungsgebietes Lenzen-Cumlosen.	
Tab. 4.3: Niedersächsisches Landesverwaltungsamt-Landesvermessung (1993): Bodenkarte auf der Grundlage der Bodenschätzung (1976). 1:5000, Katasteramt Lüchow, Blatt 2935 (20),	

Schnackenburg-West und Blatt 2935 (21), Schnackenburg. *Dominierende Bodenart nach Feldbegehung und Fingerprobe eingeschätzt.	39
Tab.5.1: Übersicht der Flugexperimente, Geländekampagnen und verfügbare Datensätze (Stand 1998).	43
Tab.5.2 Auflistung der erhobenen Pflanzen- und Bodenparametern während der vier Geländekampagnen (GK).	44
Tab. 7.1: Varianz pro PCA- Kanal für die Gebietsausschnitte Lenzener Rückungsbereich, Lütckenwischer Außendeich, Naturschutzgebiet Garbe.	51
Tab.7.2: Scatterplot-Darstellung der Trainingsgebiete im Merkmalsraum der ersten (x-Achse) und zweiten (y-Achse) Hauptkomponete vom Gebietsausschnitt der Garbe.	57
Tab.7.3: Scatterplot-Darstellung der Trainingsgebiete im Merkmalsraum der ersten (x-Achse) und zweiten (y-Achse) Hauptkomponete vom Gebietsausschnitt des Lütckenwischer Aussendeichbereiches.	60
Tab 7.4.: Scatterplot-Darstellung der Trainingsgebiete im Merkmalsraum der ersten (x-Achse) und zweiten (y-Achse) Hauptkomponete vom Gebietsausschnitt des Lenzener Rückdeichungsbereiches.	61
Tab.7.5 : Bodenbedeckungsart und –bearbeitung während der zwei jahreszeitlichen Meßkampagnen.	64
Tab.7.6: Darstellung der ausgeschiedenen Pixel nach den Gültigkeitsbedingungen der empirischen Modelle.	71

1 Einleitung

Die klassische Kartierung und Vermessung der Erdoberfläche ist sehr arbeitsaufwendig und oft sehr kostspielig. Mit Hilfe der multiparametrischen Radaraufnahme sollen die Möglichkeiten und Grenzen der Radarfernerkundung von Flußauen aufgezeigt werden.

Die Erdoberfläche stellt die Grenzschicht zwischen Atmosphäre und Geosphäre dar. Am Boden findet ein Teil der Energieumwandlung, wie die Umwandlung von solarer Einstrahlung in sensible und latente Wärme statt, wobei der Boden selbst einen Zwischenspeicher darstellt, dessen Zustand räumlich und zeitlich sehr variabel ist. Der Bodenwassergehalt und die Rauigkeit der Oberfläche spielen eine große Rolle im Energiehaushalt der Erdoberfläche (WEIMANN 1997).

Die Rauigkeit (in der Hydraulik spricht man (DIN) nur noch von 'Rauheit'= Rauigkeit) kann auf zwei verschiedene Weisen charakterisiert werden: Aus der Bestimmung der Oberflächenstruktur (Vegetationszusammensetzung und -höhe, anthropogene Nutzung) einerseits und aus der Bestimmung der Turbulenzstruktur (Windprofile und Wasserströmungen) andererseits. Sie beeinflusst entscheidend die turbulenten Austauschströme zwischen Atmosphäre und Geosphäre, indem sie die Höhenzuordnung der Energieströme variiert und Abweichungen von der Konstanz bewirkt. Die Rauigkeit ist somit ein wichtiger Inputparameter bei der Modellierung, sowohl bei kleinskaligen Grenzschicht-, als auch bei großskaligen synoptischen Modellen (RADKE 1996).

Der Bodenwassergehalt bestimmt maßgeblich das Ausmaß von Evaporation, Transpiration, Oberflächenabfluß und Grundwasserneubildung. Selbst die Belastung von Oberflächengewässern und Grundwässern mit unerwünschten Stoffen wird indirekt von der Wasserbewegung im Boden beeinflusst. Die Zustandsgröße Bodenwassergehalt unterliegt witterungs-, substrat- und nutzungsbedingt vor allem in Oberflächennähe starken zeitlichen Schwankungen. Die Kenntnis des ungefähren Ausmaßes dieser zeitlichen Veränderung ist von wesentlicher Bedeutung für unterschiedlichste Forschungsaufgaben, wie

- die Prognose des Pflanzenwachstums,
- die Bestimmung des Zeitpunktes für die Aussaat,
- die Planung von Stilllegungsflächen in der Landwirtschaft,
- die Bestimmung der Gefährdung von landwirtschaftlich genutzten Flächen durch Winderosion und Vernässungszonen,
- die Analyse der Dynamik verschiedener physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse im Boden und auf der Bodenoberfläche,
- die Planung von (Natur)Schutzmaßnahmen oder von Schutzgebieten,
- die Bestimmung von Wasserhaushaltsparametern für hydrologische Modelle,
- die Bestimmung von Eingangsparametern für meteorologische Modelle.

Damit steht der Bodenwasserhaushalt und die Rauigkeit der Erdoberfläche im Fokus verschiedener Disziplinen, insbesondere der Agrar-, Bio- und Geowissenschaften. Gefordert wird nicht nur die Kenntnis des kleinräumigen Bodenwassergehaltes und der Rauigkeit an einigen wenigen Standorten, sondern auch eine ungefähre Angabe dieser Zustandsgrößen für große Gebiete. Mit den klassischen Methoden der Bodenphysik sind nur punktuelle in situ Messungen möglich, die einen hohen Arbeits- und Kostenaufwand mit sich führen und eine fehlende Flächenrepräsentanz für großräumige Gebiete aufweisen. Einen sinnvollen Beitrag leistet die Radarfernerkundung. Mit ihr kann erreicht werden,

- daß nur noch wenige Referenzmessungen nötig sind,

- daß Meßnetze ausgedünnt werden können,
- daß erstmalig flächendeckende Angaben zu Wasserhaushaltsparametern und Rauigkeiten möglich sind und
- daß auf diese Weise Kosten eingespart werden können (PONCET 1995).

Fernerkundungsdaten von Radarsensoren können von satelliten- oder flugzeuggetragenen Systemen, je nach gewünschter räumlicher Auflösung erhalten werden. Im Pilotprojekt "Pilotstudie Radarbefliegung" wurde zur Erfassung von Vorlandbereichen das flugzeuggetragene Radarsystem des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, welches im Institut für Hochfrequenztechnik entwickelt worden ist und eine hohe räumliche Auflösung besitzt, ausgewählt. Das *Experimentelle Synthetische Apertur Radar* (E-SAR) ist mit seiner vielfältigen Sensorconstellation, vier Frequenzen mit unterschiedlichen Polarisierungen und der Möglichkeit in zwei Modi SAR-Interferometrie zu betreiben, europaweit einzigartig.

Von besonderen Interesse innerhalb des Verbundvorhabens ist ein Raum südlich von Lenzen im Bundesland Brandenburg, die sogenannte Lenzer Wische, ein ausgedehntes, schwach reliefiertes Gebiet mit heterogenen Landschaftsstrukturen. Grund für ein gesteigertes Interesse ist die vom Brandenburgischen Landesumweltamt im Rahmen einer geplanten Deicherneuerung in Aussicht gestellte Möglichkeit, eine Deichrückverlegung im Elbevorland bei Lenzen vorzunehmen. Hierzu finden im Vorfeld intensive Untersuchungen von unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen zum Momentanzustand des Vorlandes statt. Im BMBF-Verbundvorhaben „Möglichkeiten und Grenzen der Auenwaldgeneration und Auenwaldentwicklung am Beispiel von Naturschutzprojekten an der Unteren Mittelbe “ (FKZ 0339571) der Landesanstalt für Großschutzgebiete Brandenburg (LAGS) sollen aus dem Ist-Zustand Leitbilder und Szenarien erarbeitet werden. Innerhalb der Pilotstudie sollte dazu mit einer neuen Methoden, der SAR-Interferometrie, deren Ergebnisse Eingang in die Strömungsmodelle des Rückdeichungsraumes erhalten sollen, die Erfassung des Mikroreliefs evaluiert werden. Von besonderem Interesse ist dabei die Erfassung der verlandeten rezenten Altarme und Rinnen, die als Leitbahnen für Qualmwasserströme, bei Hochwasserstand des Elbstromes, dienen. Daraus ergibt sich eine für diesen Raum problematische Vernässungssituation. Ein Verfahren zur potentiellen Erfassung dieser Rinnen, das der SAR-Interferometrie, sollte innerhalb der Pilotstudie erprobt werden. Die Pilotstudie sollte ergänzend zu dem Verbundvorhaben der LAGS, mit Hilfe der Radarfernerkundung, Parameter zu Beschreibung der Erdoberfläche liefern. Gleichzeitig wurde durch das gemeinsame Untersuchungsgebiet ein wissenschaftlicher Informationsaustausch zwischen den unterschiedlichen Disziplinen der LAGS sichergestellt.

Die Befliegungen fanden, um die Veränderungen des Vorlandbereiches erfassen zu können, zu zwei unterschiedlichen Jahreszeiten statt. Die Durchführungen der Befliegungen mußten wegen technischer Störungen zweimal verschoben werden. Mit der Verschiebung der Befliegungszeitpunkte ging auch eine Verschiebung des Arbeitszeitplanes einher. Die Befliegungen fanden letztendlich am 09. April. und 20. August. 1997 statt. Gleichzeitig zur Befliegung wurden radar-relevante Geländekartierungen durchgeführt, die verteilt im Untersuchungsgebiet auf sechs Testarealen stattfanden. Hierzu wurden Arbeitskräfte von der Naturwacht in Lenzen und Rühstädt sowie von Mitarbeitern, W. Stelter, P. Gaußmann und A. Heinken, der Projektgruppe aus dem Fachgebiet Nutztierhaltung der Landwirtschaftlichen Fakultät der Humboldt-Universität zur Verfügung gestellt. Von der Universität Berlin Fachbereich Geologie erklärten sich zwei Mitarbeiter, V. Spelmann und R. Wagner bereit die differentiellen GPS Aufnahmen während der Befliegung durchzuführen. Im Projekt tätige Praktikanten, J. Oberle, K. Frotscher, A. Bartsch und M. Herold wurden zu den Vorbereitungen, Durchführung und Nachbereitung der Geländekampagnen eingestetzt.

Mit der Verschiebung des Arbeitszeitplanes, um ca. acht Monate, konnten die extrahierten Parameter aus den Radardaten nicht rechtzeitig in die Untersuchungen zum Strömungsverhalten des Elbstromes verglichen und miteinbezogen werden.

Die Untersuchungsschwerpunkte lagen in den drei Themenbereichen,

- der Vegetations- und Landnutzungskartierung
- der Modellierung und Invertierung von Oberflächenparametern und
- der Höhenextraktion mit Hilfe der SAR-Interferometrie.

Im Pilotprojekt wurden mit Hilfe von drei Diplomarbeiten, SCHULZE (1998), ALLGEYR (1999) und BUSCHE (1999) Teilaspekte von zwei Themenbereiche intensiver bearbeitet, deren Informationen mit in die Auswertung eingeflossen sind. Die Arbeit von SCHULZE (1998) floß in die Landschaftsanalyse des Untersuchungsgebietes ein. Analysen und Ergebnisse zur Vegetations- und Landnutzungsklassifizierungen von ALLGEYR (1999) wurden im Endbericht integriert. Untersuchungen zur Modellierung und Invertierung von BUSCHE (1999) für einen Befliegungszeitpunkt, April 1997, wurden bei der jahrezeitlichen Analyse zwischen den zwei Radaraufnahmen berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Pilotstudie während der Projektförderungsdauer werden in Form dieses Endberichtes zusammenfassend dargestellt. Den Leitfaden im Bericht bildeten die drei Untersuchungsschwerpunkte. Die Gliederung der Kapitel, Stand der Forschung, Angewandte Methoden, Ergebnisse und Zusammenfassung wurde nach den genannten Themenbereichen bearbeitet. Da die Methode der Radarfernerkundung zur Kartierung der Erdoberfläche eine relativ neue Wissenschaftsdisziplin darstellt wurde ein theoretischer Einführungsteil, Radarfernerkundung, der in Kürze die wichtigsten Funktionsweisen und Abhängigkeiten der ausgesendeten elektromagnetischen Wellen beschreibt, eingeführt. Mit dem Wissen der bestehenden Abhängigkeiten der elektromagnetischen Wellen zu den Materialeigenschaften und geometrischen Eigenschaften des beleuchteten Mediums machte die Studie über das Untersuchungsgebietes, das im Kapitel Geographie des Untersuchungsgebietes beschrieben wird, notwendig. Gleichzeitig zum Radarüberflug stattfindenden Geländekartierungen und die Beschreibung der erhobenen Parameter werden im Kapitel Erhebung von Datenmaterial erläutert. Im Kapitel Datenaufbereitung wird die Vorgehensweise der Bildvorverarbeitung zur Extraktion von Parametern eingehend beschrieben. Die Radar-Bilddatenvorverarbeitung stellt ein wichtiges Kapitel in dieser Arbeit dar, hier mussten geeignete Wege gefunden werden um den radartypischen *Speckle*-Effekt zu minimieren. Die Schlußfolgerungen aus diesem Projekt werden im Kapitel Ausblick dargelegt.

1.1 Wissenschaftliche Zielsetzung

Mit Hilfe eines Fließdiagrammes werden schematisch im folgenden die Arbeitsschritte für die Erhebung, Aufbereitung und Auswertung der multiparametrischen Radardaten dargestellt.

Das Fließdiagramm entstand in Anlehnung folgender Fragen:

- Was soll untersucht werden ?
- Mit welcher Methodik findet die Untersuchung statt ?
- Welches sind die Radar-relevanten Parameter ?
- Wie werden die Radar-relevanten Parameter erhoben ?
- Wie findet die Aufbereitung der Daten statt ?
- Welches sind die zu erwartenden Ergebnisse?
- Wo sind Verknüpfungspunkte zu anderen wissenschaftlichen Disziplinen zu erwarten ?

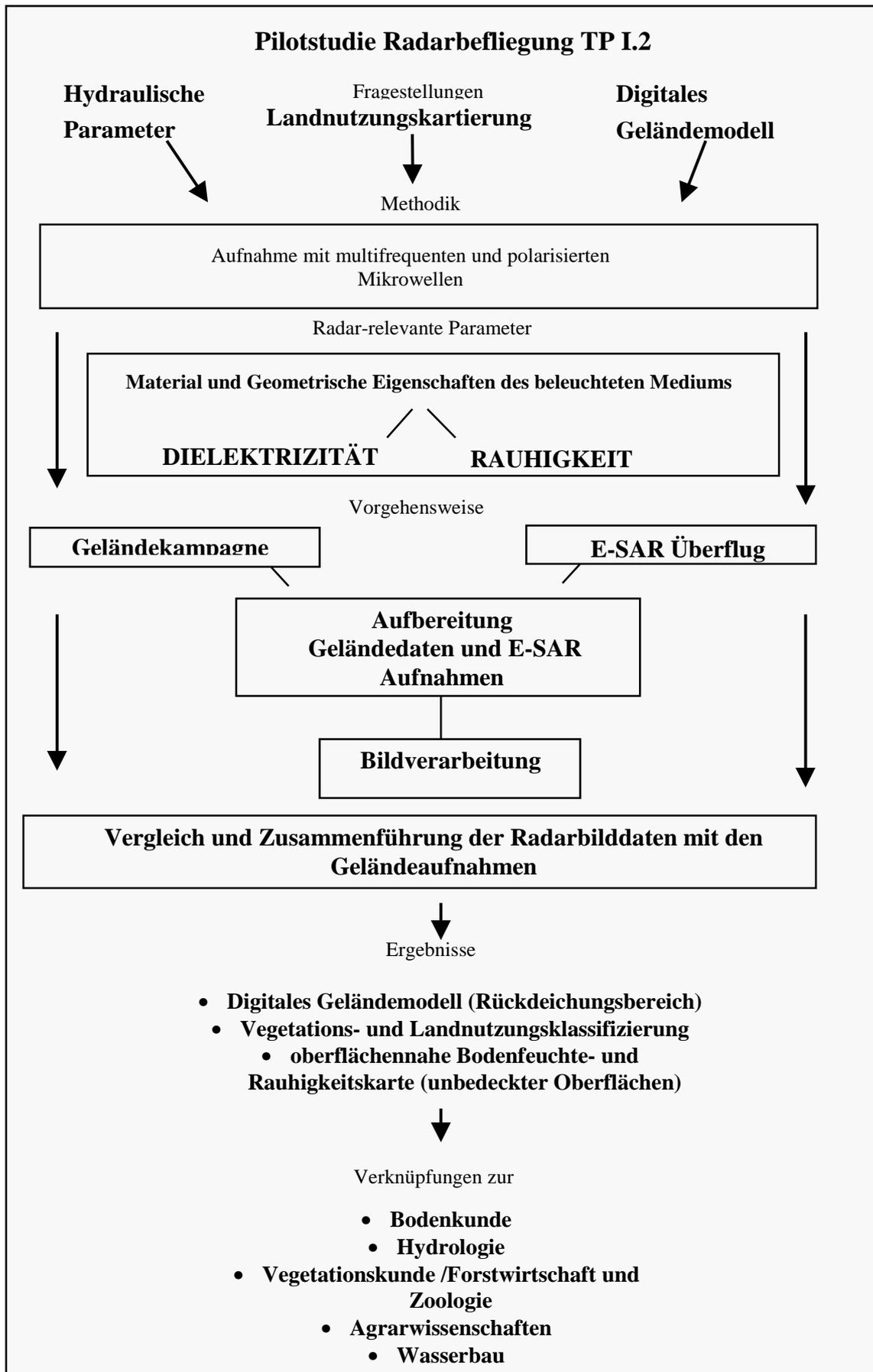


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung des Arbeitsorganigrammes

1.2 Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung in den drei bearbeiteten Themenbereichen in Hinblick auf die angewandten Methoden und Verfahren dargestellt. Die Entwicklung der Radartechnik reicht bis ins 19. Jahrhundert mit der Entdeckung der elektromagnetischen Wellen zurück. Die Radartechnik erfuhr vor allem in den Zeiten der Weltkriege, nachdem sein militärischer Nutzen erkannt wurde, immer wieder einen entwicklungstechnischen Aufschwung. Ab den fünfziger Jahren wurde die Leitungsfähigkeit des Radars mit der Entwicklung des Synthetischen Apertur Radars endgültig erkannt. In diesen Jahren wurde der Grundstein für eine Anwendung im militärischen wie auch im zivilen Bereich gelegt.

1.2.1 Vegetations- und Landnutzungsklassifikation

Eine der ersten Anwendungen in der Fernerkundung lag in der Extraktion von Informationen über die aktuelle Vegetation- und Landnutzungsbeschaffenheit von Landoberflächen. Die anfänglichen Untersuchungen fanden im optischen Bereich des Spektralspektrums statt (TOWNSHEND 1991). Die Nutzung von Satellitendaten über weite Bereiche von Landoberflächen wurden aber durch mehrere Punkte erschwert:

- Die Verfügbarkeit von Bilddaten war nicht immer gewährleistet.
- Die Eignung der Bilddaten zur Landoberflächenklassifikation wurde oft durch das Problem von atmosphärischen Störungen in Frage gestellt.
- Die Diskrepanz zwischen der möglichen Extraktion von physikalischen Parametern, entsprechend der Sensorkonfiguration, und den gewünschten zu extrahierenden Objektklassen zur Landoberflächenklassifikation erschwerte die Findung und die Interpretation der Objektklassen.

Zum letzten Punkt sollte hinzugefügt werden, dass die gewünschten Objektklassen nach den verfügbaren Objektklassen gewählt wurden und nicht nach den wirklichen zur Modellierung von Prozessen benötigten.

Der Einsatz von Mikrowellen zur Vegetations- und Landnutzungsklassifikation ist eine jüngere Methode, die vor allem bis Mitte der achtziger Jahre in den Tropen und gemäßigten Breiten hauptsächlich zur Prospektion von Bodenschätzen eingesetzt worden ist. Ein verstärkter Einsatz der Radarfernerkundung für geographische, biologische und ökologische Fragestellungen entwickelte sich nach und nach mit dem steigenden physikalischen Verständnis für Radar-Bilddaten, die neue Möglichkeiten zur Objektklassenbildung und deren Interpretation lieferte.

Zur Vegetations- und Landnutzungsklassifikation kommen sowohl im Optischen- wie auch im Mikrowellenbereich statistische Ansätze zur Anwendung. Die weitverbreiteten Verfahren der Pixel- und Texturklassifikatoren beruhen auf einer multivariaten statistischen Auswertung der Bildelemente. Sie verfolgen das Ziel Bildelemente von Grauwertmatrizen nach spektralen Signaturen zu gruppieren und so als thematische Klassen quantitativ auszuweisen und/oder ihr Vorkommen in thematischen Karten darzustellen. (DOBSON 1995, HABERMEYER 1996, SCHMULLIUS 1998, RICHARD 1998, SMITS 1999, KOUSKOULAS 1999, SCHMIDT 1997). In der Radarfernerkundung werden hierzu die Amplitudendaten in den verschiedenen Frequenzen und Polarisierungen verwendet.

Eine weitere Betrachtungsweise zur Klassifizierung im Bereich der Radarfernerkundung stellt der jüngere physikalische Ansatz dar, der die unterschiedlichen Streumechanismen, hervorgerufen durch das Material und die geometrischen Eigenschaften eines beleuchteten Objekts, berücksichtigt. In diesem reinen physikalischen Ansatz werden die Streumechanismen, die jedem Objekt eigen sind, mit Hilfe der *Decompositionsmethode* getrennt und einer Objektklasse geordnet (POTTIER 1999, LEE 1998, FERRO-FAMILIE 1999, HELLMANN 1999). Dabei ist es wichtig die Beziehung zwischen der ausgesandten elektromagnetischen

Welle, die Reaktion mit dem beleuchteten Objekt und deren Rückstreuung zu verstehen. Um eine Klassifikation im Sinne der *Decompositionsmethode* zu erstellen wird ein komplexer Radardatensatz mit vollpolarimetrischer Information benötigt.

In dieser Arbeit kam der statistische Klassifizierungsansatz zur Anwendung. Ausschlaggebend für diese Entscheidung war die gewünschte Nutzung des gesamten Datensatzes mit den Frequenzen im X-, C- und L-Band. Die Frequenzen im X- und C-Band stehen nach der Flugzeugkonstellation des E-SAR nur als gleichpolarisierte Bilddaten zur Verfügung. Die verwendeten Klassifikationen, Pixel- und Texturklassifikatoren, werden in Kapitel 3.1 und die erzielten Ergebnisse in Kapitel 7.1 dargestellt.

1.2.2 Modellierung und Invertierung von Oberflächenparameter

Die Entwicklung von neuen Techniken und Modellen zur Bestimmung von objektspezifischen Parametern, wie Oberflächenrauigkeit, -bodenfeuchte und Objektart, stellt seit Jahren ein begehrtes wissenschaftliches Thema dar. Seit den siebziger Jahren fanden zahlreiche Untersuchungen zur qualitativen und quantitativen Bestimmung von Objektparametern aus Radarsensoren, sowohl von Satelliten als auch flugzeuggetragenen Systemen statt. Für die quantitative Bestimmung der modellrelevanten Boden- und Bestandsparameter werden die Rückstreu-Eigenschaften hinsichtlich ihrer Größenrelation, Ausrichtungsgenauigkeit, Polarisations-, Frequenz- und Einfallswinkelabhängigkeit in bezug zu den erhobenen Geländeparametern interpretiert. Untersuchungen dieser Art wurden oft zunächst mit Scatterometern, später auch mit abbildenden Systemen durchgeführt. Aus der Vielzahl der Untersuchungen kann Schlußfolgernd festgestellt werden, daß zwischen dem Radarsignal und dem Bodenwassergehalt in Volumenprozent, Gewichtsprozent oder Prozent der Feldkapazität ein exponentieller bzw. für engere Wertebereiche ein linearer Zusammenhang besteht. Die ersten Anwendungen fanden mit Regressionsanalysen, dann mit Rückstreu-Modellen und später mit Inversionsmodellen statt. Die ersten Ergebnisse zeigten, daß

- die Regressionsanalysen regional unterschiedlich sind und damit keine Übertragung auf andere Regionen erlauben. Die regionalen Unterschiede ergeben sich aus den verschiedenen geologischen Ausgangssubstraten für die Bodenbildung, die sich hinsichtlich der Textur, Struktur, Humusgehalt, Quellungs- und Schrumpfungseigenschaften und auch der Reliefposition unterscheiden. Die meisten Untersuchungen dieser Art wurden in Gebieten mit geringer räumlicher Variabilität der Substrate durchgeführt, die Idealvoraussetzungen für solche Untersuchungen darstellen.
- der Einsatz von Rückstreuomodellen meist an Hand von wenigen Referenzdaten überprüft worden ist, da die Verfügbarkeit an Radarsystemen mit unterschiedlichen geometrischen Auflösungen, Frequenzen, Polarisationen und Einfallswinkeln nicht bereitstand (Flugzeug, Shuttle oder Satellit).
- die Inversionsmodelle stecken, in Hinsicht der Genauigkeit, noch in den Anfängen und bedürfen noch der weiteren wissenschaftlichen Forschung. Am vielversprechendsten waren hier Untersuchungen mit polarimetrischen SAR-Daten.

Die Entwicklung und Validierung von Algorithmen, die übertragbar sind, ist heute noch nicht abgeschlossen. In dieser Arbeit werden die Bodenparameter Oberflächenbodenfeuchte und -rauigkeit mit dem Verständnis der Radarfernerkundung definiert und hinsichtlich ihrer Sensorabhängigkeit beschrieben. Zur Extraktion dieser Parameter wurden zwei vielversprechende, ein semi-empirisches und ein empirisches, Inversionsmodelle verwendet, deren Ergebnisse im Kapitel 7.2 vorgestellt werden.

1.2.3 SAR-Interferometrie

Mit der SAR-Interferometrie (INSAR) konnte sich in den letzten Jahren eine neuartige Disziplin etablieren. Der große Stellenwert, der diesem Verfahren zukommt, ist vor allem auf die Möglichkeit zurückzuführen, die Topographie des abgebildeten Geländes zu extrahieren (BAMLER & HARTL 1997). Neben der Messung der absoluten Geländehöhe ist es mit der differenziellen SAR-Interferometrie auch möglich, kleinste Veränderungen der Topographie in der Größenordnung von Bruchteilen der verwendeten Wellenlänge zu detektieren. Dieses differentielle Verfahren eröffnet neue Möglichkeiten für die Erforschung dynamischer Prozesse der Erdkruste (ZEBKER 1994, MASSONET 1995, KWOK & FAHNENSTOCK 1996). In der vorliegenden Arbeit werden die physikalischen Grundlagen der SAR-Interferometrie präsentiert und es wird ein theoretischer Vergleich zwischen den Geländemodellen, welches vom Laser-Scanner und SAR-Interferometrie erhalten wurden durchgeführt. In Kapitel 2.2 werden in kürze die theoretischen Grundlagen der SAR-Interferometrie erläutert und in Kapitel 7.3 wird das Laser-Scanner Verfahren der SAR-Interferometrie gegenübergestellt und die Vor- und Nachteile beider Methoden zur Generierung von digitalen Oberflächenmodellen diskutiert.

2 Fernerkundung und Mikrowellen

Das Wort Radar ist abgeleitet aus dem englischen *Radio Detection and Ranging*. Es beschreibt die ursprünglich einem Radar zugeordneten Aufgaben der Lokalisierung und Entfernungsmessung von Objekten mittels Radiowellen.

Radarsysteme arbeiten im Mikrowellenbereich. Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge von 1 [m] bis 1 [mm], dies entspricht einem Frequenzbereich von 1.2 [GHz] bis 0.3 [GHz]. Im Vergleich dazu wird der Spektralbereich des sichtbaren Lichtes durch Wellenlängen von 0.4 bis 0.7 [μm] präsentiert. Der Spektralbereich der Mikrowellen wird in „Bänder“ unterteilt. Die Bezeichnung der Bänder geht auf eine ursprünglich aus Geheimhaltungsgründen gewählte Codierung zurück.

Die von aktiven Mikrowellensensoren ausgesandten Signale dringen bei vegetationsfreien Flächen in die obersten Zentimeter des Bodens ein. Das zurückkehrende Signal, auch als Rückstreuoeffizient bezeichnet, wird am Sensor gespeichert und ist von der Bodenfeuchte und Rauigkeit abhängig.

Die deutlichen Vorteile der Mikrowellenfernerkundung gegenüber den optischen Fernerkundungssystemen liegen vor allem in den vier Eigenschaften, die einen komplementären Einsatz ermöglichen:

- In der Unabhängigkeit von der natürlichen Beleuchtung und Bewölkung,
- In der Fähigkeit in natürliche Oberflächenmaterialien einzudringen und sie zu durchdringen,
- In der Information über Oberflächenrauigkeit und Feuchtigkeitsgehalt des streuenden Mediums,
- In der Möglichkeit mit dem Radar die Entfernung und Geschwindigkeit des beleuchteten Objektes zu bestimmen.

Im Rahmen dieses Projektes wird das flugzeuggetragene Experimentelle Synthetic Aperture Radar (E-SAR) des Institutes für Hochfrequenztechnik des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt verwendet.

2.1 Synthetisches Apertur Radar

Im folgenden soll das Prinzip der synthetischen Apertur nur kurz vorgestellt werden, sehr gute ausführlichere Abhandlungen können in TOMIYASU (1978), HOVANESSIAN (1980), ELACHI (1988) und CURLANDER (1990) nachgelesen werden.

Abbildende Radar-Systeme liefern eine zweidimensionale Darstellung des mit elektromagnetischen Wellen beleuchteten Mediums. Sie unterscheiden sich von anderen bekannten Abbildungsverfahren durch ihre aktive Betriebsweise. Im Gegensatz zu passiven Fernerkundungsverfahren, die eine Szene durch Aufnahme des reflektierten Sonnenlichts oder der emittierten Wärmestrahlung abbilden, beleuchten Radar-Systeme aktiv eine Szene und nehmen die an der Szene gestreute Strahlung auf. Dadurch können sie unabhängig von Tageszeit und Wetterbedingungen eingesetzt werden. Die von der Szene gestreute Strahlung kann dabei an dem selben Ort wie der Sender, monostatische Systeme, oder von einer anderen Position aus, bistatische Systeme, gemessen werden.

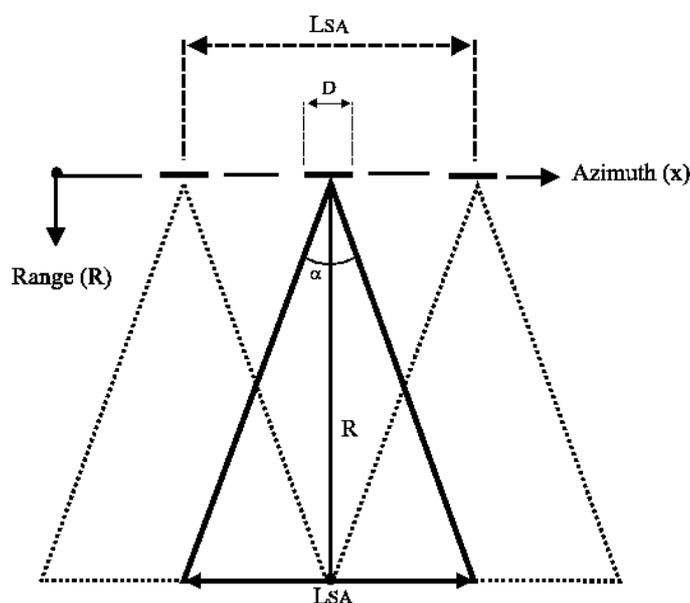


Abbildung 2.1: Das Synthetische Apertur Radar-Prinzip

In der Radarfernerkundung sind monostatische Systeme am häufigsten anzutreffen. Solche Sensoren bestehen im allgemeinen aus einem Mikrowellensender, der in einen gepulsten Modus betrieben wird und Mikrowellenimpulse erzeugt, einer Antenne, die diese Impulse gerichtet sendet und das zurückgestreute Signal empfängt, und einen Empfänger, der das empfangene Signal schließlich aufnimmt. Der Sensor wird auf eine bewegliche Plattform, Flugzeug oder Satelliten, angebracht und beleuchtet in einer Schrägsicht senkrecht zur Bewegungsrichtung eine Szene. Diese Beleuchtungsrichtung wird als Entfernungsrichtung oder Range-Richtung bezeichnet. Durch die Bewegung der Plattform ergibt sich eine Abtastung der abgebildeten Szene in Richtung der Umlaufbahn, die als Azimuth-Richtung bezeichnet wird.

Für jede Art von Sensoren, die es ermöglichen eine Szene abzubilden, ist das Auflösungsvermögen eines der entscheidenden Qualitätskriterien. Darunter wird der minimale Abstand, den zwei benachbarte Objekte in einer Szene haben können, um vom Sensor noch als getrennt voneinander erfaßt zu werden, verstanden.

Bei Radar-Systemen ist die Signallaufzeit proportional zur Entfernung der einzelnen Streuer in der Szene: Ein gesendeter Puls durchläuft mit Lichtgeschwindigkeit c den Abstand zu einem Streuer, wird an ihm gestreut und von dem Sensor empfangen. Streuer, die sich in unterschiedlichen Entfernungen befinden können aufgrund der unterschiedlichen Signal-Laufzeiten voneinander unterschieden werden. Wird jedoch der

Abstand zweier Streuer so klein, daß sich die empfangenen Signale überlagern, so können sie nicht mehr voneinander unterschieden werden. Somit hängt das Auflösungsvermögen in der Entfernungsrichtung (Range)

$$\rho_{rg} = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{W} \quad (2.1)$$

nur von der effektiven Pulslänge τ ab oder der Bandbreite W des gesendeten Signals:

Aus Gleichung 2.1 ergibt sich, daß ein System mit einer Bandbreite von 100 [MHz] ein Auflösungsvermögen von 1.5 [m] in Entfernungsrichtung erzielen kann. Technologische Einschränkungen jedoch machen die Konstruktion von Sendern, die in der Lage sind sehr kurzer Pulse mit einer sehr hohen Leistung zu senden, die nötig ist um ein genügend hohes Signal empfangen zu können, schwierig und umständlich. Eine elegante Möglichkeit dieses Problem zu umgehen, ist anstatt eines sehr kurzen Pulses, einen linear-frequenzmodulierten Puls, dessen Produkt der Zeit-Bandbreite größer als eins ist zu senden. Hiermit kann einerseits die große Bandbreite erreicht werden, die notwendig für ein hohes Auflösungsvermögen ist und andererseits wird die Energie des Pulses über eine relativ lange Impulsdauer verteilt. Nach dem Empfang ist es möglich, unter Anwendung des Optimalfilterprinzips, das empfangene Signal zu einem Puls mit dem Produkt der Zeit-Bandbreite zu komprimieren und dadurch die gewünschte Auflösung zu erhalten.

In der azimuthalen Richtung hängt die Auflösung von der Winkelauflösung α der Antenne ab, die proportional zur verwendeten Wellenlänge und umgekehrt proportional zu realen Antennenlänge D ist:

$$\alpha \cong \frac{\lambda}{D} \quad (2.2)$$

Die räumliche Auflösung in einer bestimmten Entfernung R ergibt sich dann aus dem Produkt der Winkelauflösung α mit der Entfernung R

$$\rho_{az} = \alpha R \cong \frac{\lambda}{D} R \quad (2.3)$$

Zu erkennen ist, daß aus einer fixen Winkelauflösung eine räumliche Auflösung resultiert, die mit steigender Entfernung zum Sensor abnimmt. Um auch bei großen Entfernungen eine geringe Auflösung zu erhalten, kann entweder eine kleinere Wellenlänge gewählt werden oder die Länge der Antenne vergrößert werden. Ersteres ist nicht erwünscht, da die verwendete Wellenlänge entscheidend für den Informationsgehalt der Abbildung ist und andererseits sind der Erzeugung sehr großer Antennen, wie sie für ein satellitgestütztes Radar-System gebraucht würden in der Realisierung Grenzen gesetzt.

SAR Systeme sind in der Lage auch mit einer kleinen Antenne mit Hilfe des Prinzips der synthetischen Apertur eine hohe Auflösung zu erreichen: Die durch einen Antennenarray empfangenen Signale eines Streuers, können durch geeignete kohärente Integration prozessiert werden, um eine fiktive lange Antenne mit entsprechender hoher Auflösung zu synthetisieren. Im Falle vom SAR wird nicht ein Antennenarray sondern eine einzelne Antenne verwendet, die durch die Bewegung des Sensors das von einem Streuer gestreute Signal an unterschiedlichen Orten mißt. Unter der Voraussetzung, daß der Streuer stationär ist, kann damit eine synthetischer Apertur aufgebaut werden. Ähnlich wie bei dem Radar mit realen Apertur, ergibt sich die Winkelauflösung dieser synthetischen Apertur als

$$\alpha_{SA} \cong \frac{\lambda}{2L_{SA}} \quad (2.4)$$

wobei L_{SA} die Länge der synthetischen Apertur ist. Die maximale erreichbare synthetische Apertur entspricht der Länge die ein Streuer von der realen Apertur beleuchtet wird (siehe Abbildung 2.1).

$$L_{SA} = \alpha R = \frac{\lambda}{D} R \quad (2.5)$$

Es ist wichtig zu erkennen, daß die Länge der synthetischen Apertur proportional zur Entfernung des Streuers und umgekehrt proportional zu realen Aperturlänge ist. Wird 2.4 in 2.5 eingesetzt so ergibt sich für die Winkelauflösung der synthetischen Apertur:

$$\alpha_{SA} = \frac{D}{2R} \quad (2.6)$$

Aufgrund des mit der Entfernung größer werdenden synthetischen Aperturlänge ist die Winkelauflösung nicht mehr konstant, sondern verbessert sich jetzt mit zunehmender Entfernung. Die maximal erreichbare räumliche Auflösung in einer Entfernung R ergibt sich jetzt

$$\rho_{az} = \alpha_{SA} R = \frac{D}{2} \quad (2.7)$$

Aus Gleichung 2.7 ergibt sich, daß die theoretisch erreichbare azimuthale Auflösung eines SAR-Systems unabhängig der Entfernung und der verwendeten Wellenlänge ist und nur umgekehrt proportional von der Länge der realen Antenne abhängt. Diese Eigenschaft macht es möglich hochauflösende SAR-Systeme nicht nur auf Flugzeug aber auch auf Satelliten-Plattformen operieren zu lassen.

SAR-Bilder weisen eine gewisse Körnigkeit auf, die charakteristisch für kohärente Abbildungsverfahren, mit der verwendeten Wellenlänge kleiner als die Sensorauflösung, ist. Dieses Phänomen wird als Speckle Effekt bezeichnet und entsteht aus der Überlagerung von einzelnen zurückgestreuten Elementarstreuer innerhalb einer Auflösungszelle. Die einzelnen Beiträge der unterschiedlichen Elementarstreuer addieren sich vektoriell und ergeben einen Vektor, dessen Amplitude und Phase dem gemessenen Signal entsprechen. Ist die Lage der Elementarstreuer innerhalb der Auflösungszelle statistisch, wie es der Fall für natürliche Oberflächen ist, so kommt es zu einer Variation der Amplitude und Phase des gemessenen Signals von Auflösungszelle zu Auflösungszelle.

Dieser Speckle-Effekt ist bei der Interpretation der Radar Bilddaten störend. Um den Speckle zu reduzieren und damit auch die radiometrische Auflösung zu verbessern gibt es eine Reihe von unterschiedlichen Verfahren. Zur Anwendung kommen vor allem Filter- und Multilookverfahren. Mit der Reduzierung des Speckels muß jedoch auch eine Reduzierung der geometrischen Auflösung in Kauf genommen werden.

2.1.1 Interaktion der elektromagnetischen Welle mit einer Oberfläche

Die elektromagnetischen Wellen, die auf eine Oberfläche auftreten, können gestreut, transmittiert und/oder absorbiert werden. Die relativen Anteile jedes dieser Prozesse und ihre richtungsspezifische Charakteristik werden durch ihre dielektrischen Eigenschaften des Mediums Boden und durch die Bedingungen der Grenzfläche Luft/Bodenoberfläche bestimmt.

Die von einem Radar aufgelöste Fläche besteht aus mehreren elementaren Streuern (point scatterers). Deshalb wird die empfangene Energie über die Fläche A einer Auflösungszelle integriert. Die Punktstreuer werden als stochastisch im Raum verteilt (distributed target) betrachtet und tragen zum rückgestreuten Summensignal bei.

Die Radargleichung beschreibt die von der Antenne empfangene Energie unter Berücksichtigung der ausgesendeten Energie, der Antennencharakteristik, der Frequenz, der Polarisation, des Einfallswinkels und der Streueigenschaften:

$$P_{rp}(\Theta) = \iint_A \frac{P_{tq} G^2(\Theta) \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_{pq} \quad (2.8)$$

wobei

P_r = Empfangsenergie

P_t = Sendeenergie

Θ = Einfallswinkel

G = Antennengewinn

R = Distanz zwischen Antenne und Auflösungszelle

σ^0 = Rückstreuquerschnitt (radar cross section)

pq = Empfangene und ausgesendete Polarisation

λ = Wellenlänge

Der zur Radarantenne hin zurückgestreute Anteil wird als Rückstreuung (back scatter) bezeichnet. Der Anteil der rückgestreuten Energie eines Punktzieles wird als Radar-Rückstreuquerschnitt (radar cross section) bezeichnet, deren Einheit in [m²] angegeben wird. Bei Betrachtung eines Flächenzieles wird der Radar-Rückstreuquerschnitt auf eine Fläche bezogen und erhält folgenden Ausdruck:

wobei

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A_p} \quad (2.9)$$

σ^0 = Normalisierter Radarrückstreuquerschnitt

A_p = Auflösungszelle

Das σ^0 wird mit einem logarithmischen Maß in Dezibel [dB] angegeben (HOLECZ 1993). Der normalisierte Radarrückstreuquerschnitt wird von den Objektspezifischenparametern, die Dielektrizitätskonstante, die Oberflächenrauigkeit sowie den Objekteigenschaften (Struktur und Verteilung von Inhomogenitäten unter der Geländeoberfläche) und den Sensorparametern, die Frequenz, die Polarisation und den Einfallswinkel beeinflusst. Im folgenden werden die Einflüsse der Sensorparameter auf die Objektspezifischenparameter (Dielektrizitätskonstante und Oberflächenrauigkeit) beschrieben. In Kapitel 2.1.1.1 wird die Funktionsweise des Sensorparameter, die Polarisation, kurz beschrieben. Dieser Sensorparameter spielt bei der Modellierung und Invertierung, sowohl des Rückstreusignals als auch der geophysikalischen Parameter eine entscheidende Rolle.

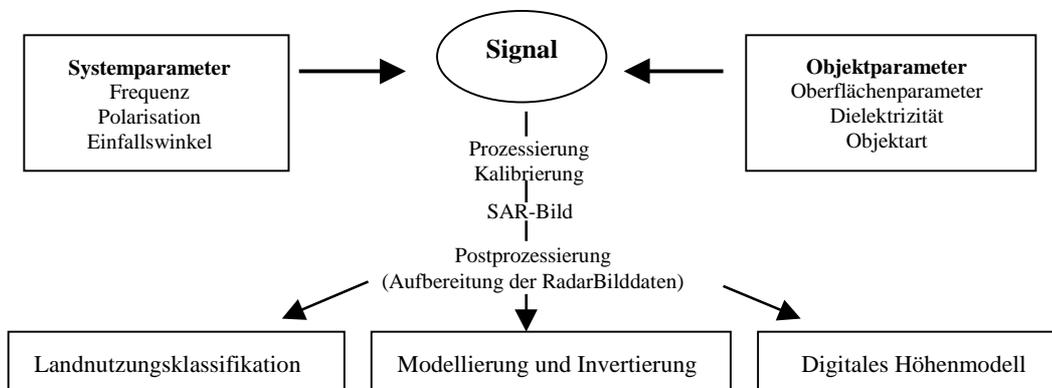


Abbildung 2.2: Schaubild zur Abhängigkeit des Radarrückstreuquerschnittes von System- und Objektparametern, sowie die Verarbeitungsschritte des Rückstreusignals

2.1.1.1 Polarisation

Elektromagnetische Wellen bestehen aus einem elektrischen und einem magnetischen Feld, die orthogonal zueinander und orthogonal zur Ausbreitungsrichtung stehen (Transversalwellen). Die Polarisation beschreibt dabei die Orientierung des elektrischen Feld-Vektors. Im allgemeinen Fall bewegt sich die Spitze des elektrischen Feld-Vektors entlang einer Ellipse, die als Polarisationsellipse bekannt ist. Ihre geometrischen Eigenschaften können vollständig durch zwei Winkel beschrieben werden, dem Orientierungswinkel ψ und dem Elliptizitätswinkel χ . Der Orientierungswinkel ψ ist der Winkel der Ellipsenachse zur Horizontalen. Er nimmt Werte zwischen 0° und 180° an. Der Elliptizitätswinkel χ beschreibt die Form der Ellipse und nimmt Werte zwischen -45° und 45° an. Bei $\chi = 0^\circ$ entartet die Ellipse zu einer Geraden entlang derer der elektrische Feld-Vektor schwingt. Die Welle ist dann linear polarisiert. Bei $\chi = 45^\circ$ erhält die Ellipse die Form eines Kreises und die Welle ist dann zirkular polarisiert. Die Winkel zwischen 0° und 45° beschreiben eine elliptisch polarisierte Wellen. Das Vorzeichen des Elliptizitätswinkels gibt den Rotationssinn des elektrischen Feld-Vektors entlang der Ellipse an. Nach der üblichen Konvention in der Radarfernerkundung bezeichnet ein positiver Elliptizitätswinkel eine linksdrehende Polarisation während ein negativer eine rechtsdrehende Polarisation beschreibt.

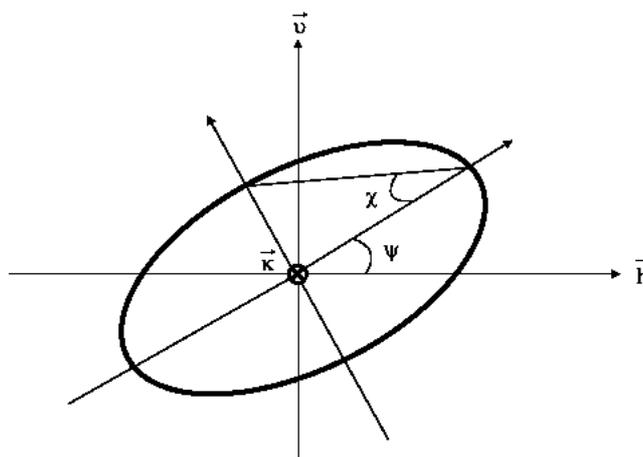


Abbildung 2.3: Polarisationsellipse im Koordinatensystem (Vektoren \vec{h} und \vec{v}) der Wellenausbreitung in Richtung des Feldvektors \vec{k} .

Radarsignale können in verschiedenen Polarisationen gesendet bzw. empfangen werden. Voll-polarimetrische Systeme verwenden zwei orthogonale Polarisationen um die Streumatrix $[S]$ jeder Auflösungszelle zu messen. Diese 2×2 komplexe Matrix beschreibt vollständig das polarimetrische Verhalten eines Streuers. Aufgrund der einfacheren Realisierbarkeit werden in der Radarfernerkundung polarimetrische Systeme mit linearen Polarisationen betrieben, die hauptsächlich Horizontal und Vertikal polarisiert sind. Damit lassen sich 4 Elemente der Streumatrix in der Horizontal/Vertikal linear polarisierten Basis messen:

σ_{HH} : Rückstreukoeffizient bei

Horizontal gesendeter und Horizontal empfangener Polarisation

σ_{VV} : Rückstreukoeffizient bei

Vertikal gesendeter und Vertikal empfangener Polarisation

σ_{HV} : Rückstreukoeffizient bei

Vertikal gesendeter und Horizontal empfangener Polarisation

σ_{VH} : Rückstreuoeffizient bei
Horizontal gesendeter und Vertikal empfangener Polarisation

Die beiden ersten Rückstreuoeffizienten werden als Gleich-Polarisiert, während die letzten zwei als Kreuz-Polarisiert bezeichnet werden.

	Vertikal	Horizontal	Linear	Links Zirkular	Rechts Zirkular
Orientierungswinkel Ψ	0°	90°	θ°	-90° bis 90°	-90° bis 90°
Elliptizitätswinkel X	0°	0°	0°	-45°	45°

Tab. 2.1: Auflistung der möglichen Polariastionsebenen [Grad]

2.1.1.2 Dielektrizitätskonstante

Unter dem oberflächennahen Bodenwasser wird in der Radarfernerkundung nur der Teil des Wassers im Boden verstanden, der als temporärer Effekt des versickerten Niederschlages in den obersten Zentimetern des Bodenprofils auftritt. Der die Radarrückstreuung beeinflussende Bereich ist geringer mächtig als die Wurzelzone, die für landwirtschaftliche Bestände mit 0.8 – 1.5 [m] zu veranschlagen ist. Die Dauer der vorübergehenden Speicherung kann wenige Stunden, bis zu mehreren Monaten anhalten. Dabei wird die Wasserbewegung von drei Mechanismen beeinflusst, einmal durch die Schwerkraft, die Evaporation an der Oberfläche und die Bindungskräfte des Wassers in unterschiedlichen Bodensubstraten (PRIETZSCH 1998).

Die Beziehung zwischen der Dielektrizitätskonstante und dem Bodenwassergehalt ist nicht linear. In der Literatur werden mehrere Methoden zur Ableitung des Bodenwassergehaltes als Funktion der Dielektrizitätskonstante und umgekehrt vorgeschlagen (HALLIKAINEN 1985, DOBSON & ULABY 1986, STACHEDER 1997). In dieser Arbeit kam die Methode von TOPP et al. (1980) zur Anwendung, die ein Polynom dritten Grades verwendet. Das Polynom wurde aus experimentellen Messungen erhoben und ist unabhängig von der Bodenart.

Die Dielektrizitätskonstante wird in der Wellentheorie mit der Brechung oder Reflexion einer Welle an der Grenzschicht zwischen zwei unterschiedlich dichten Medien beschrieben (Gesetz von Snellius). Der Brechungsindex ist eine Funktion vom Einfallswinkel und der Geschwindigkeit der Einfallenden Welle zum Brechungswinkel und Ausbreitungsgeschwindigkeit der gebrochenen Welle an einer Grenzfläche. Der Brechungsindex wird als die Wurzel aus der Dielektrizitätskonstante definiert und bezieht sich auf das Vakuum oder die Luft. Die Dielektrizitätskonstante charakterisiert das Verhalten von Nichtleitern beim Einwirken eines elektrischen Feldes und wird von mehreren Parametern (Frequenz, Temperatur, Salinität, ferromagnetische Substanzen) beeinflusst. Unter Einwirkung eines elektrischen Feldes auf einen Nichtleiter kommt es zur einer Auslenkung der geladenen Teilchen aus ihrer Gleichgewichtslage und es bilden sich Dipole aus. Bei der Orientierung der Dipole wird Energie vom Dielektrikum gespeichert. Ein Teil dieser Energie wird als Wärme gespeichert und geht durch innere Reibung verloren.

Die relative Dielektrizitätskonstante wird bei der komplexen Schreibweise einer Welle in einen Realteil und Imaginärteil unterteilt.

$$\epsilon = \epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.10)$$

Der Realteil ε' bezieht sich auf die relative Durchlässigkeit des Mediums, während der Imaginärteil ε'' dem Dämpfungsfaktor des Materials entspricht. Die Größe ε'' beschreibt die Fähigkeit des Mediums eine Welle zu absorbieren und ihre Energie in eine andere Energieform umzuwandeln.

$$\delta_p = \frac{\lambda \sqrt{\varepsilon''}}{2\pi \varepsilon'} \quad (2.11)$$

Für die Berechnung der Dämpfung des elektrischen Feldes durch ein Medium wird mittels der Dielektrizitätskonstante ermittelt. Unter der Annahme, daß die eindringende Welle sich exponentiell mit der Tiefe abschwächt, beträgt die Eindringtiefe δ_p der Wellenlänge:

Für die meisten natürlichen Medien wird angenommen, daß $\varepsilon'' \ll \varepsilon'$ ist. Die Eindringtiefe δ_p wird per Definition um 1/e-fache ($e = \text{Euler'sche Zahl} \approx 2.7183$) ihres Ausgangswertes gedämpft (SCHANDA 1986). Mit größer werdender Wellenlänge und konstanter Dielektrizitätskonstante steigt die Eindringtiefe. Steigt gleichzeitig der Wert der Dielektrizitätskonstante so bleibt die Eindringtiefe ab einem gewissen Sättigungsgrad konstant.

Die Reflexionseigenschaften zweier Oberflächen mit unterschiedlichen dielektrischen Zuständen kann durch die Fresnel'sche Reflektivität Γ für ko-polarisierte Zustände ($h = \text{horizontale}$ und $v = \text{vertikale Polarisation}$) beschrieben werden. Sie beschreibt die Reflexionseigenschaften an einer Grenzschicht eines Mediums mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften. Sie stellt eine Funktion der relativen Dielektrizitätskonstante ε' , der Permeabilität μ und des Einfallswinkels θ dar.

$$\Gamma_h(\Theta) = \left| \frac{\mu \cos \Theta - \sqrt{\mu \varepsilon' - \sin^2 \Theta}}{\mu \cos \Theta + \sqrt{\mu \varepsilon' - \sin^2 \Theta}} \right|^2 \quad (2.12) \quad \Gamma_v(\Theta) = \left| \frac{\varepsilon' \cos \Theta - \sqrt{\mu \varepsilon' - \sin^2 \Theta}}{\varepsilon' \cos \Theta + \sqrt{\mu \varepsilon' - \sin^2 \Theta}} \right|^2 \quad (2.13)$$

Die Permeabilität μ des Mediums ist im Fall von natürlichen Oberflächen $\mu = 1$. Die Reflexion erfolgt spiegelnd, Vorwärtsstreuung, wenn die Einstrahlung auf eine Oberfläche mit hoher Dielektrizitätskonstante und nach der Rauigkeitsdefinition auf eine glatte Fläche fällt.

2.1.1.3 Oberflächenrauigkeit

Die Oberflächenrauigkeit ist der dominierende Faktor für die Rückstreuung. Unter der Voraussetzung desselben Einfallswinkels und gleicher Frequenz gilt: Je rauher die Oberfläche, desto diffuser ist die Rückstreuung bzw. je glatter die Oberfläche, desto gerichteter die Reflexion. Die Fresnel'sche Reflektivität, wie in Kapitel 2.1.1.1 beschrieben wird, geht von einer idealen glatten Grenzfläche aus. In einer natürlichen Umgebung haben wir es meist mit mäßig bis sehr rauhen Oberflächen zu tun. Die gestreute elektromagnetische Welle an einer Oberfläche setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, aus einer kohärenten und einer inkohärenten. Die kohärente wird durch die spiegelnde Reflexion hervorgerufen und die inkohärente wird durch die unterschiedlichen Streumechanismen bestimmt, die eine diffuse Streuung hervorrufen. Beide Komponenten hängen stark vom der Fresnel'schen Reflektivität ab, die wiederum durch die dielektrischen Eigenschaften des Bodens bestimmt und durch die Oberflächengestaltung modifiziert wird. Der Anteil der kohärenten Komponente hängt sehr stark von den Winkelverhältnissen ab und kann bei Rückstreuung nahe Nadir dominieren. Der inkohärente Anteil wird vor allem durch die Oberflächenrauigkeit dominiert und erfährt die höchste Rückstreuung bei zunehmender Rauigkeit. Steigt die Rauigkeit einer Oberfläche findet eine gleichmäßige Reflexion in alle Richtungen statt. Dieses Streuverhalten an einer Oberfläche wird als Lambert'sch bezeichnet.

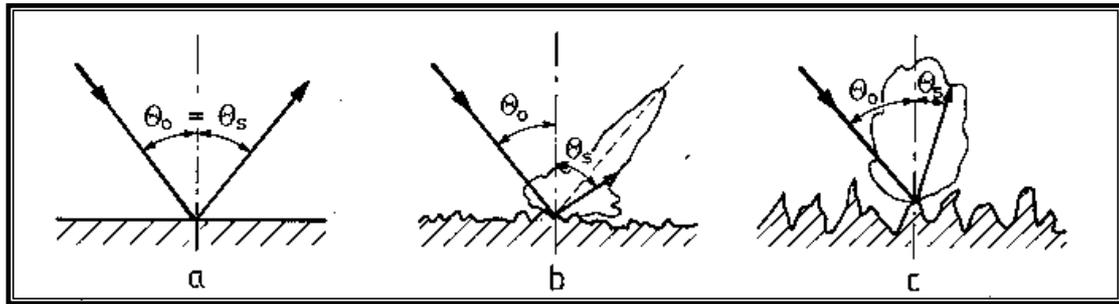


Abbildung 2.4: Spiegelnde (kohärente) und diffuse (inkohärente) Komponente der Strahlung, die auf eine (a) ideal ebene, (b) mäßig raue und (c) eine sehr raue Oberfläche trifft. Die diffuse Komponente ist als Wolke dargestellt. θ_o =Einfallswinkel, θ_s =Haupttrichtung der ausfallenden Strahlung. Quelle: SCHANDA (1986).

Die Definition einer Oberfläche ist abhängig von der Wellenlänge der ausgesandten elektromagnetischen Welle und dem lokalen Einfallswinkel. Der Zustand einer Oberfläche kann durch mehrere Kriterien beschrieben werden.

Das Rayleigh-Kriterium beschreibt die relative Rauigkeit einer reflektierenden Oberfläche. Es gibt einen Grenzwert für die mittlere Höhe h ihres Mikoreliefs, bis zu dem eine Oberfläche, in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ und dem Einfallswinkel Θ , noch als glatt bezeichnet wird:

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \Theta} \quad (2.14)$$

Bei natürlichen Oberflächen, bei denen die Wellenlänge häufig eine ähnliche Dimension wie die Höhenunterschiede h aufweist, kommt ein strengeres Kriterium zur Anwendung. Nach ULABY (1982) beschreibt das Fraunhofer-Kriterium einen wesentlichen niedrigen und engeren Bereich.

$$h < \frac{\lambda}{32 \cos \Theta} \quad (2.15)$$

Um die relative Rauigkeit einer natürlichen Oberfläche quantitativ zu erfassen werden statistische Größen verwendet. Die Rauigkeit einer Fläche kann mit Hilfe von zwei Parameter, der RMS-Höhe h , in der Literatur auch unter der Bezeichnung s zu finden, die im folgenden auch verwendet werden soll und der Autokorrelationslänge l beschrieben werden. Die RMS-Höhe ist die Standardabweichung von einer mittleren Referenzhöhe. Sie gilt als Maß für die vertikale Rauigkeit (WEIMANN 1996). Sie wird nach ULABY (1986) definiert als:

$$h = s = \sigma = \left[\frac{1}{N-1} \left(N \sum_{i=1}^N (z_i)^2 - N(\bar{z})^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

wobei

$h = s = \sigma$ = Standardabweichung der Höhe der Rauigkeitselemente

N = Anzahl der Elemente

z_i = Höhe des Rauigkeitselementes am Punkt i

\bar{z} = Mittelwert der Höhen aller Rauigkeitselemente

Die Autokorrelationslänge $p(x')$ gibt die Entfernung an, ab welcher die Rauigkeitshöhen unabhängig voneinander sind. Sie ist definiert als die Entfernung bei welcher die Korrelation einen Wert kleiner als $1/e$ erreicht. Die Autokorrelationslänge beschreibt die horizontale Rauigkeit. Für eine glatte Oberfläche wird $l = \infty$.

$$p(x') = \frac{\sum_{i=1}^{N+1-j} z_i z_{j+i-1}}{\sum_{i=1}^N z_i^2}$$

wobei

z_{j+i-1} = Punkt mit dem räumlichen Abstand $x' = (j-1)\Delta x$ von Punkt x_i

Die Normierung der RMS-Höhe und der Autokorrelationslänge erfolgt mit der Multiplikation der v (2.17) an Wellenlänge, die als Wellenzahl k beschrieben wird, sie werden dann als ks und kl bezeichnet. Als Maß der Rauigkeit wird die Neigung m herangezogen. Die Neigung wird als Verhältnis der RMS-Höhe zur Autokorrelationslänge definiert. Die Neigung wird in der Regel durch zwei Formen beschrieben durch die Gauß'sche Funktion [2.18] oder durch die exponentielle Funktion [2.19].

$$m = \sqrt{2} \frac{s}{l} \quad \text{Gauß'sche Funktion} \quad (2.18)$$

$$m = \frac{s}{l} \quad \text{Exponentielle Funktion} \quad (2.19)$$

Die Oberflächenstreuung nimmt mit zunehmendem Einfallswinkel ab. Diese Abnahme ist bei rauen Oberflächen geringer als bei glatten Oberflächen. Die Rückstreuung der kreuzpolarisierten Wellen ist jeweils schwächer als die der gleichpolarisierten.

2.1.1.4 Volumenstreuung

Die Volumenstreuung unterscheidet sich grundsätzlich von der Oberflächenstreuung. Sie wird vor allem dann wirksam, wenn die Verteilung der Elemente des reflektierenden Mediums nicht homogen ist oder wenn die Elemente des Mediums verschiedene dielektrische Eigenschaften aufweisen. In diesen Fällen dringt ein Teil der ausgesendeten Welle in dieses inhomogene Medium ein. Die Art der Volumenstreuung und ihre Stärke werden daher hauptsächlich durch zwei Faktoren bestimmt, der Inhomogenität des Mediums und der Eindringtiefe der Welle.

Der Einfallswinkel und vor allem die Polarisation sind zwei sensorspezifische Parameter, die diesen Streuprozess beeinflussen. Die Volumenstreuung hängt jedoch wesentlich weniger vom Einfallswinkel als die Oberflächenstreuung ab. Die kleineren Rückstreuenergieschwankungen der Volumenstreuung in Abhängigkeit des Einfallswinkels werden auf die dielektrische Diskontinuität innerhalb des Volumens zurückgeführt. Da die räumliche Verteilung dieser Diskontinuitäten zufällig ist, werden die Wellen innerhalb des Volumens in alle Richtungen gestreut.

Eine wesentlich größere Rolle spielt dagegen die Polarisation. Hier sei nur erwähnt, daß die Volumenstreuung bei der Kreuzpolarisation durch ihre multiplen Streuungen in inhomogenen Medien höhere Rückstreuanteile als die Oberflächenstreuung aufweist, während gleichpolarisierte Wellen Oberflächenstreuungsprozessen bis zu einem Einfallswinkel von rund 30° höhere Anteile als die Volumenstreuung aufweisen.

Bei der Modellierung der Volumenstreuung unterscheidet man grundsätzlich zwischen zwei Ansätzen (ISHIMARU 1978), den Wellenansatz (coherent oder wave approach) und den Intensitätsansatz (incoherent oder intensity approach). Beim Wellenansatz wird mit dem elektrischen Feld (Amplitude und Phase) gearbeitet. Beim zweiten Ansatz wird die Strahlungsintensität verwendet.

2.2 SAR-Interferometrie

Die SAR Interferometrie ist ein Verfahren zur Extraktion topographischer Information im Sinne von SAR. Es basiert auf der Generierung eines Interferogrammes zwischen zwei komplexen SAR-Aufnahmen derselben Szene, aufgenommen aus geringfügig unterschiedlichen Blickwinkeln durch zwei örtlich getrennte Antennen. Die beiden Aufnahmen können entweder gleichzeitig durch Verwendung von zwei Antennen, die an derselben Plattform montiert sind (Single-Pass Interferometrie) oder zeitlich getrennt durch Verwendung einer Antenne in zwei Überflügen des selben Gebietes (Repeat-Pass Interferometrie) aufgenommen werden.

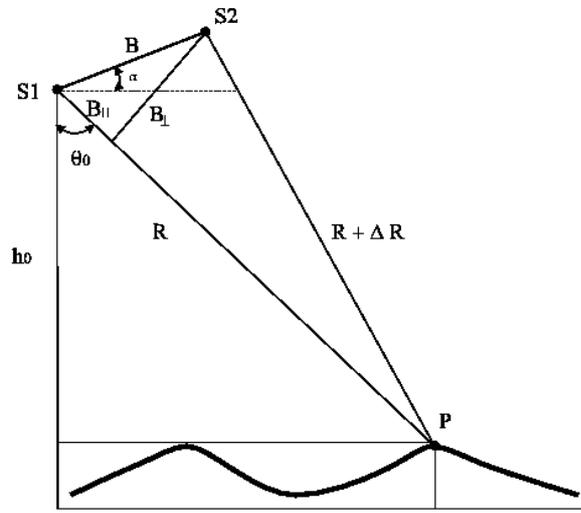


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des Prinzips der SAR-Interferometrischen Aufnahme

Um das Prinzip der SAR Interferometrie zu erläutern, werden in Abbildung 2.5 zwei Antennen $S1$ und $S2$, getrennt durch eine Baseline B , die die selbe Szene abbilden und ein Punkt P in der Szene, der sich auf einer Höhe h befindet, betrachtet. Die Entfernung zwischen den beiden Antennen und dem Punkt P seien durch R und $R + \Delta R$ gegeben. Die empfangenen Signale (Aufnahmen) $s1$ und $s2$ können, nach der SAR Prozessierung, als die Modulation der komplexen Reflektivität des beleuchteten Mediums und mit einer Phase ϕ dargestellt werden:

$$s_1(R) = u_1(R) \exp(i\phi(R)) \quad (2.20)$$

$$s_2(R + \Delta R) = u_2(R + \Delta R) \exp(i\phi(R + \Delta R))$$

Die Phase der beiden Signale wird durch die Überlagerung zweier unterschiedlicher Beiträge bestimmt: Einem deterministischen Beitrag der dem jeweiligen Entfernungs-Abstand entspricht, und einem statistischen Beitrag aufgrund der kohärenten Wechselwirkung der einfallenden Welle mit den elementaren Streuern innerhalb der Auflösungszelle. Dieser statistische Beitrag macht eine deterministische Auswertung der Phase eines einzelnen SAR Signals unmöglich.

$$\varphi_1 = 2 \frac{2\pi}{\lambda} R + \arg\{u_1\} \quad (2.21)$$

$$\varphi_2 = 2 \frac{2\pi}{\lambda} (R + \Delta R) + \arg\{u_2\} \quad (2.22)$$

Der Faktor 2 in Gleichung 2.21 berücksichtigt die Tatsache, daß beide Antennen individuell Senden und Empfangen und somit der Entfernungs-Abstand zweimal durchlaufen wird. Das Wissen der beiden Antennenpositionen und der entsprechenden Entfernungs-Abständen, ermöglichen die Ermittlung der dreidimensionalen Lage des Punktes P - und dadurch seiner Höhe - mittels Triangulation.

Nach der Koregistrierung der beiden Aufnahmen, (aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmepositionen überlagern sich die beiden SAR-Aufnahmen nicht vollständig) kann ein komplexes Interferogramm durch Multiplikation des ersten Signals mit dem konjugiert-komplexen des zweiten Signals generiert werden:

$$s_1(R)s_2^*(R + \Delta R) = |s_1 s_2^*| \exp i(\varphi_1 - \varphi_2) = |s_1 s_2^*| \exp\left(-i \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R\right) \quad (2.23)$$

Unter der Annahme, daß die statistischen Anteile beider Signale die selben sind, kürzen sie sich bei der Generierung des Interferograms gegenseitig heraus. Dadurch, obwohl die Phase jeder einzelnen Aufnahme statistisch ist, ist die Phase des Interferogrammes deterministisch und entspricht der Differenz der Entfernungs-Abständen ΔR :

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R + 2\pi N \quad \text{wobei} \quad N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.24)$$

Aufgrund der kurzen Wellenlänge, kann die Phase nur modulo 2π der absoluten Phase gemessen werden. Abgesehen von dieser 2π Mehrdeutigkeit, unterstreicht die Gleichung 2.24 den wesentlichen Vorteil der SAR-Interferometrie: Die Entfernungs-Differenz ΔR wird mittels der interferometrischen Phase, mit einer Genauigkeit die wesentlich geringer als die verwendeten Wellenlänge ist, gemessen. Hieraus ergibt sich, daß die SAR-Interferometrie potentiell ein sehr viel genaueres Verfahren darstellt, als konventionelle Triangulationsverfahren.

Unter Anwendung des Cosinus-Satzes läßt sich die Entfernungs-Differenz ΔR als Funktion von Parametern der Aufnahmegeometrie wie folgt darstellen:

$$(R + \Delta R)^2 = R^2 + B^2 - 2RB \cos(\pi/2 - \Theta_0 + \alpha) = R^2 + B^2 + 2RB \sin(\Theta_0 - \alpha) \rightarrow \quad (2.25)$$

$$\sin(\Theta_0 - \alpha) = \frac{(R + \Delta R)^2 - R^2 - B^2}{2RB} \quad (2.26)$$

wobei θ_0 der Referenz-Blick-Winkel der ersten Antenne und α der Neigungswinkel der Baseline in Bezug auf die Horizontale ist. Die gesuchte Höhe h des Punktes ergibt sich als:

$$h = h_0 - R \cos \Theta_0 \quad (2.27)$$

Die Gleichungen 2.24, 2.25 und 2.26 bilden ein nicht-lineares System dreier Gleichungen aus dem die drei unbekanntenen Größen ermittelt werden können: Die Entfernungs-Differenz ΔR , der Radar Blickwinkel θ_0 , und

die Höhe h . Es ist nun möglich die Höhe h aus der gemessenen interferometrischen Phase $\Delta\phi$, über die Bestimmung des Blickwinkels θ_0 für jede Auflösungszelle zuzuberechnen. Wird diese Prozedur über die gesamte Aufnahme wiederholt, so erhält man ein Höhenmodell, das dieselbe räumliche Auflösung aufweist wie die beiden ursprünglichen SAR-Aufnahmen.

Bedauerlicherweise ist dieses Verfahren nicht so einfach wie es den Anschein hat. Einige kritische Punkte müssen überwunden werden bevor die Geländehöhe aus den zwei SAR-Aufnahmen extrahiert werden kann. Die Tatsache, daß die Interferometrische Phase nur modulo 2π gemessen werden kann macht die Bestimmung der absoluten Phase erforderlich. Eine Vielzahl von Algorithmen zur Lösung dieses Problems kann in der Fachliteratur gefunden werden. Im allgemeinen hängt die Genauigkeit mit der die absolute Phase ermittelt werden kann von der Geländeneigung und von dem Niveau des Phasen-Rauschens ab, das aus einer reduzierten Korrelation zwischen den beiden SAR-Aufnahmen entsteht.

Der wichtigste Faktor in der Anwendung der SAR Interferometrie ist die Qualität der interferometrischen Phase welche von der Höhe des Phasen-Rauschens im Interferogramm abhängt. Ein Maß für das Phasen-Rauschen im Interferogramm ist die interferometrische Kohärenz, die als der normierte Absolutbetrag der Korrelation zwischen den beiden Aufnahmen definiert ist:

$$\gamma := \frac{|\langle S_1 S_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle S_1 S_1^* \rangle \langle S_2 S_2^* \rangle}} \quad (2.28)$$

Die interferometrische Kohärenz nimmt Werte zwischen 1, an Stellen wo beide Aufnahmen identisch sind, und 0, an Stellen wo beiden Aufnahmen ganz dekorrelieren, an. Die Genauigkeit mit der die interferometrische Phase bestimmt werden kann, wird mit jedem Verlust an interferometrischer Kohärenz reduziert. Abgesehen von Prozessierungsartifakten und System-Rauschen erfolgt die Dekorrelation aufgrund der unterschiedlichen Blickwinkel der beiden Antennen (Geometrische Dekorrelation), die nur teilweise eliminiert werden kann. Im Fall von *Repeat-Pass* Interferometrie, kann die temporale Dekorrelation aufgrund von Änderungen des Rückstreuverhaltens oder ihrer geometrischen Anordnung in der Zeit zwischen den beiden Aufnahmen zu einer signifikanten Verringerung der Kohärenz führen.

Abgesehen von der interferometrischen Kohärenz hängt die Leistung eines interferometrischen Systems im wesentlichen von der Wahl der Systemparameter, der Konfiguration des SAR Systems (Wellenlänge, Signal-Zu-Rausch Verhältnis, Baseline, Einfallswinkel), der Genauigkeit mit der der Orbit oder die Flug-Bahn bestimmt werden kann, und der Qualität der angewandten Algorithmen ab.

2.3 E-SAR Spezifikation

Das flugzeuggetragene Experimentelle SAR-System der DLR wurde am Institut für Hochfrequenztechnik spezifiziert und mit dem Ziel aufgebaut, einen modifizierbaren Sensor zur SAR-Verfahrenserprobung und für grundsätzliche Signaturmessungen verfügbar zu haben. Das E-SAR arbeitet zur Zeit im P-, L-, C- und X-Band, wobei L- und P-Band vol-polarimetrisch und C- und X-Band gleich-polarisiert (HH und VV) vorhanden sind. Alle Frequenzen wurden zum Radarüberflug der mittleren Elbaue eingesetzt. Zusätzlich wurden interferometrische X-Band-Daten im *single-pass-cross-track* Modus aufgezeichnet, aus denen ein digitales Geländemodell berechnet werden kann.



Abbildung 2.6: E-SAR des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt

Die räumliche Auflösung der E-SAR-Bilddaten beträgt in der Horizontalen sowohl in der Azimuth- als auch in Rangerichtung 2.5 [m]. Im Interferometrische-Phasenbild beträgt die räumliche Auflösung in der Horizontalen in Azimuhtrichtung 1.24 [m] und in der Rangerichtung 1.5 [m]. Die räumliche Auflösung in der Vertikalen liegt beim Phasenbild bei 10 bis 20 [cm] (HORN 1992).

Das E-SAR fliegt auf einer Turboprop-Maschine vom Typ Dornier DO-228. Die Einsatzflugdauer liegt bei 2.5 Stunden. Für SAR Aufnahmen liegt die Vorwärtsgeschwindigkeit zwischen 70 [m/s] und 85 [m/s].

Wichtige Systemparameter	E-SAR			
Frequenzen [GHz]	P-Band: 0.45	L-Band: 1.3	C-Band: 5.3	X-Band: 9.6
Wellenlänge [cm]	30	23.5	5.6	3.1
Sendespitzenleistung [W]	200	500	900	2500
Flughöhe [km]	3-4	3-4	3-4	3-4
Antennenöffnungswinkel Azimut [Grad]	30	18	19	17
Antennenöffnungswinkel Elevation [Grad]	60	35	33	30
Streifenbreite (am Boden)[km]	<3.5	3.5	6	> 10

Tab.2.3: Systemparameter des E-SAR (Stand 1997)

3 Angewandte Methoden

In diesem Kapitel werden, in Bezug auf die drei Untersuchungsschwerpunkte, die verwendeten Methoden erläutert und die extrahierbaren Oberflächenparameter definiert. Der Themenbereich SAR-Interferometrie wird hier nicht behandelt, da dieser einer theoretischen Analyse unterzogen wurde.

3.1 Klassifikationsmethoden

Die Klassifizierung von Fernerkundungsszenen nach interessierenden Zielobjekten ist eines der wichtigsten Anwendungsgebiete vielkanaliger Fernerkundungsdaten. Der statistische Ansatz trägt der Tatsache Rechnung, daß die Information gerade in den Merkmalsbeziehungen gegeben ist und die Betrachtung einzelner Merkmale nicht ausreicht. Die Klassifizierung ist ausserdem ein wichtiges Mittel zur Beurteilung der Trennbarkeit von Objektklassen.

Unter Klassifizierung versteht man eine Trennung eindeutiger, konkreter, thematischer und topographischer Objekte auf der Erdoberfläche anhand der in den Fernerkundungsdaten enthaltenen Merkmalen.

Die verwendeten Radar-Aufnahmen liegen in Form von unterschiedlichen Grauwerten vor. Die "Aufgabe der digitalen Klassifizierung ist es ..., jeden Bildpunkt anhand seines Grauwertes bzw. seiner Grauwerte in mehreren, simultanen Aufzeichnungen oder der Grauwerttextur(en) der Bildgestalt einer bestimmten Objektklasse zuzuordnen" (HILDEBRANDT 1996).

Zur Klassifikation von Radarrückstreuamplituden bieten sich im wesentlichen zwei Vorgehensweisen an: zum einen ein pixelweises Vorgehen, bei dem versucht wird, die spektralen Unterschiede der einzelnen Pixel für die Klassifikation zu nutzen: zum anderen mit Hilfe der räumlichen Verteilung der Grauwerte, der Textur, charakteristische Unterschiede einzelner Klassen zu erfassen. Abhängig von den Eigenschaften des Bildes, verspricht entweder ein textur- oder pixelweises Vorgehen ein besseres Ergebnis (HABERMEYER 1996).

Für das menschliche Auge stellen spektrale, textuelle und kontextuelle Eigenschaften eines Bildes die Grundlage der Interpretation von Bildern dar (HARALICK 1973). Die Modellierung ist uns bei der geeigneten Verfahrenssuche zur Klassifizierung behilflich. In dieser Arbeit werden zwei pixel- und texturbasierte Verfahren vorgestellt. Zur pixelbasierten Klassifikation wurde ein Standardmodell basierend auf der Normal-Verteilung zur unüberwachten und überwachten Klassifikation ausgewählt. Zur texturbasierten Klassifikation wurden einige Parameter des Ansatzes von HARALICK (1973) und ein Verfahren von GONG (1992) verwendet.

3.1.1 Pixelbasierte Klassifikation

Eine pixelbasierte Klassifikation setzt die Kenntnis der Klassen zugehöriger Grauwerte voraus und betrachtet diese ohne Berücksichtigung von Nachbarschaftsbeziehungen.

In der pixelbasierten Klassifikation können zwei methodische Ansätze unterschieden werden. Zum einen die überwachte und zum anderen die unüberwachte Klassifikation. Bei der überwachten Klassifikation werden interessierende Objektgebiete vom Anwender selbst ausgewählt. In einer Lernphase der Klassifikation werden dann, ausgehend von den Merkmalsverteilungen der Bildpunkte innerhalb dieser Gebiete, die zur Klassendefinition benötigten statistischen Parameter bestimmt. Die Ausführung der Klassifikation beinhaltet eine bildpunktweise Zuordnung zu den definierten Objektklassen (GLITZ 1995). Der Vorteil dieser Methode liegt in der hohen Klassifikationsgenauigkeit, Trennbarkeit der Klassen, die aber durch die Notwendigkeit von a priori Wissen über das abgebildete Areal relativiert wird.

Unüberwachte Klassifikationsverfahren setzen dagegen kein Vorwissen voraus. Sie begründen sich auf der Extraktion spezifischer Eigenschaften natürlicher Oberflächen. Die wesentliche Limitierung der Genauigkeit stellt hier die Tatsache, daß physikalische Eigenschaften zu unterscheidender Klassen nicht genügend genau bestimmt werden können. Um die Leistungsfähigkeit zu erhöhen, sind zusätzliche Informationen erforderlich.

3.1.1.1 Unüberwachte Klassifizierung

Das Ziel der unüberwachten Klassifikation ist einen mehrkanaligen Datensatz in statistisch trennbare Gruppen (Cluster) zu unterteilen. Im Zuge mehrfacher Rechendurchläufe wird der Mittelwert des jeweiligen Clusters bestimmt. Die Zuordnung der einzelnen Pixel wird bei jedem Durchlauf stets neu berechnet. Cluster-Zentren, die nah zusammen liegen, werden zusammengefaßt, im entgegengesetzten Fall neue Cluster gebildet. Das Programm beendet die Berechnungen, wenn bei der Verteilung der Pixel die Anzahl der Pixel pro Cluster kaum eine Veränderung erfahren. Das Rechenverfahren beinhaltet heuristische Prozeduren, die in ein interaktives Schema integriert wurden. Mit dem sogenannten Movement-Threshold (Bewegungs-Schwellwert) wird der Grad der Veränderung, welcher für die Weiterberechnung nötig ist, festgelegt. Der Benutzer kann die minimal, maximal und optimal erscheinende Anzahl der Cluster-Zentren festlegen. Die Angabe der Größe der Cluster-Zentren, deren Standardabweichung sowie die Anzahl der Rechendurchläufe müssen festgelegt werden.

In dieser Arbeit wurde das Isoclus Modul der EASY/PACE Software von PCI verwendet. Der Isoclus Algorithmus basiert mit geringen Veränderungen auf dem Isodata-Algorithmus der in Tou et al. (1974) näher beschrieben wird (PCI online manual). Das Endergebnis der Klassifizierung ist eine thematische Karte in der die einzelnen Cluster durch Graustufen repräsentiert werden. Um die Unterscheidbarkeit der Cluster zu verbessern können die Graustufen der thematischen Karte durch eine Falschfarben-Tabelle ersetzt werden. In Abbildung 3.1 wird der Ablauf einer unüberwachten Klassifikation in Form eines Fließdiagrammes dargestellt.

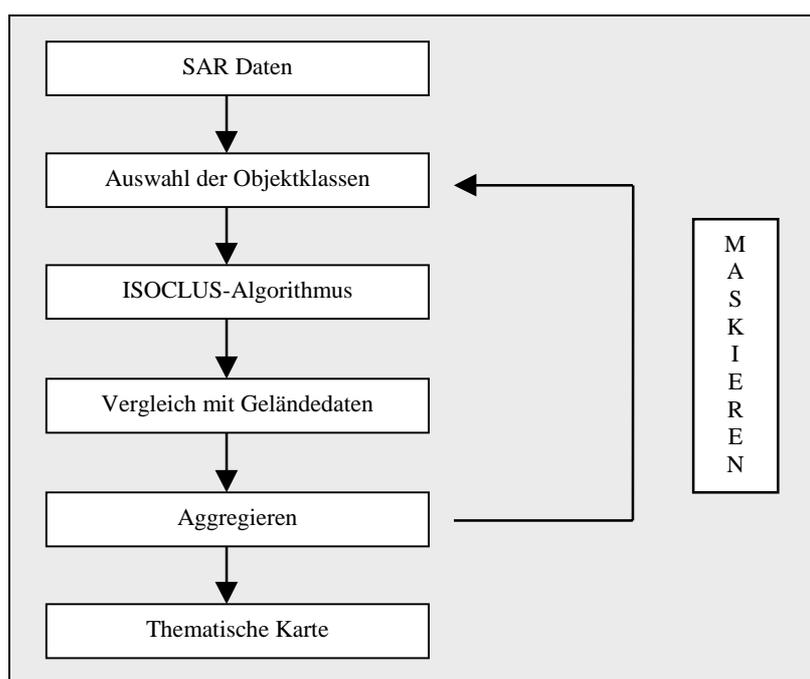


Abbildung 3.1: Vorgehensweise einer unüberwachten Klassifizierung

3.1.1.2 Überwachte Klassifizierung

Bei der überwachten Klassifikation bringt der Bearbeiter ein Vorwissen in den Klassifizierungsvorgang mit ein in dem er konkrete Klassen als Trainingsgebiete markiert. Das Vorwissen kann aus Karten, Geländekampagnen, Luftbildern oder dem Datensatz selber stammen.

Nach Auswahl des geeigneten Datensatzes legt der Bearbeiter aufgrund seines Vorwissen über das Untersuchungsgebiet die gewünschten Klassen fest. Um den Klassifikationsalgorithmus hinsichtlich der Klassen optimal zu trainieren müssen nach LANDGREBE (1992) folgende Punkte bedacht werden:

- jedes Pixel in einer Szene sollte einer logischen Klasse zugeteilt werden,
- die Klassen müssen entsprechend dem Informationsgehalt in einer Szene trennbar sein,
- die Klassen sollten von Interesse für den Bearbeiter sein.

Für jede Klasse werden Trainingsgebiete im Datensatz markiert. Auch die Auswahl der Trainingsgebiete unterliegt gewissen Vorgaben. So sollten die angelegten Trainingsgebiete, soweit möglich, einerseits gleichmäßig über dem Untersuchungsgebiet verteilt sein und andererseits eine repräsentative Größe enthalten.

Der verwendete Maximum-Likelihood-Klassifikator läuft nach folgendem Schema ab:

- Aus einem Trainingsgebiet der Klasse α_i wird der Mittelwert μ , die Varianz σ^2 und die Korrelation berechnet. Die Werte (Grauwerte) der Trainingsgebiete beruhen auf der Gaußschen Normal-Verteilung, die durch zwei Parameter, den Mittelwert μ und die Kovarianz-Matrix, bestimmt wird.
- Für das einzelne Pixel in Form des Merkmalsvektors x wird dann die Wahrscheinlichkeit berechnet in der es in der Klasse α_i auftritt (*Bayessche Regel*). Für jedes Trainingsgebiet wird die Wahrscheinlichkeitsdichte mehrdimensional berechnet (die Anzahl der Dimensionen ist bestimmt durch die Anzahl der verwendeten Kanäle).
- Das Pixel wird schließlich der Klasse zugeordnet, in die es mit der höchsten Wahrscheinlichkeit paßt. Je weiter die Mittelwerte der Objektklassen auseinander liegen und je kleiner die Standardabweichung ist, desto besser wird das Klassifizierungsergebnis ausfallen.

Die Maximum-Likelihood Klassifikation erfolgt im Programm EASI/PACE nach dem ‚Mahalanobis minimum distance‘ Algorithmus, der wie folgt beschrieben ist:

$$\delta_i(x | \alpha_i) = \frac{1}{2} \left((x - \mu_i)^T [C_i]^{-1} (x - \mu_i) \right) - \frac{n}{2} \log 2\pi - \frac{1}{2} \log \det([C_i]) + \log(\rho_i); \quad (3.1)$$

wobei

$\delta(x | \alpha_i)$: Klassifikationsergebnis für die Klasse α_i am Merkmalsvektor x

n : Anzahl der Szenen oder Kanäle

x : Wert des zu klassifizierenden Objektes

μ_i : Mittelwertvektor der Klasse μ_i

$(x - \mu_i)$: Differenzvektor aus den Werten der zu klassifizierenden Elemente in den einzelnen Szenen und den Mittelwerten der Klasse

$[C_i]^{-1}$: Inverse der Kovarianz-Matrix der Klasse α_i

$\det([C_i])$: Determinante der Klasse α_i

$\rho(\alpha_i | x) = \rho(\alpha_i | x) / \sum(\rho(\alpha_i | x))$ Bayesian Wichtungsfaktor der Klasse α_i

Die Distanz des ‚Mahalanobis minimum distance‘ Algorithmuses gibt an, wie groß die Ähnlichkeit eines Bildpunktes mit Merkmalsvektor x zu den durch Normal-Verteilung bestimmten Klasse α_i ist. Das Minimum dieser Größe wird für den Klassenmittelwert angenommen. Als Kurven gleicher Distanz werden im Merkmalsraum $N-1$ dimensionale Ellipsoide um das Zentrum erhalten. Mittels eines Wahrscheinlichkeitswichtungsfaktors $\rho(\alpha_i | x)$ werden Objektklassen eine a priori Wahrscheinlichkeit zugeordnet. Objektklassen, die in einem Bild häufiger vorkommen als andere, können demzufolge einen höheren Wahrscheinlichkeitswichtungswert zugewiesen bekommen.

3.1.2 Texturbasierte Klassifikation

Die Textur ist ein Maß der räumlichen Verteilung diskreter Grauwerte und Grauwertintensitäten. Eine diskrete Grauton-Eigenschaft ist eine zusammenhängende Menge an Pixeln, die alle den gleichen oder zumindest einen ähnlichen Grauton besitzen (HARALICK & SHAPIRO 1991). Die Textur beinhaltet wichtige Informationen über die strukturelle Anordnung von Grauwerten und ihr Verhältnis zur Umgebung (HABERMAYER 1996).

Im folgenden soll das Prinzip der Co-Occurrence-Matrizen als Modell vorgestellt werden, um Texturen zu charakterisieren. Darauf aufbauend werden zwei verwendete Verfahren vorgestellt, die es zulassen, Co-Occurrence-Matrizen in der Klassifikation einzusetzen.

3.1.2.1 Co-Occurrence-Matrix

Die Co-Occurrence-Matrix beruht auf der Schätzung der Funktion der Verbundwahrscheinlichkeit zweiter Ordnung, das heißt der Häufigkeit des Auftretens zweier Grauwerte an einer bestimmten Position mit einem Abstand und einer Richtung.

Für jedes Bild und jeden Bildausschnitt lassen sich Matrizen erstellen, die die Anzahl der in verschiedenen Richtungen benachbarten Grautöne wiedergeben. Diese werden in den vier Hauptrichtungen (horizontal, rechts-diagonal, vertikal und links-diagonal) mit $d = 1$ (der direkte Nachbar) angegeben (HABERMEYER 1996).

Ein Bild kann nach zwei Ansätzen betrachtet werden: Nach dem fensterbasierten Ansatz und nach dem objektbasierten Ansatz. Wird die Textur im Kontext eines Pixels untersucht, ist die Matrix nur sehr dünn besiedelt und darauf aufbauende Verfahren werden Ergebnisse produzieren, die sich nur unwesentlich voneinander unterscheiden. Beim objektbasierten Ansatz liegt der Vorteil, abgesehen von der dicht besiedelten Matrix im verringern des *Speckle*-Einflusses. Unter Besiedlung wird die Menge der in der Matrix besetzten Zellen und damit die Menge der Information, die diese trägt verstanden (HABERMEYER 1996).

3.1.2.2 Haralick-Parameter

Auf Grundlage der Co-Occurrence-Matrix erstellten HARALICK et al. (1973) insgesamt vierzehn Parameter um die Homogenität, den Kontrast und die Grauwert-Übergänge der Textur eines Bildausschnittes zu messen. Hierbei werden einzelne Zellen durch verschiedene Rechenoperationen miteinander verknüpft. Es ist deshalb nicht eindeutig, welche Eigenschaft der Textur von jedem einzelnen Parameter repräsentiert wird. Zum anderen korrelieren die Parameter untereinander teilweise sehr stark.

Für diese Arbeit wurden vier Parameter im Modul TEX des Programmes EASI/PACE verwendet:

Angular Second Moment

Das *Angular Second Moment* stellt ein Maß für die Homogenität einer Bildregion dar. Das ‚Angular Second Moment‘ stellt den Gegensatz zur ‚Entropy‘ dar. Er ist hoch, wenn die Elemente der Co-Occurrence-Matrix hohe Abweichungen aufzeigen und niedrig, wenn diese sich ähneln.

$$s_1 = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} \{s(i, j)\}^2 \quad (3.2)$$

Dissimilarity

Die Varianz ist ein Maß für die Streuung einer Bildregion. Sie ist hoch, bei hohen Abweichungen des Kontrastes und sie ist niedrig bei geringen Abweichungen des Kontrastes innerhalb eines bestimmten Fensters.

$$s_2 = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} \left| (i - \mu_x)(j - \mu_y) \right| s(i, j); \text{ wobei} \quad (3.3)$$

N_g : Anzahl der Graustufen

$s(i,j)$: relative Häufigkeit in der Co-Occurrence-Matrix für die gegebenen Richtungen und Distanzen

μ_x : Mittelwert in Zeilenrichtung

μ_y : Mittelwert in Kolonnenrichtung

Correlation

Die Korrelation ist ein Maß für die Abhängigkeit der Grautöne in einer lokalen Bildregion. Sie liefert Informationen über die Abhängigkeit der Zeilen und Kolonnen in der Co-Occurrence-Matrix.

$$s_3 = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} \frac{(i - \mu_x)(j - \mu_y)s(i, j)}{\sigma_x \sigma_y} \quad ; \text{ wobei} \quad (3.4)$$

σ_x : Standardabweichung in Zeilenrichtung

σ_y : Standardabweichung in Kolonnenrichtung

Entropy

Die Entropie ist ein Maß für die lokale Unordnung bzw. Grauwertänderung. Eine hohe Entropie ist innerhalb einer Co-Occurrence-Matrix bei sich ähnelnden Elementen vorzufinden. Sie ist niedrig, wenn sich die Elemente nah an 0 oder 1 befinden.

$$s_4 = - \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} s(i, j) \log[s(i, j)] \quad (3.5)$$

Es wurden die Texturparameter ausgewählt, die die Kontrastinformationen in einer Radar-Aufnahme am besten hervorheben können. Diese Textur-Informationen wurden als Zusatzinformationen für die überwachte Klassifikation verwendet.

3.1.2.3 Context-Verfahren

Das Texturverfahren nach Gong (1992) beruht auf der *Gray-Level-Vector-Reduction* (GLVR), welches die räumlichen Eigenschaften der einzelnen Grauwerte berücksichtigt. Das GLVR ist ein Modul des Context-Verfahrens welches in der verwendeten EASI/PACE Software enthalten ist. Eine detaillierte Beschreibung dieses Verfahrens ist in Gong (1992) zu finden.

3.2 Modellierung und Invertierung von Oberflächenparametern

Die Abhängigkeiten des Rückstreuquerschnittes von den drei Hauptparametern Oberflächenrauigkeit, Autokorrelationslänge (k_s und k_l) und relativen Dielektrizitätskonstante (ϵ') ermöglichen mit Hilfe von Modellen eine Invertierung dieser Parameter. Die Modelle weisen unterschiedliche Möglichkeiten auf diese Parameter zu extrahieren und werden in der Literatur kontrovers diskutiert. Die Vielzahl der komplex ineinanderwirkenden Einflußparameter erschweren die Erfassung der Zusammenhänge in einfachen und anwendbaren Modellen, so wurden mehrskalige komplexe Rauigkeitsmodelle entwickelt, deren Anzahl der statistischen Inputparameter die Anzahl der Outputparameter bis um ein neunfaches Übersteigen können. Die Anwendbarkeit solcher Modelle ist nur mit a priori Wissen über das betrachtete Medium möglich, welches ein unabhängiges und objektives Modellieren erschweren und nicht zur automatischen Bestimmung der Bodenparameter dienlich ist. Allen Modellen ist gemeinsam, das sie sehr große Abweichungen in der Genauigkeit bei der Validierung aufzeigen.

Entwickelt worden sind theoretische, empirische und semi-empirische Modelle zur Extraktion dieser Parameter auf unbewachsenen Oberflächen. Bis zum heutigen Stand der Forschung sind Invertierungsmodelle über bewachsenen Oberflächen noch im sehr frühen Entwicklungsstadium und werden hier nicht weiter behandelt. Zur Anwendung sind zwei einfache und vielversprechende Modelle, ein semi-empirisches und ein empirisches, Modelle von OH et al. (1992) und DUBOIS et al. (1995) gekommen.

Die theoretischen Oberflächenstreuungsmodelle gehen von einem Boden als ein homogenes dielektrisches Medium aus. Die Bodenkunde faßt den Boden als 3-Phasengemisch auf, in dem dielektrische Diskontinuitäten auftreten können. Da der Boden aber ein dicht gepacktes Medium ist und die Eindringtiefen für kleine Wellenlängen (X- und C-Band) gering ist, wird der Effekt der Diskontinuitäten für die relativ großen Wellenlängen (L- und P-Band) reduziert. Bei kleinen Wellenlängen macht die Volumenstreuung des Bodens nur einen geringen Anteil aus, und die Hauptstreuung findet an der Oberfläche, an der Grenzfläche Luft/Boden, statt.

Um die unterschiedlichen Streuungs-Effekte zu berücksichtigen, Oberflächen- und Volumenstreuung, wurden Streu-Modelle erster Ordnung (first order scattering model) entwickelt. Bei rauen Oberflächen führt die Streuung höherer Ordnung dazu, daß die Unterschiede im gleich-polarisierten Signal abnehmen. Im Modell erster Ordnung führt dies zu einer Unterschätzung des Bodenwassergehaltes. Wird ein Term zweiter Ordnung eingeführt (VAN ZYL, ZEBKER & ELACHI 1987), so wird das Verhältnis von σ_{VV}/σ_{HH} sensitiv für den Parameter der Rauigkeit. Die Sensitivität nimmt bei großem Einfallswinkel und glatten Flächen ab.

Die semi-empirischen und empirischen Modelle leiten ihre Algorithmen einerseits über physikalisch-mathematische Überlegungen und andererseits durch Regressionen über einen ausgewählten Datensatz zum Erhalt von Modellierkonstanten her. Im Gegensatz zu den theoretischen Modellen sind die semi-empirischen/empirischen Modelle für einen größeren und weiteren Anwendungsbereich in bezug auf Oberflächen- und Systemparameter konzipiert. Auf den rauigkeitsbeschreibenden Parameter der Autokorrelationslänge k_l wird verzichtet. Angenommen wird, das dieser schwer zu definierende Parameter, sowohl im Gelände wie auch im mathematischen Sinn, keinen gravierenden Einfluß auf die Radarrückstreuung hat, wie auch in einige Studien nachgewiesen (ZRIBI 1999).

3.2.1 Theoretische Modelle

Zu den drei bekannten theoretischen Modellen zählen das „Geometric Optics Model“ (GOM), das „Physical Optics Model“ (POM) und das „Small Perturbation Model“ (SPM), deren genaue Formalismen in CHEN & FUNG (1988) nachzulesen sind. Das GOM und POM sind beide abgeleitet aus dem physikalischen, optischen

Kirchhoff'schen Strahlungsgesetz und gelten für große bis mittlere Rauigkeiten ks . Zur Anwendung kommen hier vor allem hohe Frequenzen, das C- und X-Band, um Rauigkeiten zu invertieren. Das SPM, auch als Bragg-Streuung bekannt, gilt für kleine Rauigkeiten ks . Hier kommen kleine Frequenzen zur Anwendung, die sich im Bereich des L- und des P- Bandes befinden. Die berechnete Oberfläche wird als Fourier Integral ausgedrückt und beschreibt die Neigung $m < 0.3$, wobei die Oberfläche isotrop ist.

Gültigkeitsbereiche	ks	kl	m
GOM	> 2	> 6	-
POM	> 0.25	> 6	< 0.25
SPM	< 0.3	< 3	< 0.3

Tab.3.1: Gültigkeitsbereiche für die drei theoretischen Radarrückstreumodelle

Das SPM erlaubt durch das Vorhandensein einer sehr kleinen Rauigkeitskomponente eine direkte Ableitung der Dielektrizitätskonstante aus seinen gleich-polarisierten Rückstreu-Amplituden. Deutlich wird dies, wenn das Verhältnis σ_{HH}/σ_{VV} gegen den Bodenwassergehalt für verschiedene Einfallswinkel aufgetragen wird. Zu erkennen ist eine Sensitivität zum Bodenwassergehalt der sich proportional zum Einfallswinkel verhält. Die Sensitivität nimmt bei L-Band ab, wenn der Boden feuchter als 30 [vol %] beträgt.

Diese Modelle wurden von mehreren Autoren analysiert und verglichen. Zusammenfassend kann festgehalten werden (OH 1992):

- Nicht alle natürlichen Oberflächen können in diesen sehr strengen Gültigkeitsbereich erfaßt werden.
- Keiner der Modelle weist eine ausreichende Übereinstimmung zwischen den gemessenen und invertierten Werten auf. Dieser Trend ist vor allem bei einem lokalen Einfallswinkel $> 40^\circ$ zu verzeichnen. Als Verhältnis dazu beschreibt das E-SAR von der DLR einen Winkelbereich von 25° bis 60° .
- Speziell das POM setzt $\sigma_{VV}^0 < \sigma_{HH}^0$ voraus. Diese Bedingung kann von unabhängigen Beobachtungen aus nicht bestätigt werden.

Aufgrund dieser Annahmen für die theoretischen Modelle entwickelte OH et al. (1992) ein empirisches Modell, welches aus der Verwendung von kreuz-polarisierten Rückstreuquerschnitten σ^0 die Invertierung von Oberflächenrauigkeit und -feuchte erlaubt. Dabei werden die physikalisch-mathematischen Überlegungen des SPM übernommen und versucht, mit Regressionen über einen bestehenden Datensatz, den Gültigkeitsbereich für die Rauigkeit ks zu erweitern.

3.2.2 OH - Modell

Dieses Modell wurde an der Universität von Michigan von OH, SARABANDI und ULABY (1992) anhand von Experimenten mit einem lastwagenmontierten Scatterometersensor (LCX-POLARSCAT) entwickelt. Die getesteten Oberflächen wiesen vier unterschiedliche Rauigkeiten, zwei glatte mit RMS-Höhen von 0.40 cm und 0.32 [cm], eine mittelraue Testfläche mit 1.12 [cm] RMS-Höhen und eine sehr rauhe Oberfläche mit 3.02 [cm] RMS-Höhe, auf. Die Autokorrelationslänge lag bei allen Oberflächen zwischen 8.4 [cm] und 9.9 [cm]. Die Grenzen, der experimentell erfaßten Oberflächen stellen auch gleichzeitig die Gültigkeitsbedingungen des Modelles dar. Die Formulierung für die Rückstreuoeffizienten, der ko- und kreuz-polarisierten Verhältnisse ist:

$$\left\{ \begin{array}{l} p = \frac{\sigma_{HH}^0}{\sigma_{VV}^0} = \left(1 - \left(\frac{2\Theta}{\pi} \right)^{\frac{1}{3\Gamma^0}} e^{-ks} \right)^2 \\ q = \frac{\sigma_{HV}^0}{\sigma_{VH}^0} = 0.23 \sqrt{\Gamma^0} (1 - e^{-ks}) \end{array} \right. \quad (3.6)$$

wobei

σ_{HH}^0 = Rückstreuoeffizient in HH-Polarisation

Θ = der Einfallswinkel

s = die RMS-Höhe der Fläche

k = die Wellenzahl

Γ^0 = die Fresnel'sche Reflektivität im Nadir

Die nonlineare Inversionsgleichung wird aus p und q nach Beseitigung von ks für Γ^0 erhalten:

$$\left(\frac{2\Theta}{\pi} \right)^{\frac{1}{\Gamma^0}} \left[1 - \frac{q}{0.23\sqrt{\Gamma^0}} \right] + \sqrt{p} - 1 = 0 \quad (3.7)$$

Die Auflösung von Γ^0 erfolgt iterativ und wird in

$$\Gamma^0 = \left| \frac{1 - \sqrt{\mathcal{E}}}{1 - \sqrt{\mathcal{E}}} \right|^2 \quad (3.8)$$

Eingesetzt. Die Berechnung der Dielektrizitätskonstante kann nun direkt erfolgen. Nachdem Γ^0 bekannt ist kann ks durch einsetzen von Γ^0 in p gelöst werden.

Die wichtigsten Ergebnisse nach Anwendung diese entwickelten Algorithmus sind nach OH (1992):

- Das gleich-polarisierte Ratio $p = \sigma_{HH}^0/\sigma_{VV}^0 \leq 1$ gilt für alle lokalen Einfallswinkel, Rauigkeitsbedingungen und Bodenwassergehalte. p steigt rasch mit dem Anstieg von ks bis $ks \simeq 1$ an und bleibt fast konstant bei einem Wert von 1 bis $ks > 3$. Für $ks < 3$, sinkt p mit Anstieg des lokalen Einfallswinkels und mit Anstieg der Bodenfeuchte. Der Quotient zeigt eine hohe Sensitivität zum Bodenwassergehalt einer Oberfläche und wird stark vom Einfallswinkel bestimmt.
- Das kreuz-polarisierte Ratio $q = \sigma_{HV}^0/\sigma_{VH}^0$ weist eine hohe Abhängigkeit zu ks und eine geringere zur Bodenfeuchte auf. Das Ratio q steigt rasch mit Steigung von ks bis $ks \simeq 1$, danach steigt es gemäßigt bis es einen konstanten Wert erhält bis $ks > 3$, welches wiederum abhängig ist vom Bodenwassergehalt. Der Quotient zeigt keine Einfallswinkelabhängigkeit und ist vorallem Sensitiv auf die Rauigkeit.
- Das entwickelte Model weist eine gute Übereinstimmung mit den Geländedaten im Bereich $0.1 \leq ks \leq 6$, $2.5 \leq kl \leq 20$ und $0.09 \leq m_v \leq 0.31$ auf.

Wie in Gleichung 3.6 zu erkennen, bilden die Annahmen vom SPM das physikalisch-mathematische Fundament der Quotienten p und q . Zum einen wird das Konzept der Fresnell'schen Reflektivität und zum anderen die Ratiobildung wiedergefunden. Die Ergebnisse des Modelles zeigen, das die Quotienten p und q ab

einer Rauigkeit von ks 3 nicht mehr sensitiv auf die Rauigkeit sind und einen konstanten Wert von 1 annehmen. Der RMS-Fehler zur Bodenfeuchteberechnung liegt bei 4 [vol %] und zur Rauigkeitsbestimmung bei 0.23 cm.

Dieses Modell findet nur Anwendungen, wenn ein voll-polarimetrischer Datensatz vorhanden ist. Die Datenverfügbarkeit von voll-polarimetrischen Radar-Daten von Satellitensystemen und teilweise auch von flugzeuggetragenen Systemen stellt heute noch ein Problem dar. Eine zweite Schwierigkeit stellt beim Vorhandensein dieser Daten die genaue Kalibrierung des kreuz-polarisierten Kanales zum Zeitpunkt des entwickelten Modelles dar. Deshalb wurde ein Modell von DUBOIS, VAN ZYL und ENGMANN (1995) entwickelt, das eine Vereinfachung des OH et al. Modells (1992) darstellt und nur die gleich-polarisierten Informationen benötigt.

3.2.3 DUBOIS - Modell

Das Modell wurde von DUBOIS, VAN ZYL und ENGMAN für gleich-polarisierte Datensätze anhand von einem Experiment mit lastwagenmontierten Scatterometer (LCX POLARSCAT) entwickelt und ist ein rein empirisches Modell. Den empirischen Daten zufolge ist die Rückstreuung in HH- und VV- Polarisation vom Einfallswinkel, dem Realteil der Dielektrizitätskonstante, der RMS Höhe der Oberflächenrauigkeit und der Wellenlänge bzw. der Wellenzahl abhängig. Kreuzpolarisierte Radarkanäle sind schwierig zu kalibrieren (*Cross Talk* und Systemrauschen) und darüber hinaus vegetationsempfindlich, was zu einer Unterschätzung des Wassergehaltes führen würde.

$$\begin{cases} \sigma_{VV}^0 = 10^{-2.35} \frac{\cos^3 \Theta}{\sin^3 \Theta} 10^{0.04\epsilon \tan \Theta} (ks \sin \Theta)^{1.1} \lambda^{0.7} \\ \sigma_{HH}^0 = 10^{-2.75} \frac{\cos^{1.5} \Theta}{\sin^5 \Theta} 10^{0.02\epsilon \tan \Theta} (ks \sin \Theta)^{1.4} \lambda^{0.7} \end{cases} \quad (3.9)$$

wobei

θ = lokaler Einfallswinkel

ϵ = Dielektrizitätskonstante

s = RMS-Höhe

k = Wellenzahl

λ = Wellenlänge

Das Verhalten der Rückstreuung mit der Rauigkeit ist dem Trend vergleichbar, der auch durch das SPM vorausgesagt wird. Die Rückstreuung verhält sich umgekehrt proportional zum lokalen Einfallswinkel und proportional zur Rauigkeit. Die Rückstreuung wird kleiner, wenn der Einfallswinkel zunimmt und die RMS-Rauigkeit geringer wird. Sie wird größer, wenn die Dielektrizitätskonstante steigt, wobei dieser Trend für VV stärker ist als für HH. Der Einfluß der Dielektrizitätskonstante wird bei zunehmendem Einfallswinkel immer geringer.

Das empirische Modell sagt voraus, daß der Quotient aus σ_{HH}^0 und σ_{VV}^0 mit der Rauigkeit zunimmt, dies ergibt sich aus den Unterschieden im Exponenten $ks \sin \theta$. Im SPM dagegen wird angenommen, daß dieser Quotient nicht von der Rauigkeit abhängt. Ferner ergibt sich ein Unterschied bei der Betrachtung der Relation, $\sigma_{HH}^0 \geq \sigma_{VV}^0$. Die Voraussagen der theoretischen Modelle geben $\sigma_{HH}^0 \leq \sigma_{VV}^0$ an.

Im empirischen Modell nehmen die Rückstreuung und der Quotient $\sigma_{HH}^0/\sigma_{VV}^0$ auch mit zunehmender Dielektrizitätskonstante ab. Die Dielektrizitätskonstante hat einen geringeren Einfluß, wenn der Einfallswinkel kleiner wird, welches den Voraussagen des SPM entspricht.

Die Invertierung der zwei Parameter ks und ε' kann direkt nach Umstellung erfolgen. Der Gültigkeitsbereich wird für $ks \leq 2.5$ und $m_v \leq 35$ % angegeben. Die Genauigkeit bezüglich der Bestimmung des Feuchtegehaltes liegt bei 4.2 [vol %] Bodenfeuchte und bei der Rauigkeit um 0.4 [cm], bei unbedeckten Boden (NDVI < 0.4).

Die wichtigsten Ergebnisse dieses entwickelten Algorithmus sind (DUBOIS et al. 1995):

- Bei der Invertierung von oberflächennaher Bodenfeuchte kann eine Genauigkeit von 4.2 [%] erreicht werden.
- Zum Erhalt von hohen Genauigkeiten der invertierten Werte, besser als 4 [%], sollte das Radar eine 2 [dB] absolute und 0.5 [dB] relative Genauigkeit der Kalibrierung zwischen den gleich-polarisierten Kanälen aufweisen.
- Bei Vorhandensein eines kreuz-polarisierten Kanales, kann dieser verwendet werden um störende Vegetationseffekte auszuschließen.

Folgende Aspekte wurden nicht im entwickelten Modell berücksichtigt:

- der Effekt der Anbauichtung der agrarwirtschaftlich genutzten Fläche;
- der Effekt der Autokorrelationslänge auf den agrarwirtschaftlich genutzten Fläche;
- der Effekt der Topographie, da nur ebene landwirtschaftliche Flächen beprobt worden sind.

Der beschreibende horizontale Rauigkeitsparameter, die Autokorrelationslänge l ist ein schwer im Gelände zu messender Parameter, der nach dem Autor keine Korrelation mit dem Rückstreuquerschnitt aufweist. Es wird aber angenommen, daß das vorgeschlagene Modell für Autokorrelationslängen in dem Bereich $2.5 < kl < 20$ gültig ist.

Beiden Modellen ist gemeinsam, daß sie Regressionskonstanten zur Invertierung von ks und m_v verwenden und die Bildgeometrie in *ground-range* Projektion vorhanden sein muß. Die vorgestellten semi-empirischen/empirischen Modelle beziehen, wie bereits erwähnt, nur die Oberflächenstreuung in ihr Modell ein. Hierfür wird das Ratio $\sigma_{HH}^0/\sigma_{VV}^0 < 1$ (0 dB) verwendet, wobei alle Werte über diesem Verhältnis ausgeschlossen werden. Das Modell von DUBOIS et al. gibt an auch sinnvolle Ergebnisse bei schwacher Vegetationsbedeckung der landwirtschaftlichen Felder zu liefern. Als Schwellwert für eine tolerable Vegetationsbedeckung geben sie das Verhältnis $\sigma_{HV}^0/\sigma_{VV}^0 < -11$ [dB] berechnet nach einem NDVI von 0.4 im L-Band an. Beide Modelle wurden auf ebenen Ackerflächen ohne Topographie und ohne Furchen entwickelt. Sie räumen ein, das bei Anwendung der Algorithmen auf landwirtschaftlichen Flächen mit Topographie und Furchenstrukturen es zu Fehlbewertungen der Rauigkeit und Bodenfeuchte kommen kann.

Zusammenfassend wird der Gültigkeitsbereich der beiden Modelle dargestellt:

Gültigkeitsbereiche	ks	kl	θ	m_v	Polarisiert
OH-Modell	0.1 – 6.0	2.5 - 20	10° - 70°	9 – 31 %	kreuz-polarisiert
DUBOIS-Modell (L-Band)	0.08 – 0.8	2.5 - 20	30° - 60°	0 – 35 %	gleich-polarisiert

Tab.3.2: Gültigkeitsbereiche der empirischen Modelle

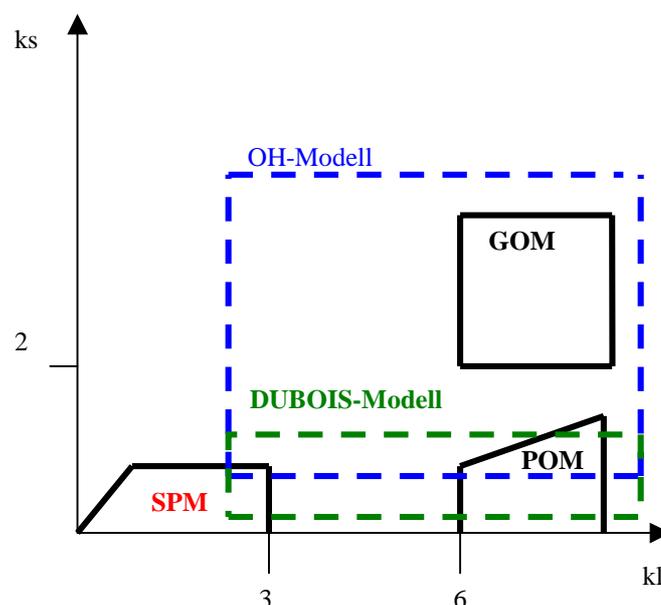
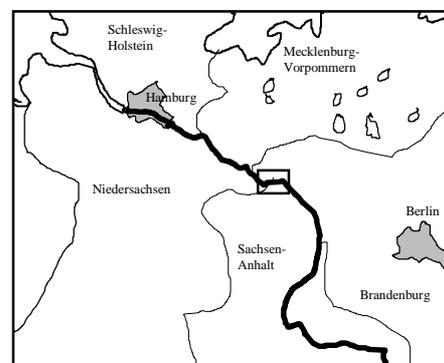


Abbildung 3.2: Darstellung der Gültigkeitsbereiche der theoretischen und verwendeten empirischen Modelle im $ks - kl$ Raum.

An dieser Stelle soll daraufhingewiesen werden, dass die Inversionsalgorithmen, für das OH und das DUBOIS-Modell hier nicht aufgeführt werden. Diese können in der Diplomarbeit von Thomas Busche nachgelesen werden.

4 Geographie des Untersuchungsgebietes

4.1 Geographische Lage, Größe und naturräumliche Zuordnung



Übersichtsdarstellung Untersuchungsgebiet

Die heutige Elbaue ist die jüngste naturräumliche Einheit und entstand im Holozän. Kennzeichnend für diese Zeit sind wechselnde Abfließbahnen im Gefolge von Verlagerungen der Sand- und Schlammflächen. Bis in die Zeiten des verstärkten Deich- und Buhnenbaues bestand ein natürliches dynamisches Gleichgewicht mit Erosions- und Sedimentationsbereichen. Seit dem Mittelalter wurde durch den Deichbau dieses dynamische Gleichgewicht am Elbestrom zunehmend gestört.

Trotz mehrerer Meliorationsmaßnahmen sind bis heute im Binnenland noch Spuren von einer natürlichen, dynamischen Aue erkennbar. In den Außendeichbereichen, die von der Elbe bei Hochwasser noch zugänglich sind, werden dynamische Strukturen nach Abfließen des Elbwassers erkennbar. Zu diesen Strukturen gehören Kolke, Rinnen, Bracke, Sandbänke und andere. Einige wenige natürliche Auenbereiche sind an der Elbe erhalten geblieben. Im Untersuchungsgebiet gibt es die einmalige Möglichkeit auf relativ kleinem Raum, einerseits die hohe Strukturvielfältigkeit einer 'natürlichen' und andererseits einer stark durch den Menschen geprägten Landschaft zu untersuchen.

Das Untersuchungsgebiet liegt im Bereich der "Unteren Mittelbe" und erstreckt sich von Fluß-km 465 bei Cumlosen bis Fluß-km 485 bei Lenzen. Das Gebiet hat in Luftlinie eine Größe von 15 [km] Länge und 5.4 [km] Breite, die nach dem Flugstreifen bemessen wurde. Es liegt im Dreiländereck von Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Niedersachsen, im Landschaftskreis Prignitz, Altmark und Wendland.

Die nordwestliche Begrenzung des Untersuchungsgebietes bildet die Stadt Lenzen in Brandenburg, im Nordosten stellt das Cumloserer Vordeichsland in Brandenburg die Begrenzung dar, im Südosten bildet der Aland in Sachsen-Anhalt in der Nähe von der Siedlung Klein Wanzer die Grenze und im Südwesten stellt der Nordrand von der Siedlung Restorf die Grenze in Niedersachsen dar.

Folgende Landschaftseinheiten können im Untersuchungsgebiet zusammengefaßt werden: Wiesen, Weiden (Binnen- und Außendeichs), landwirtschaftlich genutzte Flächen (Acker- und Grünlandflächen), Auenwälder (Binnen- und Aussendeichs), urbane Siedlungen (Gehöfte bis Städte) und die Elbe. Die größten urbanen Siedlungen im Gebiet sind, rechtselbisch, die Stadt Lenzen und, linkselbisch, die Stadt Schnackenburg. Die Elbe fließt mittig durch das Untersuchungsgebiet, die Landschaft in einen rechts- und linkselbischen Bereich trennend.

Während der dreiwöchigen Geländekampagne im November 1996 fand eine Erkundung und Begehung des Untersuchungsgebietes statt. Auf dieser Grundlage erfolgte eine Aufteilung in sechs Testareale mit jeweils fünf bis achtzehn Testflächen. Die Größe der Testflächen wurde nach vegetationskundlichen Gesichtspunkten durch die Minimalareale festgelegt. Dies sind repräsentative, möglichst homogene Teilflächen. In Tabelle 1 sind die ausgesuchten Testareale und Testflächen mit den dazugehörigen Auswahlkriterien aufgelistet:

AREAL	BEZEICHNUNG / STANDORT	TESTFLÄCHEN (aus TK entnommen)	AUSWAHLKRITERIUM
A1	Rückdeichungs- bereich Lenzener-Kuhblanke (rechts-elbisch) (12 km ²)	Inhomogene Flächen: 1a: Trockenrasen (2 500 m ²) 1b: Schlehengebüsch (1 000 m ²) 1c: Stieleichen(10 000 m ²) 1d: Aufforstung(2 500 m ²) 1e: Wasserschwad(2 000 m ²) 1f: Glatthafer Wiese(2 500 m ²) 1g: Wiesenfuchsschwanz() 1h: Queckendominiertes Auengrünland (2 000 m ²) 1i: Schweinegehege(2 500 m ²) Homogene Flächen (Grünland): Bodenfeuchteprofil von der Straße bis zum Deich (Strecke 1,5 km)	9 Testflächen Binnendeichbereich durchsetzt mit rezenten Rinnen (bei Hochwasser sind die Rinnen mit Qualmwasser gefüllt), große homogene Flächen, inhomogene Flächen, Testgebiet des Projektes 'Ökologie der Elbe'.
A2	Außendeichbereich Lütkenwischer Werder (rechts-elbisch) (2,8 km ²)	2a: Rohrglanzdominiertes Auengras (2 500 m ²) 2b/e: Wiesenfuchsschwanz (2 500 m ²) 2c/d. Queckendominiertes Auengrünland (2 500 m ²) Bodenfeuchteprofil vom Deich bis zur Elbe (Strecke 800 m)	5 Testflächen Außendeichbereich, Rinnenstrukturen, direkter Einfluß durch Hochwasser
A3	Außendeichbereich	keine Testflächen	0 Testflächen

	Cumloser Vordeichland (rechts-elbisch) (2,5 km ²)		Vergleichsfläche zu A2
A4	Garbe (Auenwald) nord-westlich Wahrenberg (links-elbisch) (9 km ²)	4a: Weichholzaue (400 m ²) von 4b: Grünlandwiese(400 m ²) 4c:Hartholzaue (Eichenwald) (400 m ²) 4d: Hartholzaue (Pappeln) (400 m ²)	4 Testflächen naturnaher Auenwald, Rinnenstrukturen, Hochwassereinfluß hetero- u. homogene Flächen
A5	Ackerflächen südlich von Schnackenburg (links-elbisch) und nord- westlich vom Lütkenwischer Werder (rechts-elbisch) (3 km ²)	8 x Saatbett-Felder (unbedeckt) 2 x Saatbett-Felder (leicht bedeckt) 4 x geegte Felder 3 x gepflügte Felder 1 x gegrubbertes Feld (Größe der Felder zwischen 5 ha bis 8 ha)	18 Testflächen Bodenart, Bearbeitungszustand, Vegetationsbedeckung, Größe.
A6	Elbholz (Auenwald ähnlich) östlich von Pevestorf (links-elbisch) (5,25 km ²)	6a: Eichenwäldchen (400 m ²) 6b: Lärchen/Birken (400 m ²) 6c: Eichenwald/Schlehen (400 m ²) 6d: Eichen/Kastanien (400 m ²) 6e: Buchenjungwuchs (400 m ²) 6f: Fichten/Douglasien (400 m ²)	8 Testflächen zwei Testflächenbereiche Auenwald, u. Auenwaldähnlich, Teilstück eingedeicht, u. Qualmwasserbeeinflußt, Teilstück Hochwasserbeeinflußt, hetero- und homogene Flächen.

Tab.4.1 Testareale und Testgebiete des Untersuchungsgebietes Lenzen-Cumlosen

Auf den Arealen 1 (A1) Lenzener-Kuhblanke und Arealen 2 (A2) Lütkenwischer Werder befinden sich Testflächen des interdisziplinären Forschungsverbundvorhabens (FKZ 0339571) „Möglichkeiten und Grenzen der Auenregeneration und Auenwaldentwicklung am Beispiel von Naturschutzprojekten an der Unteren Mittelelbe“. Ihr Ziel ist es, die Folgen der Deichrückverlegung und Methoden der Auenwaldneubegrünung beispielhaft zu untersuchen. Um Konzepte für eine nachhaltige Landnutzung zu entwickeln, werden Prognosen für die Entwicklung nach erfolgter Rückdeichung erarbeitet. Unter Beteiligung von acht wissenschaftlichen Disziplinen sollen Auswirkungen auf die Grundwasserdynamik, Bodenentwicklung, Veränderung der Vegetation und Fauna, Landbewirtschaftung, Analyse und Bewertung von Methoden zur Auenwaldentwicklung, Formulierung und Ausgestaltung übertragbarer Entwicklungsprognosen untersucht werden (NEUSCHULZ, PURPS & HAPE 1999).

Gleichzeitig finden auf diesen Arealen hydraulisch-morphologische Untersuchungen bezüglich der Veränderungen von Strömungssituationen bei Rückdeichungen statt. Zur Anwendung kommen verschiedene eindimensionale und zweidimensionale hydronumerische Strömungsmodelle. Diese Untersuchungen werden von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) vorgenommen (FAULHABER 1997).

Das Testareal 3 (A3) sollte nach ursprünglichen Überlegungen als Referenzfläche zu Testareal 2 dienen. Nach den Radarbefliegungen wurde sehr schnell deutlich, dass dies aus Mangel an verfügbaren Daten nicht möglich war. Im C-, L- und P-Band konnten keine Radar-Daten, aufgrund der begrenzten Speicherkapazität am Board erhoben werden. Es fanden in diesem Gebiet demzufolge keine weiteren Auswertungen statt.

Die Testareale 4 (A4) und 6 (A6) wurden aufgrund ihrer seltenen und typischen Auenvegetation in Hinblick auf deren Standort, hinter einem Sommerdeich und hinter einem Winterdeich, ausgewählt. Das Auen-

Waldgebiet in Areal 4 ‚Naturschutzgebiet Garbe‘ ist durch seine periodischen Überflutungen von der Elbe stark beeinflusst und stellt mit seinen auentypischen Vegetationseinheiten ein seltenes und schützenswertes Areal dar. Das Testareal 6 ‚Elbholz‘ gleicht einem charakteristischen Aufbau eines Auenwaldes trotz seines Standortes hinter dem Winterdeich. Die für einen Auenwald wichtige periodische Überflutung wird hier durch das Qualmwasser direkt hinter dem Deich, welches sich stark ins Innenland ausbreitet, gegeben. Ein zweiter wichtiger Mechanismus in einem Auenwald ist die Sedimentation von angeschwemmten Feinmaterialien, die in diesem Fall nur für den Auenwald in Testareal 4 gegeben ist. Unter den Fachleuten ist keine Einigung zur eindeutigen Charakterisierung dieses Waldes gegeben, da nicht alle Mechanismen, die zu einem typischen Aufbau eines Auenwaldes führen gegeben sind, so soll in dieser Arbeit der Begriff eines ‚auentypischen Waldes‘ für das Testareal 6 verwendet werden.

Das Testareal 5 (A5) beinhaltet die landwirtschaftlich genutzten Flächen auf der brandenburger wie auch niedersächsischen Seite. Insgesamt handelt es sich hier um 18 Testflächen, wobei 6 Flächen in Brandenburg und 12 Flächen in Niedersachsen, ausgewählt wurden sind.

Auf den sechs (A6) Testarealen wurden unterschiedliche Geländeparameter, gegeben durch verschiedene Vegetationseinheiten, erhoben. Die im Kapitel 5.2 erläutert werden.

4.2 Vegetationseinheiten und Landnutzung

4.2.1 Potentielle Vegetation der Elbaue

Als potentielle natürliche Vegetation in den Flußauen Mitteleuropas können im Querprofil fünf semi-terrestrische Hauptlebensräume unterschieden werden. Die Hauptlebensräume und ihre verschiedenen Lebensgemeinschaften erfahren hauptsächlich nach dem ökologischen Gradienten Überflutungsdauer (Geländehöhe über Mittelwasser) und Substratdynamik (Korngrößenverteilung) ihre Anordnung.

Nach ELLENBERG (1996) erfolgt die zonale Unterteilung im Querschnitt des Flußbettes bei Niedrigwasser:

- In den amphibischen Uferbereich mit der Ansiedlung von Pioniervegetation.
- In der sich anschließenden Flußröhrichtzone, mit dem dort wachsenden Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) und verschiedener kurzer Gesellschaften an Gräsern.
- In einen schmalen ufersäumenden Gebüschstreifen, mit biegsamen Korb- und Mandelweiden (*Salix viminalis*, *S. triandra*), die sich auf der Höhe der Mittelwasserlinie befinden.
- In die sich auf dem nächst höheren Niveau anschließende Zone der Weichholzaue (*Salicetum albo-fragilis*), mit einer dominierenden Baumschicht aus Bruch- und Silberweiden (*Salix fragilis*, *S. alba*).
- In die folgende Zone der Hartholzaue, mit Ihren charakteristischen Vertretern der Stieleiche (*Quercus robur*), Esche (*Fraxinus excelsior*) Feld- und Flatterulme (*Ulmus minor*, *U. laevis*).

Auf den feuchten und grundwasserbeeinflussten Randgebieten der Aue bilden sich Eichen-Hainbuchenwälder (*Quercus-Carpinetum*) aus.

4.2.2 Rezente Vegetation der Elbaue

Die wenigsten Flüsse Mitteleuropas zeigen ideale Vegetationsprofile, wie sie nach ELLENBERG (1996) aufgeführt werden, auf. Dies kann zum einem an der flußtypischen Dynamik und zum anderen mit der Inkulturnahme durch den Menschen in der Aue liegen. So wurden mit dem Ausbau der großen Flüsse im letzten Jahrhundert viele charakteristischen Auenbiotope zerstört. Hartholz- und Weichholzaunenkomplexe,

Röhrichte und artenreiches extensiv genutztes Grünland sind aufgrund wasserbaulicher Maßnahmen und intensiver Landwirtschaft oft nur noch in Resten vorhanden oder gänzlich beseitigt. (ELLENBERG 1996, POTT 1995, 1996, KESEL 1997).

Im folgenden soll eine grobe Vegetationsbeschreibung der Testareale hinsichtlich ihrer Vegetationszonierung vorgenommen werden. Auf eine detaillierte Vegetationsbeschreibung im Untersuchungsgebiet soll auf Arbeiten von HELLWIG, KUNITZ, SPEIER & POTT (1999), HEINKEN, GAUSSMANN & SCHWARTZ (1999) verwiesen werden.

Areal 1 Rückdeichungsbereich Lenzener-Kuhblanke (Binnendeichbereich)

Insgesamt können in diesem Testareal 25 Vegetationseinheiten unterschieden werden.

Den überwiegenden deckenden Anteil von 91 [%] bilden verschiedene Pflanzengesellschaften des wechselfrischen Grünlandes. Als wichtigster vegetationsdifferenzierender Faktor gilt hier die landwirtschaftliche Nutzung. Auf Flächen mit einer hohen Beweidungsrate, übers Jahr gesehen, bilden sich Weidelgras-Weißkleeweiden (*Lolium-Cynosuretum cristati*), welche bei stärkerem Mahdeinfluß in die *Elymus repens-Alopecurus pratensis*-Gesellschaft übergehen können. Die höchsten Geländebereiche werden jedoch von Beständen des *Dauco-Arrhenatherum elatioris* eingenommen. *Arrhenatherion*-Arten, wie der Glatthafer (*Arrhenatherum elatius*), die Rundblättrige Glockenblume (*Campanula patula*), der kleine Klee (*Trifolium dubium*) und das Weiße Labkraut (*Galium mollugo*) zeigen trockenere und z. T. magere Böden an. Gehölzgesellschaften nehmen derzeit weniger als 5 [%] Flächenanteil des Testareales ein. Die größten Anteile entfallen auf einen stark anthropogen überformten Hartholzauenwaldrest (*Quercus-Ulmetum*), im mittleren, elbnah gelegenen Abschnitt der Rückdeichfläche. Weichholzauenwälder sind jedoch derzeit nicht auf diesem Areal vorzufinden. (HELLWIG, KUNITZ, SPEIER & POTT 1999).

Areal 2 Lütkenwischer Werder (Außendeichbereich)

Im Testareal 2 können fünf halbtrocken bis wechselnaße Grünlandgesellschaften unterschieden werden. Die je nach Standortlage und damit jährlicher Überflutungsdauer

- in wechselfrisch bis halbtrockene Gesellschaften des Straußblütigen Ampfers, Subass. v. Rot-Straußgras (*Chrysanthemo-Rumicetum thrysiflori*, Subass. von *Agrostis capilaris*) mit einem Flächenanteil von 21 [%],
- in wechselfrisch bis wechselfeucht Gesellschaften des Straußblütigen Ampfers, Subass. v. Gundermann & Quecken-Wiesenfuchsschwanz-Gesellschaft (*Chrysanthemo-Rumicetum thrysiflori*, Subass. von *Glechoma hederacea* & *Elymus reptans-Alopecurus pratensis-Gesellschaft*) mit einem Flächenanteil von 35 [%],
- in wechselfeuchte bis feuchte Gesellschaften des Rohrglanzgras-Röhrichte (*Phalaridetum arundinacea*) mit einem Flächenanteil von 12 [%],
- und in feuchte bis wechselnaße Gesellschaften des Wildsumpfkresse-Flechtstraußgras & Knikfuchsschwanz-Flutrasen (*Rorippo-Agrostidetum stoloniferae* & *Ranunculo-Alopecuretum geniculati*) mit einem Flächenanteil von 12 % unterschieden werden können.

Hartholz wie Weichholzgewächse sind in diesem Testareal nicht vorzufinden.

Areal 3 Cumloser Vordeichsland (Außendeichbereich)

Zu diesem Testareal wurden keine Angaben zur Vegetationsbeschreibung des Gebietes erhoben.

Areal 4 Garbe-Auenwald (Sommerdeich)

Einer der noch an einen sehr naturnahen Aufbau gleichenden Auenwald stellt die Garbe mit Weichholz- und Hartholzauengewächsen in der ‚Unteren Mittelbe‘ dar. Dieses Gebiet mit einer Gesamtgröße von 1650 ha liegt seit 1991 im Naturschutzgebiet ‚Garbe-Alandniederung‘. Seit 1998 sind die Aland-Elbe-Niederungen Teil des ‚Biosphärenreservates Flußlandschaft Elbe‘. In diesem Testareal überwiegen vor allem Hartholzgewächse, mit einem Flächenanteil von 70 [%], die Weichholzgewächse sind mit einem Flächenanteil

von 20 [%] und Grünlandgesellschaften mit einem Flächenanteil von 10 [%] vertreten. Bei den Hartholzauengewächsen handelt es sich hier um einen vollständig erhaltenen Eichen-Ulmen -Auwald (*Quercu-Ulmetum minoris*).

Areal 5 Schnackeburger-Ackerflächen (Binnendeichbereich)

In diesem Testareal findet ausschließlich eine intensive Ackerflächen Bewirtschaftung mit unterschiedlichen Anbaufrüchten statt. Angebaut wird in dieser Region vor allem Winter- und Sommergetreide, sowie Raps, Kartoffeln und Mais. Die Größen der Ackerflächen variieren zwischen 5 bis 8 [ha]. Zu den 12 Schnackeburger landwirtschaftlichen Testflächen wurden noch 6 landwirtschaftliche Testflächen im Raum Brandenburg in der Nähe Lütkenwisch und Jagel ausgewählt.

Areal 6 Elbholz-Auenwald (Binnendeichbereich)

In diesem Testareal befindet sich trotz seiner Binnendeichlage ein geschlossener Eichen-Ulmen-Eschen-Bestand als Teil der Hartholzaue. Er unterliegt mit dem Qualmwasser den periodischen Überschwemmungsrhythmen der Elbe und ist daher in seinem naturnahem Aufbau eines Auenwaldes ähnlich.

4.3 Geologie und Geomorphologie

Junge oberflächennahe Quatär-Ablagerungen bilden die heutigen morphologischen Strukturen der Elbaue. Die im Untersuchungsgebiet in Erscheinung tretenden Strukturen verdecken ein komplexes System von tief eingeschnittenen elster-eiszeitlichen Gletscher- und Schmelzwasserrinnen sowie halokinetische Strukturen vergangener Epochen.

DUPHORN/SCHNEIDER (1983) unterteilen den vertikalen Aufbau des Untergrundes in vier geologische Strukturen.

- Das Oberflächenstockwerk mit dem saale-eiszeitlichen End- und Stauchmoränenrelief, dem weichseleiszeitlichen Elbe- Urstromtal und der holozänen Elbaue; Tiefe bis ca. 150 [m].
- Das System der elster-eiszeitlichen Gletscher- und Schmelzwasserrinnen bis ca. 500 [m] Tiefe.
- Das salttektonische Stockwerk des subsalinaren Untergrundes im Liegenden der Zechstein-Salzgesteine.

Dieser Aufbau zeigt die wechselvolle Geschichte des Gebietes seit dem Oberkarbon vor ca. 285-325 Mio. Jahren. Das Oberkarbon bildet das Basisgestein der 'Norddeutschen Senke', in der sich das Untersuchungsgebiet befindet. Im Übergang vom Rotliegenden (vor ca. 235 – 258 Mio. Jahren) zum Zechstein (vor ca. 225 – 235 Mio. Jahren) vollzog sich eine tiefgreifende Umstellung der paleographischen Verhältnisse. Dabei wurde die ‚Norddeutsche Senke‘ vertieft und erweitert und die Möglichkeit eröffnet von der Nordsee her das Zechstein-Meer eindringen zu lassen. Im Zechstein kam es durch tektonische Bewegungen zum viermaligen Abschnüren des Beckens, so das nach Verdunstung des Meeres sich Salze nach einem bestimmten salinaren Zyklus absetzen konnten. Die Zechsteinsalze gerieten durch die nachfolgenden Schichten der Trias, Jura und Kreide (vor ca. 225 – 65 Mio. Jahren) erheblich unter Druck, so daß es zum diapirischen Aufstieg der Salze kam. Nach Ablagerung von weicheren tertiären Schichten erfolgte im Menap-Glazial (vor ca. 1 Mio. Jahren) der Durchbruch des Salzstockes Gorleben-Rambow an die Oberfläche. Im nachfolgenden Interglazial kam es zur Salzauslaugung und die Gletscher des Elsterglazials benutzten, die so entstandenen Subrosionssenken und die vorhandenen Randsenken der Salzstöcke als Leitbahnen und schürften diese tiefgründig aus (DUPHORN/SCHNEIDER 1983).

Anschließend wurden die Rinnen wieder verfüllt und in der Saaleeiszeit dreimal von der Gletschermassen überfahren. Die saale-eiszeitlichen Ablagerungen bilden heute die Altmoränenlandschaft in dem südlich an das

Elbe-Urstromtal angrenzenden Gebiet. Im Weichselglazial blieben die Eismassen nördlich der heutigen Elbe stehen. Dort prägten sie die saalezeitliche Grundmoränenlandschaft.

Im Periglazial (vor ca. 350.000 – 2 Mio. Jahren) herrschte Permafrost, so daß die anfallenden Schmelzwässer nicht im Boden versickern konnten. Zusammen mit den von Süden entwässernden Flüssen, deren Abflußbahnen durch die Eismassen versperrt waren, wurden die Wassermassen eisrandparallel zur Nordsee geleitet. Vor dem Gletscherrand entstand ein Geflecht aus Stauseen und Wasserläufen, die im Laufe der Zeit ein mehrere Kilometer breites, flaches Urstromtal, lagerten sich im Hochglazial bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten 20 - 40 [m] mächtige, sandige und kiesige Schottermassen ab (NEUSCHULZ, PLINZ, WILKENS, 1994). Mit zunehmender Erosionskraft schnitt sich die Elbe wieder in die Niederterrasse ein, ohne die vorher abgelagerten Sedimente zu durchschneiden. Die Folge ist ein hoher Sedimenttransport im Mittellauf der ihr den Namen 'Sandfluß' verlieh.

An den Geesthängen kam es durch Solifluktion und Abschwemmung zur Ausbildung von sandigen Schwemmfächern, sogenannten Talsanden, die sich weit ins Urstromtal hineinschoben (DUPHORN/SCHNEIDER 1983). In der vegetationsarmen spätglazialen Landschaft begann die äolische Überprägung der nunmehr trockenengefallenen Niederterrasse, auf der sich im Holozän große Dünenfelder bildeten.

Mit dem Rückzug der Gletscher und dem damit verbundenen eustatischen Meeresspiegelanstieg und isostatischen Aufstieg der Landmasse war die Erosionsbasis der Elbe ab dem Holozän ständigen Veränderungen unterworfen. Dadurch änderte sich auch die Strömungsenergie in den einzelnen Streckenabschnitten. Mit der Inkulturnahme der Landschaft durch den Menschen und der damit einsetzenden Rodung kam es zu starker Bodenerosion. Dies führte zu einer Veränderung der Schwebstoffzusammensetzung in der Elbe. Die regelmäßig auftretenden Hochwasserereignisse lagerten in Folge verstärkt feinkörniges Material ab. Diese abgelagerten Lehme und Tone sind heute weitgehend bodenbildend in der Elbtalau (FLEMMING 1997).

Das Untersuchungsgebiet läßt sich in drei morphologische Einheiten nach DUPHORN/SCHNEIDER (1983) unterteilen:

- In Altmoränenlandschaften oder Geest-Gebieten westlich und nördlich des Untersuchungsgebietes, bestehend aus saalekaltzeitlichen Moränen, die vor ca. 250.000 bis 130.000 Jahren gebildet wurden. Im Untersuchungsgebiet repräsentiert der Hóbeck als Geestsrest diese naturräumliche Einheit.
- In Elbe-Urstromtal, welches zwischen 15.000 und 20.000 v. Chr. von den Schmelzwässern der letzten Eiszeit (Weichselvereisung) erodiert wurde, sowie zugehörige Ablagerungen der Niederterrasen.
- In die Elbauen, die mit den jüngsten Ablagerungen, d.h. mit hauptsächlich im Holozän sedimentierten Flußsanden und Auenlehmen bedeckt sind.

4.4 Bodengeographie

Die natürliche Morphodynamik des Flusses, wie das Mäandrieren und Abschnüren von Mäanderbögen, führte zur Entstehung von Stillgewässern. In strömungsberuhigten Bereichen lagerten sich Lehme und Tone ab. Altarme und Altwässer verlandeten, wodurch Torfe und Mudden entstanden. Die Sedimentationsprozesse beschränkten sich jedoch nicht nur auf das weitverzweigte Netz des Flußlaufs. Bei den periodischen Überflutungen lagerte sich die Sedimentfracht auch auf den höher gelegenen Bereichen der Aue ab. Es kam dabei häufig zur schichtweisen Ablagerung von Flußsanden und Lehmen. Da die Sedimentationsrate in den vorhandenen Senken größer war, erfolgte eine allmähliche Einebnung der Aue.

Mit dem Austritt des Flußwasser aus dem Flußbett ist ein plötzlicher Sprung der Strömungsenergie verbunden, der das mittransportierte Material je nach Korngrößenverteilung ablagert. So lagern sich flußnah hauptsächlich Sande ab und in größerer Entfernung Lehme und Tone (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1992).

Die Sandfraktion in der Sedimentfracht einer Hochwasserwelle unterliegt gemäß ihrer Korngröße und ihres Gewichtes einem stärkeren Setzungsprozeß, so daß sich flußnah Uferwälle, auch Uferlehne genannt, ausbilden, hinter der sich die tiefer gelegene Aue erstreckt. Diese Prinzip eines Dammflusses erklärt auch die Verlegung des Hauptstromes oder der Nebenarme nach Überflutungen in die tiefer gelegenen Bereiche.

Der feineren Anteil der Sedimentfracht, als Auenlehm und -tone bekannt, bedecken heute die Elbniederung großflächig, nur vereinzelt ragen noch Sandlinsen bis an die Oberfläche. Als Auenlehm werden die bindigen, feinklastischen, holozänen Hochflutsedimente bezeichnet. Die Korngrößenverteilung bei Auenböden hängt allein davon ab, welche Fließbedingungen zur Zeit der Ablagerung herrschen. Bei wechselnden Fließgeschwindigkeiten entstehen geschichtete Sedimente mit schwankenden Korngrößenanteilen. Die Mächtigkeit der Auenlehmschichten schwankt oft auf kurzer Distanz zwischen fünf und 20 [dm]. Als Ursache für die Auenlehmsedimentation werden verschiedene Faktoren angeführt, die von den einzelnen Autoren unterschiedlich gewichtet werden. Die wichtigsten Faktoren sind einerseits das Einwirken der Menschen durch Rodungen und ackerbauliche Nutzungen und andererseits die Verringerung der Fließgeschwindigkeit.

Der vielfach hohe Tonanteil der Böden im Untersuchungsgebiet bedingt die schwierigen Standortbedingungen für die landwirtschaftliche Nutzung. Zwar haben die Tonböden ein sehr hohes Gesamtporenvolumen, aber nur einen geringen Anteil an Grob- und Mittelporen. Dadurch sind sie häufig mäßig bis schlecht durchlüftet und besitzen einen relativ geringen Anteil an pflanzenverfügbarem Wasser (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1992). Der größte Teil des Wassers wird in den Feinporen als Totwasser fest gebunden. Besonders bei fehlender Gefügebildung besitzen Tonböden eine geringere Wasserleitfähigkeit, so daß die Auenschichten stauend wirken. Im Untersuchungsgebiet treten wegen solcher undurchlässigen Auenlehme/ -tone weitverbreitet gespannte Grundwasserverhältnisse auf.

Die landwirtschaftliche Bearbeitung der Tonböden ist problematisch. Sie sind nur in einem bestimmten Feuchtezustand zu bearbeiten und gelten deshalb als 'Minutenböden'. Sowohl im feuchten als auch im trockenen Zustand müssen große Kräfte aufgewendet werden, um den Boden zu bearbeiten. Im feuchten Zustand ist der Boden plastisch (hoch viskose) und klebend. In diesem Zustand schmiert der Boden, wodurch das Befahren schwierig ist und die negativen Bodeneigenschaften durch Verdichtung noch verstärkt werden. Im trockenen Zustand bilden sich dagegen schwer zerstörbare Aggregate aus (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1992). Der Wasserhaushalt einer Region bestimmt somit die Eigenschaften des Bodens (FLEMMING 1997).

Mit der Inkulturnahme der Böden wird nicht nur in den Wasserhaushalt der Böden eingegriffen sondern auch die Entstehung von neuen Böden verhindert. Die Entwässerung der einmal entstandenen Auenböden wird vor allem durch Deiche und Entwässerungsgräben reguliert.

4.4.1 Bodenarten

In der Region der Mittleren Untereibe sind vor allem Torfe, Schlicke, Auentone, Auenlehme und Sande, sowohl Binnen- wie auch Aussendeichs vorzufinden. Nach der Einteilung des Untersuchungsgebietes in Areale findet im folgenden eine grobe an der Oberfläche kartierte Bodenart-Beschreibung statt.

Areal 1 Rückdeichungsbereich Lenzener-Kuhblanke (Binnendeichbereich)

ca. 70 % Ton Fraktion,

ca. 10 % Lehm Fraktion,

ca. 10 % lehmiger Sand Fraktion (Deich-Nähe),

ca. 5 % Sand Fraktion.

(Bodenarten-Karte 1:25.000 SCHWARZ, GRÖNGRÖFT & MIELICH 1999)

Areal 2 Lütkenwischer Werder (Außendeichbereich)

ca. 50 % lehmiger Sand Fraktion,

ca. 25 % Sand Fraktion,

ca. 20 % Ton Fraktion

ca. 5 % Lehm Fraktion,

(Bodenarten-Karte 1:25.000 SCHWARZ, GRÖNGRÖFT & MIELICH 1999)

Areal 3 Cumloserer Vordeichsland (Außendeichbereich)

ca. 50 % lehmiger Sand Fraktion

ca. 50 % Lehm Fraktion

(Bodenarten-Karte 1:100.000 Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg, Bereich Bodenkunde Eberswalde 1979)

Areal 4 Garbe-Auenwald (Sommerdeich geschützt)

ca. 70 % lehmiger Sand Fraktion

ca. 30 % Lehm Fraktion

(Bodenarten-Karte 1:100.000 Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg, Bereich Bodenkunde Eberswalde 1979)

Areal 5 Schnackenburg-Ackerflächen (Binnendeichbereich)

Die vorherrschende Bodenart auf den einzelnen Testflächen nach Reichsbodenschätzung (Flächenanteil in %) ist:

Testfläche	Bodenart	Testfläche	Bodenart
A5/1	IS *	A5/10	sL (55 %) L (30 %) S/T (10 %)
A5/2	L / sl *	A5/11	L (25 %) sL (20 %) S/T (10 %) SL (45 %)
A5/3	IS *	A5/12	SL (90 %) L (10 %)
A5/4	IS *	A5/13	SL (40 %) sL (60 %)
A5/5	IS *	A5/14	SL (100 %)
A5/6	L / sl *	A5/15	T (90 %) sL (10 %)
A5/7	S (70 %) Sl (20 %) LS (10 %)	A5/16	L (100 %)
A5/8	LT (70 %) L (10 %) SL (20 %)	A5/17	L (20 %) sL (60 %) S/L (20 %)
A5/9	L (35 %) SL (30 %) LT (20 %) SL (15 %)	A5/18	sL (40 %) S/T (60 %)

Tab. 4.3: Niedersächsisches Landesverwaltungsamt-Landesvermessung (1993): Bodenkarte auf der Grundlage der Bodenschätzung (1976). 1:5000, Katasteramt Lüchow, Blatt 2935 (20), Schnackenburg-West und Blatt 2935 (21), Schnackenburg. *Dominierende Bodenart nach Feldbegehung und Fingerprobe eingeschätzt.

Areal 6 Elbholz-Auenwald (Binnendeichbereich)

Zu dieser Region sind keine genauen Angaben zur Bodenart vorhanden. In weiten Bereichen sind Sand, lehmiger Sand, Lehm und Ton Fraktionen vorzufinden.

Niedersächsisches Landesverwaltungsamt-Landesvermessung (1993): Bodenkarte auf der Grundlage der Bodenschätzung (1976). 1:5000, Katasteramt Lüchow, Blatt 2934 (15), Pevestorf-Ost.

4.4.2 Bodentypen

Detaillierte Untersuchungen über vorkommende Bodentypen in der ‚Mittleren Unterelbe‘ sind von Veröffentlichungen aus MEYER & MIELICH (1983) sowie SCHWARZ, GRÖNGRÖFT & MIELICH (1997, 1999) bekannt.

Als charakteristische Bodentypen in der ‚Mittleren Unterelbe‘ von der Elbe bis ins Binnenland aufgeführt sind Rambla, Paternia und Vegen vorzufinden. An Standorten mit einem hohen Grundwasserstand sind Auengleye, Auennaßgleye und Anmoorgleye vorzufinden. Neben den pedologisch wichtigen Effekten und Faktoren wie Art der Sedimentation, Dauer der Überstauchung und Grundwasserstandsänderungen ist für die ökologische Interpretation der Bodentypen auch der jahreszeitliche Verlauf des Hochwassergeschehens von großer Bedeutung. Diese Faktoren des Hochwassereinflusses, wirken in variierenden Kombinationen und unterschiedlicher Intensität bzw. Dauer auf die Bodeneinheiten, so daß innerhalb der Auenböden erhebliche Standortunterschiede zu verzeichnen sind (MEYER & MIELICH 1983).

4.5 Klima

Das Untersuchungsgebiet zählt klimatisch zum ‚stark maritim beeinflussten Binnentiefeland‘ (KLIMA-ATLAS F.D. GEBIETE DER DDR). Mit dieser Einteilung wird der Übergangscharakter zwischen dem ausgesprochen feuchten Nord- und Ostseeklima und dem trockeneren und windärmeren Klima Mittel- und Ostdeutschlands dokumentiert.

Das Ansteigen des Kontinentalitätsgrades spiegelt sich durch zunehmend größere Amplituden, den tiefsten Temperaturen im Februar und den höchsten im Juli von NW nach SE, wieder. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 8 °C. In der Aue wirkt sich die ausgedehnte Grünlandniederung darüberhinaus noch stark modifizierend auf das Makroklima aus. Die Wiesen stellen einen wirksamen Kaltluftproduzenten und –speicher dar. Dies wirkt sich durch eine erhöhte Zahl von Nebel- und Frosttagen aus.

Die mittlere Summe der Jahresniederschläge in der Löcknitzniederung liegen zwischen 575 und 615 [mm]. Die größten Niederschläge entfallen dabei auf den Monat Juli und die geringsten auf den den Monat Februar eines Jahres. Die mittlere Summe der Jahresniederschläge für den südlichen Raum der Elbe (Höbeck-Schnackenburg) wird nach dem Deutschen Wetterdienst in Schnackenburg zwischen 581 und 590 [mm] bemessen.

Zur April-Kampagne 1997, etwa vier Tage vor dem Überflug, konnte eine wechselhafte Wetterlage mit abwechselnden Niederschlägen und längeren Aufklärungen beobachtet werden. Die Tageshöchsttemperaturen lagen zwischen 5° und 10° Grad Celsius. Zum Zeitpunkt der Befliegung betrug die Tageshöchsttemperatur um 10° Grad Celsius und es wurde kein Niederschlag verzeichnet.

Zum Zeitpunkt der August-Kampagne wurden bis zu 10 Tagen vorher keine Niederschläge verzeichnet und die durchschnittliche Tagestemperatur betrug 17° Celsius.

4.6 Hydrographie und Hydrologie

4.6.1 Die Elbe und ihr Einfluß auf die Aue

Die Elbe (techisch Labe) ist mit einer Länge von rund 1091 [km] einer der großen Flüsse Mitteleuropas. An ihrem Einzugsgebiet, das eine Fläche von 148.268 [km²] hat, sind Österreich, Polen, Tschechien und Deutschland beteiligt. Die Quelle der Elbe liegt im Riesengebirge in 1384 m NN Höhe bei der Ortschaft Spindleruv Myln (Tschechische Republik). Auf ihrem Weg zur Mündung durchfließt die Elbe das Riesengebirge, Vorgebirge, das Böhmisches Kreidebecken, das Böhmisches Mittelgebirge und schließlich das Elbsandsteingebirge bevor es zwischen Meisen und Riesa das Mittel- und Norddeutsche Tiefland erreicht. Ab der Staustufe bei Geestacht unterliegt sie dann dem Tiedeeinfluß der Nordsee, in die sie mündet (IKSE 1995).

Ein großer Teile des Einzugsgebietes, 364.52 [km], liegt im Mittelgebirgsraum, wodurch das Abflußregime wesentlich bestimmt wird. Aufgrund des Abflußverhaltens gehört die Elbe dem Regen- und Schneetyp an, mit vorwiegenden Winter- und Frühjahrshochwässern (IKSE 1995). Jedoch treten im Gegensatz zu anderen Flüssen Nord- und Westdeutschlands an der Elbe auch regelmäßig Frühsommerhochwässer ein. Diese werden durch starke, langandauernde Niederschläge im Oberlauf ausgelöst (MEYER & MIELICH 1983).

Gemäß der Festlegung der IKSE (1994) wird die Elbe in Ober-, Mittel- und Unterlauf eingeteilt (die im folgenden angegebene Elbe-Kilometrierung bezieht sich auf den deutschen Teil der Elbe):

- Obere Elbe: Von der Elbquelle im Riesengebirge bis zum Übergang zum norddeutschen Flachland (Elbe-km 0 – 96.0).
- Mittlere Elbe: Norddeutsches Flachland bis zum Wehr Geestacht (Elbe-km 96.0 – 585.9).
- Untere Elbe: Vom Wehr Geestacht bis zur Seegrenze bei Cuxhaven-Kugelbake (Elbe-km 585.9 – 727.7).

Mit dem Eintritt der Elbe in das Mittel- und Norddeutsche Tiefland besteht das Bodenmaterial der Sohle überwiegend aus Grobsand bis Mittelsand. Die Korngrößenverteilung liegt zwischen 0.5 bis 2 [mm] (IKSE 1995). Ab Aken wird das Elbtal beidseitig von pleistozänen Ablagerungen begrenzt, so daß der Grundwasserleiter in direkter Verbindung mit dem Elbstrom steht (BfG 1994). Da die Elbe bei Lenzen in die etwa 20 – 40 [m] NN mächtige Niederterrasse eingeschnitten und das Sohlenmaterial aus wasserdurchlässigem Sand besteht, wirken sich die Wasserstände der Elbe unmittelbar auf die Grundwasserstände im angrenzenden Auengebiet aus. Die Einflußnahme der Elbe auf die Grundwasserstände wird mit zunehmender Entfernung durch Wasseraufnahme der Böden und Aussickerung in die Gräben abgeschwächt (Wasserwirtschaftsdirektion Elbe – Suede – Elde 1968, zitiert in FLEMMING 1997).

Die Aue kann als einheitlicher Grundwasserleiter betrachtet werden, in dem bei Niedrig- bis Normalwasserstand der Elbe die Fließrichtung von den Talrändern zur Elbe hin gerichtet ist. Dabei können gespannte Grundwasserverhältnisse unterhalb der Auenlehmdecke entstehen, die vielfältig im Untersuchungsgebiet zu beobachten sind. Sobald der Elbwasserstand höher als der Grundwasserstand liegt, dreht sich die Fließrichtung um und Elbewasser dringt in den Grundwasserleiter ein. Dabei wird das Grundwasser rückgestaut. Dieser Zeitpunkt ist laut 'Technischer Ökonomischer Zielsetzung' beim Mittelwasserstand der Elbe erreicht und wird als Beginn des Qualmens angesehen. Als Qualmen wird der Prozess des Austreten des Grundwassers an der Binnenseite von Deichen bezeichnet. Der gespannte Grundwasserkörper kann nun durch 'Leckstellen' der Auenlehmdecke, verursacht durch existierende Bahnen abgestorbener Pflanzenreste oder -wurzeln und eine ausgeprägte Polyederstruktur des Bodens, in die Aue durchdringen. Bevorzugt tritt das gespannte Grundwasser an ehemaligen Deichbruchstellen und alten Rinnensystemen aus. Steigt aber das Elbwasser schneller als das rückgestaute Grundwasser, so entsteht ein Grundwasserdom und Elbwasser dringt über den Grundwasserleiter in die Aue ein. Das ausgetretene Wasser

an der Binnenseite des Deiches wird auch als Qualmwasser bezeichnet (MEYER & MIELICH 1983, TACKE 1989, FLEMMING 1997).

4.6.2 Nebenflüsse der Elbe im Untersuchungsgebiet

Die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Nebenflüsse, rechtselbisch die Löcknitz und linkselbisch der Aland sind Flüsse, die mit niedrigen Wassertiefen und geringem Gefälle, von 0,07 [%], sehr stark vom Wasserstand der Elbe beeinflusst werden. Aufgrund dieses geringen Gefälles im Elbe-Urstromtal verlaufen viele Nebenflüsse mehrere Kilometer lang parallel zum Hauptstrom. Dabei handelt es sich heute meist um Flußbetten von Flußläufen, die einst von der Elbe oder einer ihrer Nebenarme angelegt worden sind.

Die geringere Geländehöhe der Aue zur Elbe führt bei Hochwasser zu einem schnellen und umfangreichen Einstrom des Elbhochwassers in Bereiche, die weitab vom Elbestrom liegen können. Die Gesamtheit der Nebenflußtäler stellte ursprünglich ein System von Rückstau- und oder Retentionsräumen dar, in dem durch die Verteilung der Elbhochwässer auch eine Absenkung der Hochwasserspitzen bewirkt wurde (NEUSCHULZ et al. 1994).

Die Löcknitz entsteht aus dem Zusammenfluß mehrerer Quellbäche westlich von Marnitz in der Nähe von Parchim in Mecklenburg-Vorpommern und mündet nach einem langen Weg parallel zur Elbe bei der Ortschaft Braatz (Elbe-km 502) in die Elbe.

Der Aland, ein ehemaliger Grenzfluß, unterlag im Unterlauf mehreren Meliorationsmaßnahmen zum Schutz vor Elbhochwässern. Der Aland erhält sein Wasser aus der Biese, die in der Nähe der Kollwitz-Letzlinger Heide entspringt. Seinen Namen erhält er ab der Stadt Seehausen und mündet bei Schnackenburg in die Elbe.

5 Erhebung von Datenmaterial

Die ursprüngliche Planung ging von zwei Radarbefliegungen mit den dazugehörigen Geländekampagnen aus. In der Förderungsphase des Projektes fanden jedoch vier Geländekampagnen, zwei Radarbefliegungen, nachfolgende Laborarbeiten und erste Aufbereitungen der Daten statt.

Die Geländeaufnahmen sind zur Interpretation der Radarbilddaten unbedingt erforderlich. Die erhobenen Geländedaten und die Radarbilddaten spiegeln stets nur den momentanen Zustand des Untersuchungsgebietes wieder. Diese Momentaufnahmen sind jedoch beliebig wiederholbar und können durchaus Aussagen über jahreszeitliche Veränderungen machen.

Mission Geländekampagne (GK)	1.) Winter 18.11. - 23.11.1996	2.) Frühjahr 01.04. - 14.04.1997	3.) Sommer I 16.06. - 29.06.1997	4.) Sommer II 11.08. - 29.08.1997
Radarüberflüge	stattgefunden	stattgefunden	abgesagt	stattgefunden
Geländeparameter	stattgefunden	stattgefunden	teilweise	stattgefunden
Labor- auswertungen	stattgefunden	stattgefunden	keine	stattgefunden
Aufbereitung der Radarrohdaten	keine	Track 1 + 2 X-, C-,L-Band InSAR	keine	Track 1 + 2 X-, C-,L-Band InSAR
Geländedaten-	stattgefunden	stattgefunden	stattgefunden	stattgefunden

auswertungen				
Zu erwartende Datensätze	keine	vollständiger Datensatz vorhanden (Gelände-Labor-Radar)	Geländeparameter	vollständiger Datensatz (Gelände-Labor-Radar)

Tab.5.1: Übersicht der Flugexperimente, Geländekampagnen und verfügbare Datensätze (Stand 1998)

Der erste, im November stattgefundenen Radarüberflug mit Geländekampagne mußte aus technischen Gründen im April wiederholt werden. Die fehlerhafte Bandaufzeichnung der zurückgestreuten Radarsignale on-board des Flugzeuges hatte zur Folge, daß nur ein geringer Datensatz zur weiteren wissenschaftlichen Arbeit zur Verfügung steht. Beim wiederholten Radarüberflug im April sind alle Datensätze fehlerfrei vorhanden, womit die Frühjahrsaufnahme unter geringer Vegetationsentwicklung gewährleistet ist. Für die Aufnahme des sommerzeitlichen Aspektes mit voller Vegetationsentwicklung war ein Radarüberflug mit Geländekampagne im Juni geplant, der kurzfristig wegen eines Triebwerkausfalles auf Mitte August verschoben wurde. Der Radarüberflug mit Geländekampagne erfolgte im August ohne Einschränkungen.

Die Aufnahmen zur SAR-Interferometrie im April erfolgten aufgrund von technischen Schwierigkeiten ohne Führungssystem und Einsatz von DGPS. Das Ergebnis war ein zu ungenaues Oberflächenmodell, welches nicht zu weiteren Auswertungen verwendet worden ist. Die SAR-Interferometrischen Aufnahmen im August erfuhren eine bessere Genauigkeit in der Höhenauflösung erhielten aber im Phasenbild unerklärliche Effekte, die nicht beseitigt werden konnten. Die Oberflächenmodelle von beiden Aufnahmezeitpunkten konnten nicht zur weiteren Auswertung verwendet werden. Es erfolgte deshalb eine theoretische Zusammenfassung der Vor- und Nachteile zwischen Geländemodellen erstellt von Laser-Scannern und SAR-Interferometrie.

5.1 E-SAR Überflug

Das Untersuchungsgebiet wurde in zwei Flugstreifen unterteilt, die eine Länge von 15 [km] und eine Breite von 3.2 [km] mit einem Überlappungsbereich von 1 km aufweisen. Die Flugrichtung ist NW 295° zu SE 115°. Es werden im Untersuchungsgebiet drei Korner-Reflektoren positioniert. Sie dienen der Kalibrierung und absoluten Lagebestimmung der Radarbilddaten sowie des interferometrischen Geländemodelles. Die Korner-Reflektoren werden mit Hilfe des Differenziellen Globalen Positions Systems (DGPS) der Firma Trimbel eingemessen.

Die Flugzeug-Radarbefliegung fand an einem Tag während der Geländekampagne statt und dauerte ca. 2.5 Stunden. Zeitgleich zum Überflug wird die DGPS-Meßstation in Betrieb genommen.

Aufgrund der hohen Datenrate während des Überfluges wurden nur jeweils ein Frequenzbereich aufgezeichnet. Dadurch ergeben sich mehrfache Überfliegungen des Testgebietes.

5.2 Geländekampagne

Im folgenden werden die aufgenommenen Radar-relevanten Parameter aufgelistet, die zum Zeitpunkt der Geländekampagnen aufgenommen worden sind. Sie dienen zur Validierung der Parameter, die durch die Radar-Daten erhalten werden können. Zu beachten ist, das im Testareal 5 nicht alle Pflanzenparameter erhoben worden sind, da hier vor allem Untersuchungen auf unbedeckten Feldern durchgeführt worden. Die Geländeaufnahmen der Pflanzenparameter erfolgte einige Tage vor der Befliegung.

Geländekampagne (GK)	1.) Winter 18.11. - 23.11.1996	2.) Frühjahr 01.04. - 14.04.1997	3.) Sommer I 16.06. - 29.06.1997	4.) Sommer II 11.08. - 29.08.1997
Biooptypen-kartierung	alle Testflächen	alle Testflächen	alle Testflächen	alle Testflächen
Nutzungs-kartierung	alle Testflächen	alle Testflächen	alle Testflächen, partiell auch im Testareal	alle Testfläche
Pflanzenparameter				
Bodenbedeckungs-grad [Foto]	aufgenommen	aufgenommen	aufgenommen	aufgenommen
Bewuchsdichte [%]	aufgenommen	aufgenommen	aufgenommen	aufgenommen
Vegetationshöhe [cm]	aufgenommen	aufgenommen	aufgenommen	aufgenommen
Stammumfang [cm]	aufgenommen	aufgenommen	nein	aufgenommen
Struktur des Walddaches [Beschreibung und Foto]	aufgenommen	aufgenommen	aufgenommen	aufgenommen
Biomasse /1 m ²	Anzahl: 30	nein	nein	Anzahl: 93
Bodenparameter				
Reliefformentyp nach Boden-kartieranleitung	aufgenommen	aufgenommen	nein	aufgenommen
Mikroreliefaufnahme nach Boden- kartieranleitung	aufgenommen	aufgenommen	nein	aufgenommen
Oberflächen-rauhigkeit von Ackerflächen [cm]	aufgenommen	aufgenommen	nein	aufgenommen
TDR-Messungen [%]	Anzahl: 141	Anzahl: 1134	nein	Anzahl: ca. 404
Referenzboden- probenentnahme bis 8 cm tiefe [%]	Anzahl: 141	Anzahl: 504	nein	Anzahl: 900
Wurzelmasse nach Bodenkartier-anleitung [Schätzung] oder [Quantitativ in %]	Quantitativ	Schätzung	nein	Schätzung

Tab.5.2 Auflistung der erhobenen Pflanzen- und Bodenparametern während der vier Geländekampagnen (GK)

Zusätzlich wurden im Rückdeichungsbereich (Areal 1) während der dritten Geländekampagne Rinnenstrukturen vermessen und deren Bodenfeuchte ermittelt. Es fanden auch Aufnahmen zum Bodentyp des Oberbodens bis in Tiefen von 1 [m] im Querprofil der Rinnen statt.

Auf dem Testareal 5 (A 5) fanden zusätzliche Untersuchungen zu Nutzparzellen, Bearbeitungsrichtung, Bearbeitungsart, Reihenabstand und Fruchtart auf den landwirtschaftlichen Testflächen statt.

5.2.1 Bodenfeuchtemessung

Zeitgleich zur Befliegung wurden Bodenfeuchtemessungen auf allen Testarealen durchgeführt. Zur Wassergehaltsbestimmung gibt es zwei gebräuchliche Methoden, die während der Meßkampagne zur Anwendung kamen. Zum einen die Beprobung mit Stechzylindern (100 [cm³]) und zum anderen die Beprobung mit der TDR-Technik. Zum Einsatz kam ein tragbares TDR-Feldmeßgerät der Firma IMKO Micromodultechnik GmbH, welches vom Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF)

e.V., Müncheberg zur Verfügung gestellt worden ist. Die Messungen fanden pro homogener Vegetationseinheit oder pro landwirtschaftlicher Fläche in einem Umkreis von 1 [m²], dreimal in dieser Vegetationseinheit, statt.

5.2.1.1 Gravimetrische Bestimmung des Bodenwassergehalts

Die klassische direkte Methode zur Wasserhaushaltsbestimmung ist die 48 – stündige Trocknung bei 105° [C]. Der hierbei auftretende Gewichtsverlust gibt die ausgetriebene Wassermenge an. Durch das Wägen wird das Wasservolumen der Bodenprobe bestimmt, welches der Methode den Namen verlieh (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1989). Diese Methode der Bodenwassergehaltsbestimmung ist nach DIN 18 121 (Teil 1) definiert. Die Probe wird im feuchten Zustand gewogen, danach bis zur Gewichtskonstanz im Trockenschrank getrocknet und nach Abkühlung erneut gewogen. Die Wassermenge, die aus der feuchten Probe erhalten wird stellt das Wasservolumen des Bodens dar.

Mit Hilfe eines Stechzylinders der Höhe von 4 [cm], bei einem Volumen von 100 [cm³], wurde ein definiertes Bodenvolumen entnommen. Die Entnahmen der Bodenproben fanden innerhalb eines landwirtschaftlichen Feldes an drei unterschiedlichen Stellen und pro Stelle jeweils vier Bodenprobenentnahmen in zwei Bodenschichten, von 0 – 4 [cm] und von 4 – 8 [cm], statt. Pro Feld wurden 12 Bodenproben entnommen und daraus der Mittelwert pro landwirtschaftlichem Feld berechnet. Insgesamt erfolgten 36 Messungen zur Bodenfeuchte, deren Mittelwerte als Vergleich der Invertierung aus den Radardaten dienen.

Die Bodenfeuchte wurde nach FUNDINGER et al. (1997) wie folgt definiert:

$$m_v = \frac{V_W}{V_{ges}} \cdot 100 \quad (5.1)$$

wobei

m_v = Volumetrische Feuchte der Probe in [%]

V_W = Volumen des in der Probe enthaltenen Wassers

V_{ges} = Volumen der gesamten Probe

5.2.1.2 TDR-Messungen (Time Domain Reflectometry)

Das Prinzip einer TDR Messung ist folgendes: die Geschwindigkeit eines elektromagnetischen Impulses ist abhängig von den dielektrischen Eigenschaften des umgebenden Bodens, durch den er läuft. Ein Spannungsimpulse wird über die in diesem Fall 15 [cm] langen Wellenleiter, die in den Boden gesteckt wurden, geschickt. Die Laufzeit des Impulses auf dem Leiter wird ermittelt. Aufgrund der großen Unterschiede zwischen der Dielektrizitätskonstanten des Wassers (80) und der übrigen Bodenkonstituenten (5) läßt sich nach Bestimmung der Dielektrizitätskonstante eines Bodens eine Aussage über seinen Wassergehalt machen. Das Gerät generiert Impulse bis auf 1 [GHz] und liefert sofort sowohl den Feuchtegehalt in Volumenprozent, als auch ein Maß für die Dämpfung des Signals.

Die Messungen der Bodenfeuchte in Volumenprozent fanden an denselben Stellen wie die gravimetrischen Bodenentnahmen statt, so daß ein Vergleich zwischen diesen beiden Methoden erfolgen konnte. Zusätzlich wurden mit den TDR-Sonden 12 weitere Beprobungen verteilt auf einem Areal von 1 [m²] durchgeführt.

Aufgrund des stark verdichteten Bodens während der August-Kampagne konnten auf einigen Testflächen keine Messungen mit den Stabmesssonden erfolgen.

5.2.2 Messung der Oberflächenrauigkeit

Die Oberflächenrauigkeit der landwirtschaftlich genutzten Felder wurden mit Hilfe eines Stabprofilmeter, welches vom Institut für Hochfrequenztechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt zur Verfügung gestellt wurde, gemessen. Der Stabprofilmeter hat eine Bodenprofillänge von 1.50 [m] und eine Höhe von 60 [cm]. An dem Stabprofilmeter sind in einem cm Abstand Stahlnadeln an einer Leiste angebracht und festgestellt. Bei lockern der Stäbe bilden diese vor einem gerasterten Hintergrund das Bodenprofil ab. Diese wurden mit einem hohen Aufwand bearbeitet, dazu gehörten folgende Arbeitsschritte: Photographieren, Einscannen, Digitalisieren und Datenauswertung. Die Berechnung der sich ergebenden RMS-Höhen aus den Profilen erfolgte nach ULABY (1986) und wird im Kapitel 2.1.1.3 erläutert.

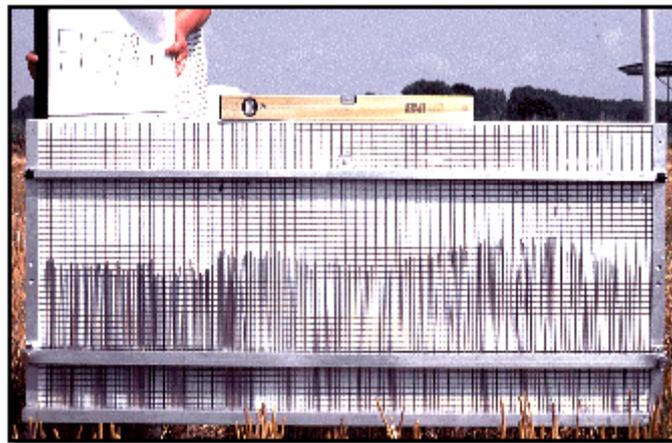


Abbildung 5.1: Verwendetes Profilometers zur Messung der Oberflächenrauigkeit.
Beispielfoto aufgenommen im August 1997

Die Bodenprofile wurden gemäß der Ausrichtung der Ackerfurchen, parallel zur Bearbeitungsrichtung und senkrecht zur Bearbeitungsrichtung, sowie gemäß der Flugrichtung und damit der Radarsensorblickrichtung, parallel zum Sensor und senkrecht zum Sensor, aufgenommen. Die Aufnahmen erfolgten auf einem landwirtschaftlichem Feld pro Ausrichtung zweimal. Insgesamt wurden pro landwirtschaftlichem Feld acht Profilaufnahmen getätigt.

Aus Untersuchungen über den Einfluß von Reihenstrukturen auf das Radarrückstreusignal ist bekannt, das mit Anwesenheit von Reihenstrukturen eine zusätzliche zufällige Rauigkeitskomponente auf das Rückstreusignal wirkt. In der Studie von CHAMPOIN & FAIVRE (1996) ist dabei die Lage, RMS-Höhe zum Azimuthwinkel, der entscheidende beeinflussende Rauigkeitsfaktor, der als ‚offensichtliche Rauigkeit‘ (engl. apparent roughness) bezeichnet wird. Durch einen Fehler in der Planung zur Geländeaufnahme der Oberflächenrauigkeit wurde diese Rauigkeitsrichtung, senkrecht zur Flugrichtung, nicht gemessen. Mit dem Verfahren von SALEH (1994) wurde eine Methode gefunden mit dieser Nachträglich die RMS-Höhen, bei Vorhandensein des Rotationswinkels zur Senkrechten der Bearbeitungsrichtung, zur ermitteln. Dieses Verfahren und die Ergebnisse sind in der Diplomarbeit von BUSCHE (1999) genau beschrieben und können in dieser nachgelesen werden. Das Ergebnis dieser Umrechnung sind RMS-Höhen für die verschiedenen Felder senkrecht zur Flugrichtung. Diese Werte erhalten Eingang im Vergleich zu den invertierten Werten aus den verwendeten Inversionsmodellen.

6 Datenaufbereitung

6.1 Radar – Daten (E-SAR)

Aus der ersten Mission im November 1996 steht nur ein Datensatz aus den *on-board* Quicklookaufzeichnungen zur Verfügung. Quicklookdaten entstammen aus Radarsignalen, die während des Überfluges in Echtzeit prozessiert wurden und somit die Möglichkeit eines schnellen Überblickes des Areals geben können. Der Nachteil zu den off-line prozessierten Präzisions-Bilddaten ist die fehlende Bewegungsfehlerkompensation, die für die Kalibrierung der Daten notwendig ist.

Aus der zweiten Mission im April 1997 (09.04.1997) steht ein Datensatz aus XHH, XVV, CHH, CVV, LHH, LVV, LHV und ein XVV SAR-Interferometrischer Datensatz zur Verfügung. Die Aufzeichnungen im PHH, PVV und PHV sind ebenfalls vorhanden wurden aber wegen der starken Störungen im Bild, hervorgerufen durch Funksignale im Gelände, die im gleichen Frequenzbereich des P – Bandes ausgesandt worden sind, nicht zur weiteren Auswertung herangezogen.

Die dritte Mission wurde kurzfristig abgesagt wegen eines Triebwerkschadens am Flugzeug.

Aus der vierten Mission im August 1997 (20.08.1997) steht wie auch aus der zweiten ein vollständiger Datensatz zur Verfügung. Auch hier wurde das aufgezeichnete P – Band durch die starken Störungen im Bild nicht zur weiteren Auswertung herangezogen.

Die Aufbereitung der Radarrohdaten erfordert die Anwendung komplexer Programme und somit einen hohen Zeitaufwand. Sie besteht aus drei Schritten, der Transkription, der SAR – Prozessierung mit Bewegungsfehlerkompensation und Kalibrierung:

- Transkription: Übertragung der Rohdaten (Radar-Zeitlaufsignale) von High-Density Digital Tapes (HDDT) in ein Rechner-Kompatibles Format auf EXAByte-Bändern,
- SAR-Prozessierung mit Bewegungsfehlerkompensation (Motion-Compensation) und
- Kalibrierung: Korrektur des Antennendiagrammes in Abhängigkeit der Schrägentfernung und Ermittlung der Sensorspezifischen Kalibrationskonstanten.

Die SAR–Daten wurden zu diesem Zeitpunkt im 16 bit Format als Intensitätendaten, wahlweise in *slant-range* oder *ground-range* Projektion an den Anwender ausgeliefert. Die Intensitäten I lassen sich nach der Gleichung $\sigma^0 = 10 \log_{10}(I)$ als Rückstreuungskoeffizient ausdrücken. Intensitäten sind die aufgenommenen quadrierten Amplituden des Rückstreuungssignals ($I = A^2$). Diese Daten stehen in keinem Koordinatensystem und sind nicht untereinander Koregistriert gewesen. Zur weiteren Verwendung wurde die *ground-range* Projektion ausgewählt.

Alle Bildverarbeitungsschritte wurden mit dem EASI/PACE der Firma PCI durchgeführt. In der SAR – Daten Postprozessierung findet die Aufbereitung der SAR – Daten statt bevor diese zur weiteren Bildanalyse verwendet werden können. In der E-SAR Postprozessierung fanden folgende Bildvorverarbeitungsschritte statt:

- Einlesen der SAR – Daten in das Bildverarbeitungsprogramm EASI/PACE und Konvertierung des Formates.
- Skalierung der Daten zum 8 bit Format zur weiteren Klassifikations –Verwendung und zum 32 bit Format zur Rückstreuquerschnitts – Analyse.
- Mosaiking der einzelnen Frequenzen und Polarisationen, da diese nur Stückweise ausgeliefert werden konnten, mangels Speicherkapazität der Prozessierungsrechner.

- Koregistrierung der Frequenzen und Polarisationen, hierbei wurde das L – Band als Referenz Frequenz genommen.
- Filterung aller SAR – Daten mit einem adaptiven Speckle - Filter (Gamma Map Filter) mit einer Fenstergröße von 7 mal 7. Der Gamma Map Filter gehört zum EASI/PACE Tools und wurde nach dem adaptiven *Speckle*-Filter von LOPES (1993) implementiert.

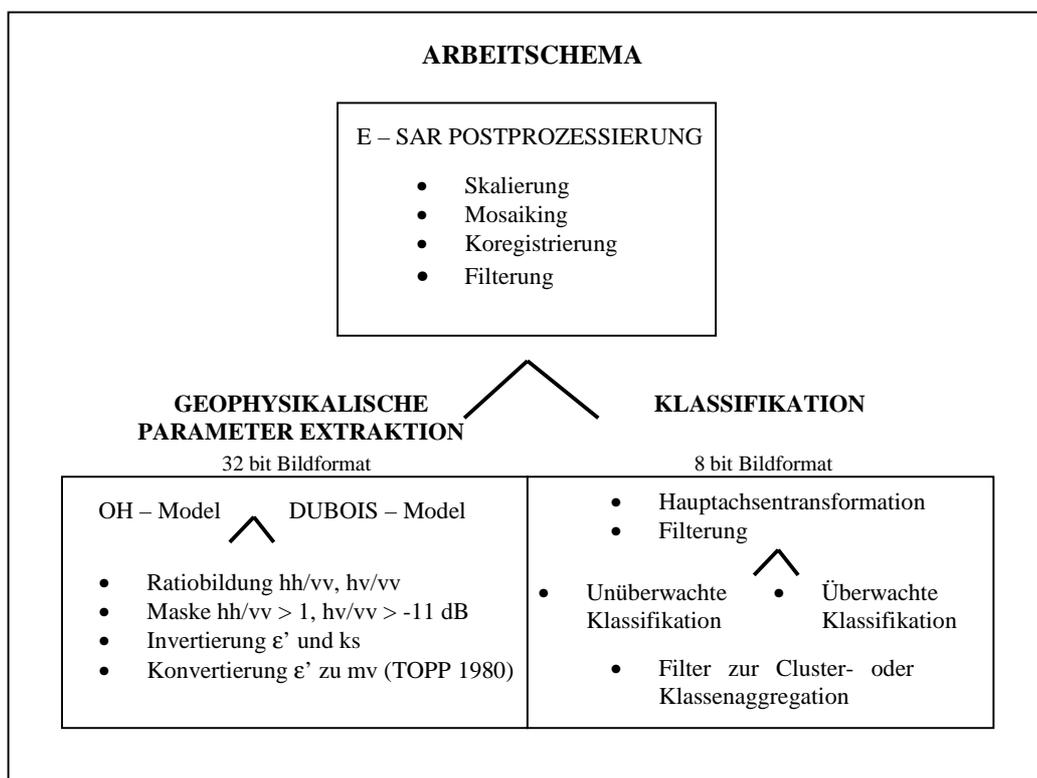


Abbildung 6.1: Vorgehensweise der E-SAR Daten Bearbeitung

Zur Aufbereitung der E-SAR Daten für eine unüberwachte oder überwachte Klassifikation können mehrere Vorgehensweisen gewählt werden. Für die besten Klassifikationsergebnisse hat sich folgende Vorgehensweise, die hier nur Stichpunktartig erwähnt werden soll und ausführlicher in der Diplomarbeit von Steffen Allgeyr, die im Rahmen des Projektes entstand, beschrieben ist, als optimal erwiesen:

- Hauptachsentransformation der SAR-Daten, wobei 7 Eingangskanäle (XHH, XVV, CHH, CVV, LHH, LVV, LHV) verwendet worden sind;
- Auswahl von drei Kanälen mit der Gesamtvarianz von 95 %, die zur weiteren Verarbeitung verwendet werden;
- Erneute Filterung der drei Kanäle mit einem Median Filter der Fenstergröße 7 mal 7;
- Auswahl der Anzahl der Cluster zur unüberwachten Klassifikation;
- Auswahl der Trainingsgebiete zur überwachten Klassifikation;
- Unüberwachte Klassifizierung mit dem Isoclus Klassifikator;
- Überwachte Klassifizierung mit dem Maximum Likelihood Klassifikator;
- Aggregieren der Cluster der unüberwachten Klassifizierung und Nachbearbeitung des Ergebnisses zur Überwachten Klassifizierung.

In folgenden soll kurz die verwendete Methode der Hauptaschentransformation beschrieben werden. Sie stellt die Bilddatengrundlage für die unterschiedlichen Klassifikatoren dar und erwies sich in der Kombination mit zwei Filtermethoden als eine gute Bilddatenvorverarbeitung mit der höchsten Klassifikationsgenauigkeit.

Die Hauptaschentransformation stellt eine lineare Transformation dar. Sie ist eine Standardmethode in der digitalen Bildverarbeitung und dient zur Datenreduktion durch Eliminierung redundanter Information in multispektralen Bilddatensätzen. Bei einer Hauptaschentransformation werden die Koordinatenachsen des n-dimensionalen Merkmalsraumes rotiert und in absteigender Reihenfolge entsprechend der Varianz [%] zugeordnet. Im neuen Merkmalsraum werden die Achsen senkrecht zueinander angeordnet. Die Achsendrehung findet unter dem Hintergrund statt ein Höchstmaß an Unterscheidungsmöglichkeiten, der in einer Szene enthaltenen Objektklassen zu erreichen. Die neuen Achsen werden als erste bis n-Hauptkomponente bezeichnet. Die transformierten Komponenten sind zueinander unkorreliert wodurch redundante Daten aus dem originalen Datensatz eliminiert werden können (LEE 1992). Der E-SAR Datensatz, bestehend aus sieben Bildkanälen pro Jahreszeit, ist untereinander stark korreliert, so daß die Hauptaschentransformation effektiv zur Datenreduktion und Rauchverminderung des Speckle-Effektes ohne Verlust an geometrischer Auflösung eingesetzt werden kann. Die Transformation ist nicht ganz verlustfrei, doch überwiegen die Vorteile der Datenreduktion und Speckleverminderung gegenüber dem Anteil der verlorenen Information.

Zur Interpretation des Klassifikationsergebnisses wurde die Confusionsmatrix und der Scatterplot herangezogen. Die Confusionsmatrix gibt Auskunft über die Homogenität einer gebildeten Klasse, die bei der überwachten Klassifikation durch die Trainingsgebiete festgelegt werden. Mit dem Scatterplot wird die Trenbarkeit der gebildeten Klassen graphisch dargestellt.

Zur temporalen Analyse diente der *Change Detection* Algorithmus, der ein Modul der digitalen PCI Bildverarbeitungsprogrammes darstellt. Er berechnet die Differenz aus dem Ratio von zwei Radarbilddaten. Das resultierende Ergebnisbild besteht aus positiven Werten, die ein Indikator für höhere Differenz im zweiten Bild sind, aus negativen Werten, die ein Indikator für höhere Differenz im ersten Bild sind und aus null Werten, die ein Anzeichen für keine Veränderungen zwischen den beiden Bildern darstellen.

Zur Vorgehensweise bei der Invertierung von geophysikalischen Parametern kann generalisierend für die zwei empirischen Modelle (OH 1992, DUBOIS 1995) zusammengefaßt werden:

- Die Berechnung des normalisierten Rückstreukoeffizienten für das E-SAR lautet:

$$\sigma = \frac{(DN + 32768)^2 \sin \Theta}{1000000}$$

wobei

s_0 = Normalisierter Radarrückstreukoeffizient

DN = Digital Number/Grauwert (16 bit signed)

1000000 = Kalibrationskonstante des E-SAR ≈ 60 [dB]

- Der Inversionsalgorithmus für beide Modelle besteht aus der Ratiobildung HH/VV. Für das OH – Modell wird zusätzlich noch ein kreuz-kanal Ratio HV/VV verwendet.
- Berechnung des lokalen Einfallswinkels
- Ausscheiden aller Wert HH/VV >1 und für das kreuz-kanal Ratio HV/VV > -11 [dB]
- Anwendung der Inversionsalgorithmen für das OH – Modell oder DUBOIS – Modell

- Zur Invertierung von I^{θ} im OH – Model wird das Newtonsche Iterationsverfahren verwendet. Mit dem Erhalt von Γ^0 kann ε' und ks berechnet werden.
- Konvertierung von ε' zu mv [vol %] nach TOPP (1980).

6.2 Gelände - Daten

Anschließend an die Geländekampagnen und Überflüge fanden drei- bis vierwöchige Aufbereitungen der Geländedaten statt. Dazu gehörten

- Laborarbeiten: Einwaage des Frischgewichtes von Biomasse und Bodenproben und Rückwaage nach dem Trocknen von 105°C;
- Schätzung der Wurzelmasse und
- Auswertungen mit dem PC: Dateneingabe; Erstellung von Excel-Tabellen; Erstellung von Graphiken; Korrelationsberechnungen zwischen den TDR-Messungen und Bodenprobenentnahmen (0-4 [cm] und 4-8 [cm] Bodentiefe); sowie weitere statistische Auswertungen erster Ordnung.

Die Aufbereitung der oberflächennahen Rauigkeit ist mit hohem Arbeitsaufwand verbunden. Nach dem die Negative, mit den Aufnahmen der Rauigkeitsprofile, entwickelt worden sind müssen diese zur Auswertung in eine numerische Form überführt werden. Diese Arbeitsschritte sollen im folgenden kurz beschrieben werden.

- Die Photos werden eingescannt und auf ein Referenz-Bild entzerrt. Das Referenz-Bild stellt das entzerrungsfreie Bild in einem Format von 1000 Pixel zu 400 Lines dar und entspricht in einem Verhältnis von 1:2.5 dem des Stabprofilometers von 60 [cm] zu 150 [cm]. Dazu wurden 8-12 Paßpunkte benötigt, die mit einem Polynom 2. Grades und der bilinearen Interpolation die besten Ergebnisse lieferte.
- Die Profillinie wird digitalisiert wobei darauf geachtet wird, daß jeder Metallstab einen Meßpunkt erhält.
- Die digitalisierte Information wird mit dem passenden Koordinatensystem (x- und y-Wert) als numerische Form gelesen.
- Die einzelnen Werte im Koordinatensystem werden in ein Tabellenkalkulationsprogramm überführt und ausgewertet.

Mit dieser Methode wurden die April und August Geländeaufnahmen ausgewertet, welches insgesamt einer Auswertung von 252 Profilmessungen von 18 Testflächen entspricht. Eine Mittelung zwischen zwei Profilmessungen fand statt, da pro Reihenrichtung zwei Profilmessungen gemessen worden sind.

7 Ergebnisse

7.1 Vegetations- und Landnutzungsklassifikation

Im folgenden sollen nur die Endergebnisse der Extraktion von Vegetations- und Landnutzungsclassen aus einem Radar-Datensatz mit sieben Eingangskanälen (XHH, XVV, CHH, CVV, LHH, LVV, LHV) von zwei unterschiedlichen jahreszeitlichen Radaraufnahmen dargestellt werden. Dabei ergaben sich drei Untersuchungsschwerpunkte in dieser Arbeit:

- Der erste Schwerpunkt lag in der Ermittlung von geeigneten Bildvorverarbeitungsverfahren zur anschließenden Klassifikation.
- Der zweite Schwerpunkt lag in der Wahl eines geeigneten Klassifikationsverfahren zur bestmöglichen Extraktion von Objektparametern.
- Der dritte Schwerpunkt lag in der Untersuchung zur Eignung von SAR-Bilddaten zur Objektklassifizierung und deren Genauigkeit im Vergleich zu Geländedaten.

Als Datenquelle dient hierzu der erste Flugstreifen, aufgenommen zu zwei unterschiedlichen jahreszeitlichen Vegetationsperioden, April und August 1997. Die Interpretation des ersten Flugstreifen, der die Gebiete der geplanten Rückdeichung, des Lütkenwischer Aussendeichbereiches und des Naturschutzgebietes Garbe deckt ist für das Verbundvorhaben der LAGS von allgemeinen Interesse und wurde deshalb ausgewählt (Anhang). Die drei Gebietsausschnitte weisen unterschiedliche Landschaftsstrukturen auf an deren Beispiel gezeigt werden soll welches möglichen Objektklassen gebildet werden können.

7.1.1 Bilddatenaufbereitung

Als beste Vorgehensweise zur Bilddatenvorverarbeitung hat sich ein kombiniertes Verfahren mit Filterung und Hauptachsentransformation zur Reduzierung des systembedingten *Speckle*-Effektes mit dem kleinstmöglichen Verlust an geometrischer Auflösung ergeben. Hierzu wurde der sieben kanalige Bilddatensatz zuerst mit einem *Speckle*-Filter einer Fenstergröße von 7 x 7 bearbeitet. Anschließend konnte der Bilddatensatz mit Hilfe der Hauptachsentransformation zu einem drei kanaligen Bilddatensatz reduziert werden, ohne dabei erneut einen Verlust an geometrischer Auflösung einzugehen. In Tab. 7.1 kann gezeigt werden, daß in den ersten drei Hauptkomponenten die höchste Varianz mit ca. 95 [%] und damit der höchste Informationsgehalt enthalten ist. In Tab. 7.1 sind drei Bildausschnitte, der Lenzener Rückdeichungsbereich, der Lütkenwischer Aussendeichbereich und das Naturschutzgebiet Garbe als Testbeispiel dargestellt. In den Komponenten 4 bis 7 kann davon ausgegangen werden, daß sich dort vor allem die *Speckle*-Information befindet und deshalb nicht in die Klassifikation miteinfließt. Eine erneute Filterung, diesmal nur der drei Hauptkomponenten, mit dem Median-Filter, der den maximalen Häufigkeitswert eines definierten Fensters berechnet, führt zur besten Klassifikationsgenauigkeit und somit zu einer genauen Trennung von Objektklassen.

Kanäle	Lenzener Rückungsdeich	Lütkenwischer Außendeich	Naturschutzgebiet Garbe
1	80.01 %	76.54 %	86.20 %
2	10.23 %	12.62 %	7.45 %
3	3.52 %	3.96 %	2.40 %
4	3.10 %	3.69 %	1.68 %
5	1.79 %	1.64 %	1.28 %
6	1.25 %	1.44 %	0.95 %
7	0.09 %	0.11 %	0.04 %

Tab. 7.1: Varianz pro PCA- Kanal für die Gebietsausschnitte Lenzener Rückungsbereich, Lütkenwischer Außendeich, Naturschutzgebiet Garbe

Die auf unterschiedliche Weise aufbereiteten Radarbilddaten wurde mit einer anschließenden überwachten Klassifikation auf ihre Klassifikationsgenauigkeit hin untersucht. Als Datengrundlage diente der siebenkanalige April Datensatz. Für die ML-Klassifikation wurden 16 Objektklassen als Trainingsgebiete für den Klassifizierungs-Algorithmus, verteilt auf den Gebietsausschnitten, ausgewählt. Die Objektklassen bestanden aus drei Wald-, zwei Wasser-, sechs Grünland- und fünf Ackerflächenklassen. Mit der beschriebenen Vorgehensweise und dem Datensatz konnte eine Klassifikationsgenauigkeit von 82.4 [%] erreicht werden.

Eine optimale Vorgehensweise zur Bildvorverarbeitung mit dem kleinstmöglichen *Speckle*-Effekt und Verlust der geometrischen Auflösung konnte ermittelt werden. Hinzukommt, daß mit der Reduzierung des Bilddatensatzes, um dreiviertel des Originalbilddatensatzes, eine beträchtliche Einsparung von Rechenzeit und Speicherplatz einhergeht.

7.1.2 Texturbasierte Klassifikation

Zur Anwendung kamen zwei Algorithmen zur texturbasierten Klassifikation, die ausgewählten HARALICK Parameter und der Context-Klassifizierer. Die vier HARALICK-Parameter stellen keinen eigenständigen Klassifikator dar, sondern werden als Zusatzinformationen betrachtet, die zur Erhöhung der Klassifikationsgenauigkeit dienen sollen. Hierzu werden neue Datenkanäle mit Texturinformationen geschaffen, die mit den drei Hauptkomponenten Eingang in die pixelbasierte ML-Klassifikation erhalten. In dieser Arbeit wurden vier Texturmaße ausgewählt: *Angular Second Moment*, *Dissimilarity*, *Correlation* und *Entropy*. Die genaue Beschreibung der Texturmaße ist in Kapitel 3.1.2.2 vorzufinden.

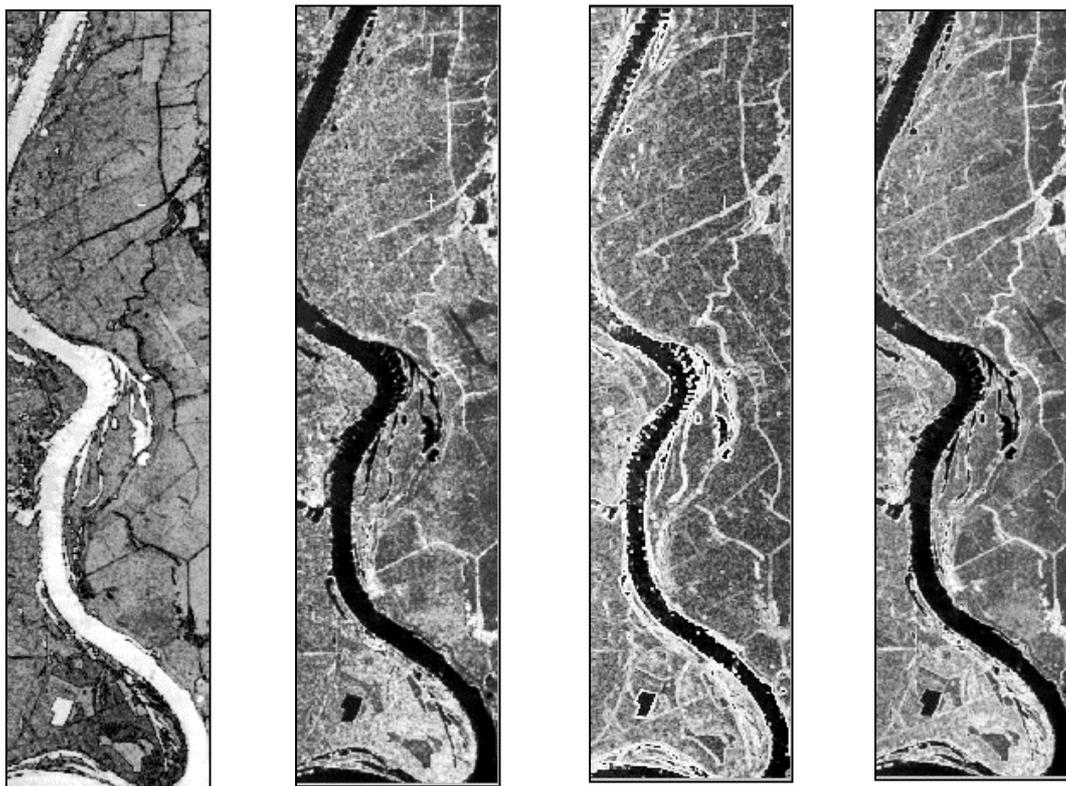


Abbildung 7.1: Darstellung der vier Texturmaße nach HARALICK (1973). Von links nach rechts: *Angular Second Moment*, *Dissimilarity*, *Correlation* und *Entropy*.

Zur Extraktion dieser vier Texturmaße wurde das XHH und das LHH herangezogen, welche in Abbildung 7.1 am Beispiel des Gebietsausschnittes der Garbe dargestellt werden. Die Zusatzinformationen in Form von vier Texturmaßen brachten bei einer ML-Klassifikation mit den drei Komponenten der Hauptachsentransformation keine verbesserten Klassifikationsergebnisse. Mit den Texturmaßen, wie erkenntlich in Abbildung 7.1, können vor allem Linien- und Kantenstrukturen sowie Punktobjekte, hervorgehoben werden. Die Zusatzinformationen können somit zur Grenz-Linien Unterscheidung von Wasser und Land herangezogen werden. Die erkennbaren Grenz-Linien zwischen einzelnen Feldern wird durch Baumreihen am Wegesrand hervorgerufen. Somit können Feldwege und Straßen mit Hilfe von Baumreihen von angrenzenden homogenen Arealen unterschieden werden. Zur Klassifikation wurden vor allem Trainingsgebiet über ein weites homogenes Areal (Wasser, Wiesen, Felder, Wald und Siedlung) gelegt. Die texturalen Zusatzinformationen, in Form von Linien, Kanten und Punkten, leisten keinen Beitrag zu den drei Hauptkomponenten zur verbesserten Vegetations- und Landnutzungsklassifikationsgenauigkeit. Die durchschnittliche Klassifikationsgenauigkeit mit den Zusatzinformationen liegt hier bei 50 [%]. Die Texturmaße fanden somit keinen Eingang in die weitere Klassifizierung.

Eine Klassifikation der Texturkanäle ist nicht sinnvoll, da die Texturkanäle nur einen Bruchteil der Information enthalten und somit schlechtere Klassifikationsergebnisse liefern als eine Klassifikation mit den drei Hauptkomponenten.

Mit dem texturbasierten Context-Klassifizierer ist es möglich eine eigenständige Klassifikation durchzuführen. Als Eingangsdaten für die Context-Klassifikation werden die originalen SAR-Bilder, ohne Filterung und Hauptkomponententransformation, herangezogen. Eine Bearbeitung der Bilddaten könnte die Textureigenschaften verfälschen. Mit diesem Verfahren wurde kein zufriedenstellendes Klassifikationsergebnis, im Vergleich zu der ML-Klassifikation mit den drei Hauptkomponenten, erzielt. Als Ursache für ein unzureichendes Klassifikationsergebnis können drei Gründe genannt werden:

- Der beträchtliche Einfluß des Speckels verursacht eine hohe Streuung über homogenen Flächen und Vermindert dadurch die Objektklassenfindung.
- In der betrachteten Dimensionalität der erwarteten Texturinformation kann eine Fehlerquelle liegen. In der Interpretation von Texturinformationen können drei Skalenbereiche betrachtet werden: die Mikrotextur, die Mesotextur und die Makrotextur (BRAUN 1997).
- Eine hohe Fehlerquelle stellt die Auswahl für geeignete Texturmaße für einen speziellen Datensatz dar. Auch ist zu hinterfragen, ob die anfänglich vielversprechende texturbasierte Methode für die Fragestellung der Vegetations- und Landnutzungsklassifizierung geeignet ist.

7.1.3 Unüberwachte Klassifikation

Die Ergebnisse der unüberwachten Klassifikation, mit dem ISOCLUS-Klassifikator des digitalen Bildverarbeitungsprogrammes PCI, werden zusammenfassend am Beispiel des gesamten Elbe-Flugstreifens, an vier Hauptpunkten vorgestellt. Erwähnt werden sollte nochmals, daß als Datengrundlage für den unüberwachten Klassifikator, die drei Hauptkomponenten der Hauptachsentransformation verwendet wurden.

- Die unüberwachte Klassifizierung ist für eine Anwendung über nicht bekannter Landoberfläche sinnvoll um sich einen Überblick über möglich trennbare Cluster zuverschaffen und sich somit Wissen über eine Landoberfläche anzueignen.
- Mit der unüberwachte Klassifikation lassen sich für die zwei Aufnahmezeitpunkte, April und August, drei Cluster deutlich voneinander unterscheiden. Dies sind die Cluster „Wasser“, „niedrige Vegetation“ und „hohe Vegetation“. Für die Auswahl von einer geringen Anzahl von Clustern ist eine grobe Zuweisung zu einer Objektklasse möglich. Bei einer erhöhten Auswahl der Anzahl von Clustern ist eine differenzierte Zuweisung von Objektklassen ohne Vorwissen über die Landnutzungbeschaffenheiten der aufgenommenen Landoberfläche und deren Interpretation nicht möglich.
- Mit der unüberwachten Klassifizierung wurde mit Hilfe der hierarchischen Segmentierung, die im ersten Durchlauf erhaltenen Cluster auf ihre weitere Trennbarkeit hin untersucht. Hierzu wurde der Cluster „hohe Vegetation“ ausgewählt. Bei einer Vorgabe von maximal 100 zu bildenden Clustern wurden automatisch 24 mögliche Cluster-Trennungen vom ISOCLUS-Algorithmus erkannt. Das Ergebnis zeigt, daß der Cluster „hohe Vegetation“ kein reiner Cluster ist und aus einem statistischen Grauwert besteht, sondern in weitere trennbare Grauwerte unterteilt werden kann. Den neuen Clustern kann nun mit Hilfe von Geländedaten eine Landnutzungsklasse zugeteilt werden. In unserem Beispiel kann der Cluster „hohe Vegetation“ eine weitere Segmentierung in die Cluster „Laubwald“, „Nadelwald“ und „Siedlung“ erhalten. In Abbildung 7.2 ist das Beispiel der hierarchischen Segmentierung von Clustern dargestellt.

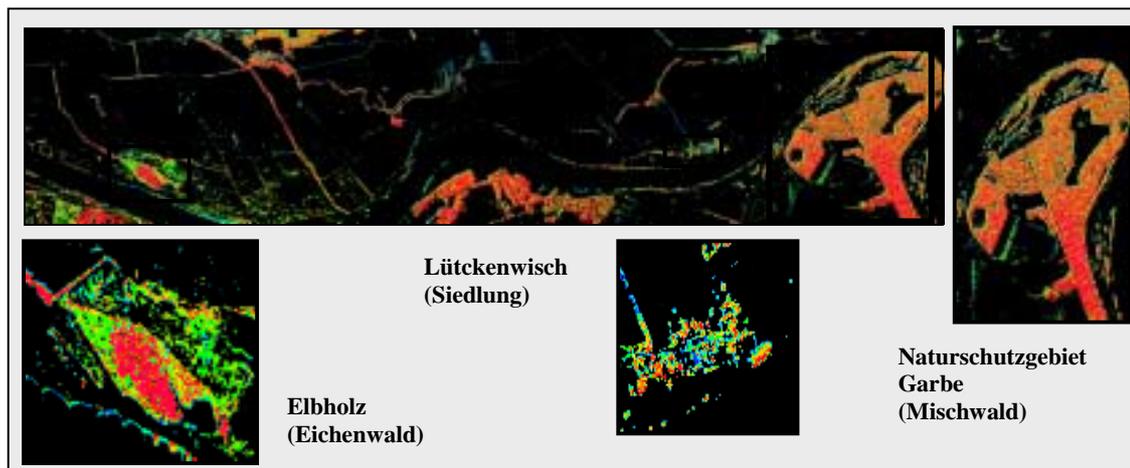


Abbildung 7.2 : Segmentierung der Waldmaske in 24 Cluster

- Die unüberwachte Klassifizierung eignet sich auch als Tool zur Auswahl von Trainingsgebieten, die sonst bei einer überwachten Klassifizierung vom Bearbeiter ausgewählt werden müssen. Diese Vorgehensweise wird auch als Hybrid-Klassifikation bezeichnet. Die Trainingsgebietsauswahl mit der unüberwachten Klassifizierung hat den Vorteil, dass eindeutig trennbare Klassen Eingang in die ML-Klassifizierung finden und sich die Genauigkeit der Klassifikation erhöht. Dieser Ansatz wurde auch an den vorliegenden Bilddaten für drei Gebietsausschnitte untersucht, die Vorgehensweise wird in Kapitel 7.1.4 vorgestellt.

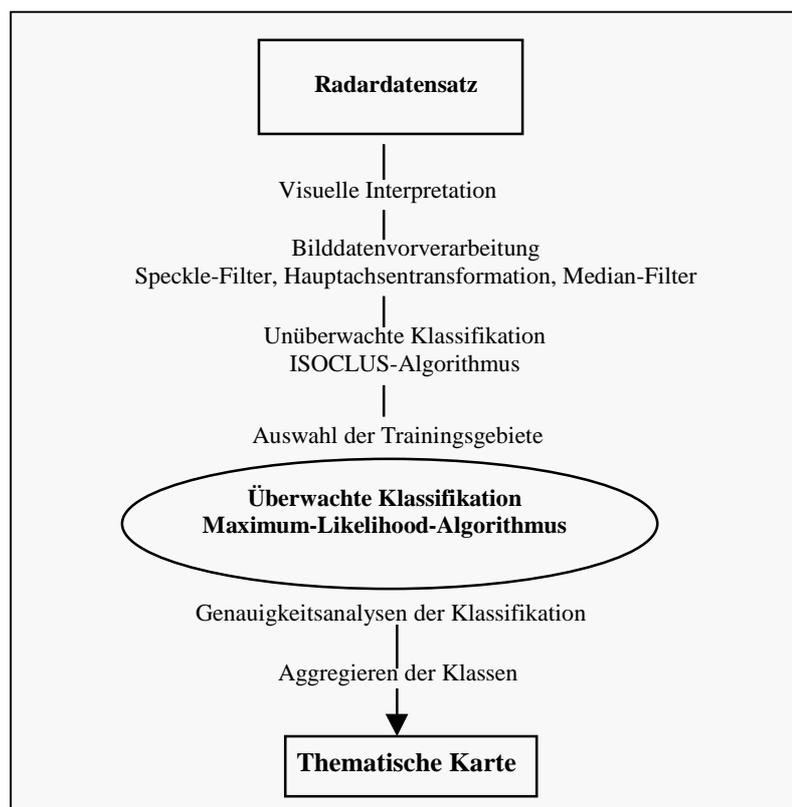


Abbildung 7.3: Schema der Vorgehensweise einer Hybride-Klassifikation im Pilotprojekt

7.1.4 Überwachte Klassifikation

Die Ergebnisse der überwachten ML-Klassifikationen sollen im folgenden an drei ausgewählten Gebietsausschnitten, des Lenzeners Rückdeichungsbereiches, des Lütckenwischer Aussendeichbereiches und des Naturschutzgebietes der Garbe vorgestellt werden. Die Auswahl dieser Gebietsausschnitte erfolgte aus mehreren Gründen:

- An den Randbereichen der Flugstreifen für die unterschiedlichen Frequenzen konnte, trotz radiometrischer Korrektur, eine Abhängigkeit in Entfernungsrichtung zum Sensor beobachtet werden. Diese Abhängigkeit äußert sich in einem Helligkeitsunterschied, ausgehend vom Nahbereich bis zum Fernbereich, das mit einem zunehmenden verdunkeln der Bildelemente einhergeht. Trotz einiger Korrekturen konnte der Einfluß dieses sensorbedingten Effektes nicht ganz ausgeschlossen werden.
- Die Auswahl der kleineren Datenmenge erleichtert die Handhabung der rechenintensiven digitalen Operationen und verringerte die Nutzung von hohem Speicherplatz.
- Diese Gebietsausschnitte sind von allgemeinem wissenschaftlichen Interesse für weitere Forschungsverbundvorhaben.

Alle Gebietsausschnitte werden am Beispiel der August-Kampagne dargestellt. Im folgenden wird am Beispiel des Gebietsausschnittes der Garbe die gesamte Vorgehensweise der Interpretation einer Hybrid-Klassifikation detailliert beschrieben.

7.1.4.1 Naturschutzgebiet Garbe

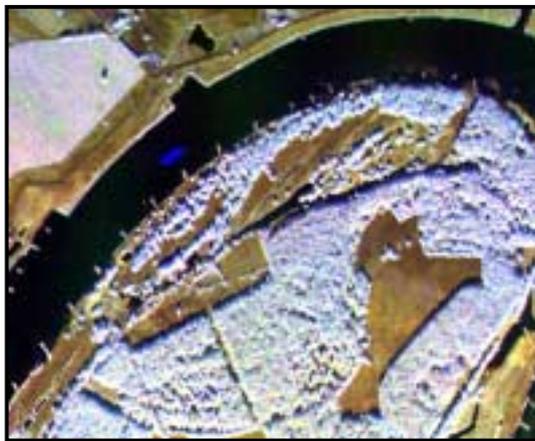
Nach der Bilddatenvorverarbeitung findet eine visuelle Interpretation der Radardaten statt. Die visuelle Interpretation stellt einen wichtigen Schritt vor der Ausweisung der Trainingsgebiete für eine überwachte Klassifizierung dar. Je mehr Vorwissen ein Bearbeiter miteinbringen kann, umso genauer können gewünschte Vegetations- und Landnutzungsklassen als Trainingsgebiete für die überwachte Klassifikation festgelegt werden.

Im RGB Farbbild hebt sich die erste Hauptkomponente mit der höchsten Varianz, dargestellt in Rot besonders stark hervor. Die höchste Varianz wird vom Waldgebiet, von Baumreihen und einzelnen Bäumen im RGB Bild präsentiert. Die Abstufung hin zur kleineren Varianz läßt sich durch den Übergang von Rot nach Orange und Gelb für Schilfbereiche und das Maisfeld darstellen. Wiesen und Grünlandflächen werden mit der nächst niedrigeren Varianz in Grünen Farbtönen für Wiesen und Grünlandflächen und für Wasserflächen durch Blaue Farbtöne wiedergegeben. Bei den Wasserflächen werden am linken Elbufer seichtere Stellen als Sandbänke erkannt und innerhalb des Weichholzauengebietes lassen sich Altwasserarme erkennen.

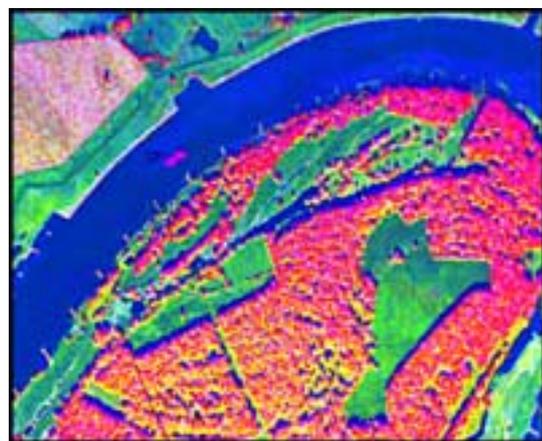
Mit der nachfolgenden unüberwachten Klassifikation kann eine Aussage über den in den Daten enthaltenen Informationsgehalt gemacht werden. Der ISOCLUS Klassifikationsalgorithmus erzeugt die vom Bearbeiter vorgegebene Zahl an Cluster (Klassen) aufgrund statistischer in den Radardaten enthaltener Information. Die ISOCLUS-Klassifikation des Garbeabschnittes wurde mit den ersten drei PCA-Kanälen durchgeführt. Als maximale Anzahl an Clustern wurde 45 ausgewählt. Von den 45 Clustern ergeben allerdings nicht alle Cluster sinnvolle Cluster und werden deshalb meist durch eine nachträgliche Korrektur berichtigt. Die Korrektur erfolgt durch Zusammenlegen oder Aggregieren von zwei bis mehreren Clustern zu einem. Mit dem ISOCLUS-Algorithmus können folgende Cluster für die anschließende überwachte Klassifikation ausgewiesen werden.

Nr.	Bezeichnung der Cluster	Bodenbedeckungstypen
1	Wasser	Elbfluß, Tümpel, Altwasserarme
2	Radarschatten	
3	niedrige Vegetation	Wiesen, Grasland, Grünlandflächen
4	mittelhohe Vegetation	Gebüsch, Schilf, Mais
5	hohe Vegetation	Waldbereiche
6	landwirtschaftliche Nutzfläche	Maisbedeckung

Eine eindeutige Trennung zwischen Siedlung und Waldbereichen ist nicht möglich, da beide Cluster ähnliche Varianzen aufzeigen. Hervorgerufen wird dieser Umstand durch eine Summe von unterschiedlichen Streumechanismen, die zu einer erhöhten Varianz führen.



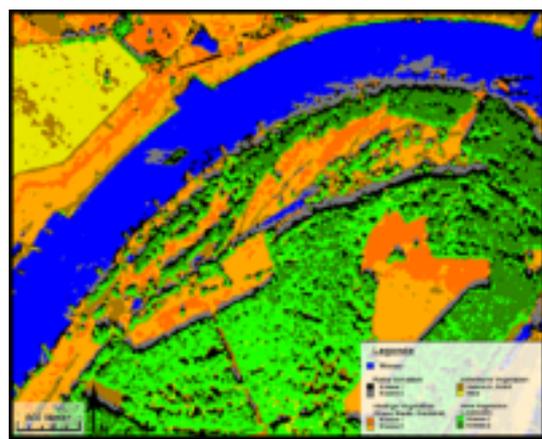
XHH und LHH
Kombination



RGB-Darstellung der drei
Hauptkomponenten



Unüberwachte Klassifikation
ISOCLUS-Klassifikator



Überwachte Klassifikation
ML-Klassifikator

Abbildung 7.4: Naturschutzgebiet Garbe (X- und L-Band Composite, RGB-Darstellung der drei Hauptkomponenten, Unüberwachte Klassifikation ISOCLUS-Klassifikator, Überwachte Klassifikation ML-Klassifikator)

Die mit der unüberwachten Klassifikation erhaltenen Cluster werden nun dem überwachten ML-Klassifikator als Trainingsgebiete vorgegeben. Das Ergebnis wird mit Hilfe der *Confusionsmatrix* und dem *Scatterplot* nach der Trennbarkeit der Klassen und nach der Genauigkeit hin untersucht. Mit der ML-Klassifikation konnten der

„niedrigen Vegetation“ und der „hohen Vegetation“ noch jeweils eine Unterklasse zugeordnet werden, so daß eine Endklassenanzahl von neun trennbaren Klassen erreicht wurde. Auskunft über die Homogenität von einzelnen Klassensignaturen werden durch die Confusionsmatrix erhalten. In Tab.:7.2 wird in Prozent [%], die Trennbarkeit einer Klasse ausgedrückt. In der Diagonalen der Matrix, welche Grau Unterlegt wurde, ist die eindeutige Trennung einer ausgewiesenen Klasse dargestellt, dabei gibt der Wert 100 [%], die höchstmögliche Trennung einer Klasse an. Die Confusionsmatrix kann somit Auskunft über die Qualität der angelegten Trainingsgebiete und über die Klassifikationsgenauigkeit geben. Die durchschnittliche Klassifikationsgenauigkeit des Gebietsausschnittes der Garbe liegt bei 92 [%], die sich aus der Summe der Werte in der Diagonalen der Confusionsmatrix ergibt. Die Gesamtgenauigkeit ergibt sich aus der Summe der Diagonalwerte gewichtet mit der Anzahl der Pixel pro Trainingsgebiet und beträgt bei der Garbe 93 [%]. Als homogenste Flächen (97 bis 99 [%]), erwiesen sich die Klassen Wiesen, Gras- und Grünland, sowie die Wasserflächen mit dem geringsten Anteil an Fremdpixeln. Die zwei Waldklassen weisen eine geringe Homogenität mit 81 bis 85 [%] auf. Die meisten Fremdpixel sind bei den Klassen Mais und Schilf zu beobachten.

Eine graphische Darstellung der Verteilung der gebildeten Klassen kann mit Hilfe des Scatterplottes im Merkmalsraum von zwei Eingangskanälen erfolgen. Die x- und y-Achse beim Scatterplot, dargestellt in der 8 bit Skallierung mit einer Grauwertverteilung von 0 bis 255, wird durch die erste und zweite Hauptkomponente der Eingangbilddaten am Beispiele der Garbe in Abbildung 7.5a dargestellt. Im Merkmalsraum werden die vorgegebenen Trainingsgebiete, nach denen eine ML-Klassifizierung erfolgen soll präsentiert. Die Ellipsen im Merkmalsraum stellen den Grenzbereich dar und bestimmen die Zugehörigkeit eines Pixels zu einer Klasse. Dieser Grenzwert wird auch als Thresholdwert bezeichnet. Die eindeutige Zuweisung eines Grauwertes zu einem Trainingsgebiet wird durch die Signatur innerhalb der Ellipse präsentiert. Liegt dieser ausserhalb so kann er keiner Klasse zugeordnet werden. Diese Darstellungsweise dient zur Überprüfung der eindeutigen Definition von Trainingsbietsklassen. Der Thresholdwert kann vom Bearbeiter durch Veränderung der Grenzen an einer Trainingsgebietklasse angepaßt werden.

	Wasser	Schatten 1	Mais	Wiese 1	Schatten 2	Wiese 2	Wald 1	Wald 2	Schilf
Wasser	97.27	0.3	0	0.01	2.42	0	0	0	0
Schatten 1	0	94.08	0	0	0	0	5.59	0	0.33
Mais	0	0	94.94	0	0	0	0	0.17	4.89
Wiese 1	0	0.05	0	99.21	0	0.73	0	0	0.02
Schatten 2	0.84	4.68	0	0	94.48	0	0	0	0
Wiese 2	0	0	0	0.55	0	98.23	0	0	1.21
Wald 1	0	0.32	0	0	0	0	85.84	13.84	0
Wald 2	0	4.01	0.97	0	0	0	13.46	81.02	0.53
Schilf	0	0.7	7.65	0	0	0.15	0	0.55	90.96

Tab.7.2: Scatterplot-Darstellung der Trainingsgebiete im Merkmalsraum der ersten (x-Achse) und zweiten (y-Achse) Hauptkomponete vom Gebietsausschnitt der Garbe

In Abbildung 7.5a werden die nach der ML-Klassifikation gebildeten Klassen im Merkmalsraum zwischen der ersten und zweiten Hauptkomponente mit der gleichen Farbzueweisung für die Klassen. Alle gebildeten Klassen weisen eine gute Trennung auf. Eine Ausnahme bildet die Schattenklasse, die diffus in allen übrigen Klassen wiederzufinden ist. Die erste als Schatten (schwarz) ausgewiesene Klasse beinhaltet alle Grauwerte, die keiner Klasse zugewiesen werden konnte. Die zweite Schattenklasse (grau) wird durch den tatsächlich vom Radar erzeugten Schatten eindeutig von den anderen Klassen getrennt. Die zweite Schattenklasse wird am Beispiel der Garbe vor allem durch den Baumschatten hervorgerufen. Die Anordnung der Klassen auf der y-Achse erfolgt, von rechts nach links, entsprechend dem Anteil der Varianz. So stellt die Klasse Wasser mit der zweiten Schattenklasse die geringste Varianz im Merkmalsraum dar. Diese Klassen weisen auch die geringste

Rückstreuung des Radarsignals auf. Dies wird durch den höheren Anteil der Vorwärtsstreuung, das heißt vom Sender weg gestreuten elektromagnetischen Welle, als vom Sender empfangenen Rückstreuung hervorgerufen. Die Klassen der „niedrigen“ und „mittelhohen Vegetation“ weisen eine höhere Varianz als die Wasserklasse auf. Dies wird durch die diffuse Rückstreuung des Radarsignals an der Oberfläche des beleuchteten Areals, welches je nach Variation der Dielektrizitätskonstante und den geometrischen Eigenschaften des beleuchteten Objektes, hervorgerufen wird. Die höchsten Varianzen zeigen zwei Waldklassen auf. Die Ursache hierfür ist die Mehrfachstreuung des Radarsignals innerhalb des Waldes, welches zu einer erhöhten Rückstreuung zum Sensor führt. Die Summe der Streuung innerhalb eines Mediums wird als Volumenstreuung bezeichnet. Hierbei kann das Medium sowohl der Boden wie auch der Wald sein. Die Eindringung einer elektromagnetischen Welle ist dabei von Systemparametern, hauptsächlich von der Wellenlänge und Polarisation, und Objektparametern, dielektrische und geometrische Eigenschaften des beleuchteten Objektes, abhängig.

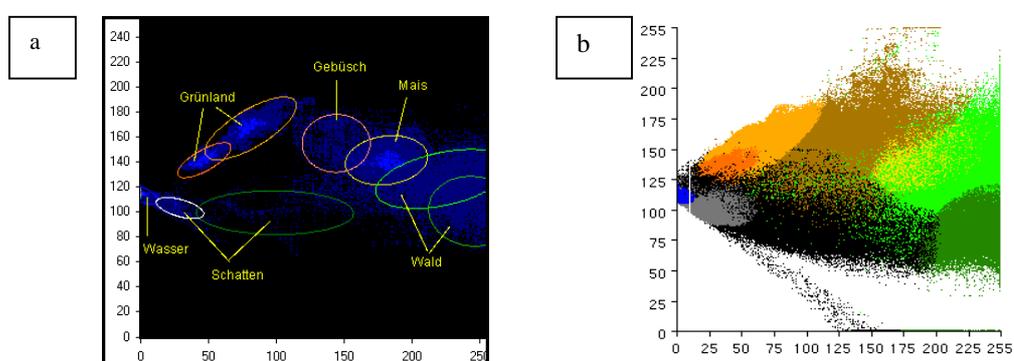


Abbildung 7.5: Darstellung der Scatterplots von den Trainingsgebieten (a) und nach der ML-Klassifikation (b)

Eine eindeutige Interpretation der gebildeten Objektklassen hinsichtlich der Objekt charakteristischen Streumechanismen ist nur eingeschränkt möglich.

Nr	Bezeichnung der Klasse	Bodenbedeckungstypen	Streumechanismen
1	Wasser	Elbfluß, Altwasserarme	Vorwärtsstreuung
2,3	Radarschatten		
4,5	niedrige Vegetation	Gras- und Grünland	Oberflächenstreuung
6	mittelhohe Vegetation	Gebüsch, Schilf, Mais	Oberflächen-, Volumenstreuung
7,8	hohe Vegetation	Waldbereich	Volumenstreuung
9	landwirtschaftliche Ackerflächen	Maisbedeckung	Oberflächen- ,Volumenstreuung

Die Wasser- und Waldklasse, sowie die Objektklasse „niedrige Vegetation“ können eindeutig durch ihren Anteil an niedrige oder hoher Varianz einem Streumechanismus zugeordnet werden. Eine Trennung von Streumechanismen bei den Objektklassen „mittelhohe Vegetation“ und landwirtschaftliche Ackerflächen ist nicht möglich. Dies liegt daran, dass kleine Wellenlängen, die nicht oder nur geringfügig in ein Medium eindringen nur an der Oberfläche eines Mediums gestreut werden. Dabei weisen lange Wellenlängen, die tiefer in ein Medium eindringen können und somit innerhalb eines Medium eine Mehrfach- bis Vielfachstreuung erfahren, eine starke Rückstreuung auf die zu einer hohen Varianz führt. Durch die Hauptachsentransformation wurden alle Frequenzen und Polarisationen zusammengefaßt und nach ihrer Varianz getrennt. So werden Informationen, zum Beispiel im X- und C-Band, die überwiegend aus dem Verhalten der elektromagnetischen Welle von der Oberfläche des beleuchteten Mediums resultieren und eine erhöhte Varianz über Wald aufzeigen mit den Informationen des L-Bandes vermischt. Welches ebenfalls eine hohe Varianz über

Waldbereichen aufzeigt aber durch den Streumechanismus der Volumenstreuung hervorgerufen wird. Ein Objekt an der Oberfläche kann also durch mehrere Streumechanismen repräsentiert werden. Eine eindeutige Trennung der Objektklassen nach den Streumechanismen, mit dem Informationsgehalt der Amplitudendaten ist am Beispiel der Garbe nicht möglich. Eine eindeutige Trennung von Objektklassen ist hiermit also nur möglich, wenn ein Vorwissen über das zu klassifizierende Gebiet besteht und die Bodenbedeckungstypen mit Hilfe der Geländedaten vorhanden sind.

7.1.4.2 Lütkenwischer Aussendeichbereich

Der Gebietsausschnitt Lütkenwisch befindet sich im direkten Austausch mit dem Elbfluß und unterliegt deren wechselnden Wasserspiegelschwankungen. Das Gebiet weist eine homogene Landschaftsstruktur auf und wird überwiegend durch weite Flächen an Wiesen, Gras- und Grünlandflächen repräsentiert. Für den Gebietsausschnitt von Lütkenwisch wurden neun Trainingsgebiete angelegt, die nach dem gleichen Verfahren, wie am Beispiel des Naturschutzgebietes der Garbe vorgestellt ausgewählt wurden. Die Objektklassen wurden in eine Wasser- und acht Grünlandklassen unterteilt. In Abbildung 7.6 (a, b,c) ist das Klassifikationsergebnis des Außendeichbereiches mit neun Klassen dargestellt. In Abbildung 7.7 (a) wird der Scatterplot mit den neun festgelegten Trainingsgebieten und in Abbildung 7.7(b) der Scatterplot mit den nach der ML-Klassifikation erhaltenen Klassen dargestellt.

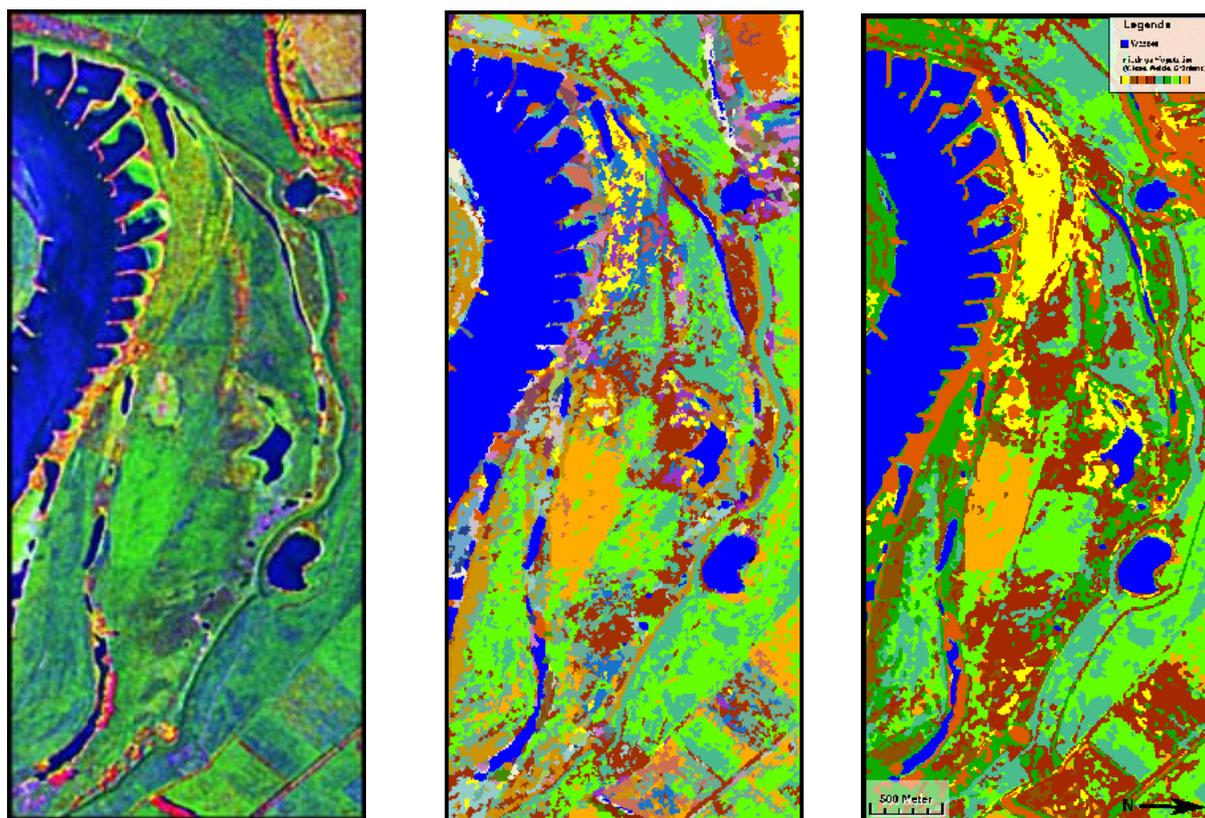


Abbildung 7.6: Lütkenwischer Aussendeichbereich (a= RGB Darstellung der drei Hauptkomponenten, b= unüberwachte Klassifikation, c=überwachte Klassifikation)

Die Gesamtgenauigkeit der Klassifikation beträgt bei diesem Gebietsausschnitt 94 [%]. Die Genauigkeit in der Klassentrennung ist in Tab.7.3 ersichtlich. Eine eindeutige Trennung gegenüber anderen Klassen mit 99 [%] weisen die Wasser- und zwei Grünlandklassen auf. Eine Unterscheidung der Grünlandklassen erfolgt vor allem nach dem Objektparameter der Dielektrizitätskonstante. Der Einfluß der Geometrie des Bewuchses kann

als gering eingestuft werden, da die Befliegung im August kurz nach der Mahd stattfand. Ein weiterer entscheidender Einfluß auf das Radarrückstreusignal stellt hier die Nutzung des Grünlandes dar. In Abbildung 7.6 (c) können zwei homogene rechteckige Strukturen unterschieden werden, die ein Hinweis auf eine intensive Nutzung dieser Gebiete schließen läßt. Nach einem Vergleich mit Geländedaten wurde festgestellt, das es sich hier um Flächen mit intensiver Weidenutzung von Rindern handelt, die eine Verdichtung des Bodens verursachen. Durch die Verdichtung weist der Boden unterschiedliche Dielektrizitätskonstanten im Vergleich zum umliegenden Bereich auf. Die Unterschiede spiegeln sich im Rückstreusignal wieder.

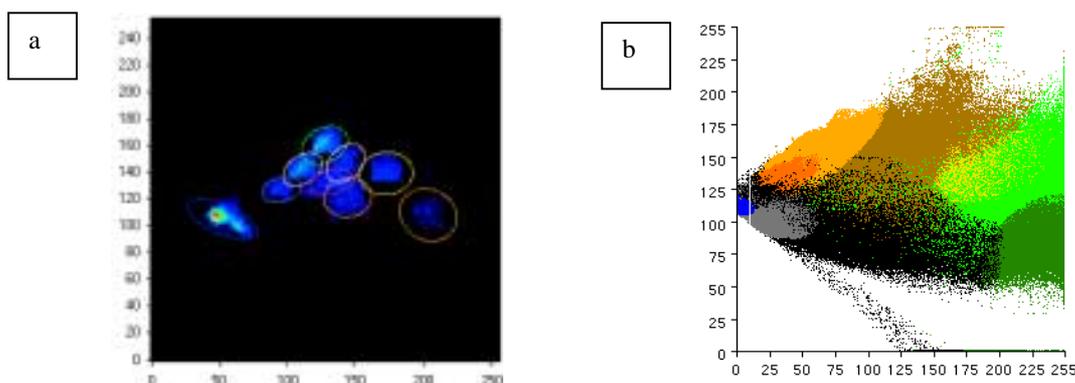


Abbildung 7.7: Darstellung des Scatterplots von den Trainingsgebieten (a) und nach der ML-Klassifikation (b) am Beispiel des Lütckenwischer Aussendeichbereiches

Trotz des homogenen Landschaftgebietes läßt sich eine hohe Heterogenität des beleuchteten Arealen im Radarbild erkennen. Die strukturelle Vielfalt der Klassifikation weist auf ein hohes Potential zur Interpretation von Radarsignaturen im Vergleich zu Geländedaten auf. Die hier aufgrund der zeitlichen Limitation nicht erfolgen konnte. Ein detaillierter Vergleich würde Aufschlüsse über das Verhalten der elektromagnetischen Welle und deren Reaktion mit der Oberfläche, bei Vorhanden sein von detaillierten Geländeaufnahmen, geben. Die im Projekt erhobenen Geländedaten reichen nicht aus um eine präzise Interpretation des Radarsignals zu ermöglichen.

Name	Wasser	GL_1	GL_2	GL_3	GL_4	GL_5	GL_6	GL_7	GL_8
Wasser	99.3	0	0	0	0	0	0	0	0
GL_1	0	99.74	0	0	0	0	0.03	0	0
GL_2	0	0	95.36	0	0	0	4.64	0	0
GL_3	0	0	0	99.18	0	0	0.82	0	0
GL_4	0	1.35	0	0	88.05	5.71	0	0.04	0
GL_5	0	0	0	0	4.58	87.72	0	6.54	0.03
GL_6	0	0	7.02	0.62	0	0	88.67	0	0.08
GL_7	0	0	0	0	1.94	13.39	0.66	67.71	1.51
GL_8	0	0	0	0	0	0.67	1.25	2.13	80.25

Tab.7.3: Scatterplot-Darstellung der Trainingsgebiete im Merkmalsraum der ersten (x-Achse) und zweiten (y-Achse) Hauptkomponente vom Gebietsausschnitt des Lütckenwischer Aussendeichbereiches

7.1.4.3 Lenzener Rückdeichungsbereich

Dieser Gebietsausschnitt liegt im Binnenland und ist durch seinen hohen Anteil an Grünlandflächen, einige Ackerflächen und Baumreihen entlang von Wegen und kleinen Wassergräben gekennzeichnet. Die Grünlandflächen in Deichnähe werden durch den wechselnden Wasserstand des Elbflusses jahreszeitlich mit Qualmwasser vernäßt. Das gesamte Gebiet ist durch rezente Rinnenstrukturen vom Elbstrom geprägt. Die

Auswahl der Trainingsgebiete fand, wie am Beispiel der Garbe gezeigt, durch eine unüberwachte Klassifikation statt. Die Objektklassen „hohe Vegetation“ und „mittelhohe Vegetation“ erhielten jeweils eine Klasse und die Objektklasse „niedrige Vegetation“ erhielt acht mögliche unterscheidbare Klassen. In Abbildung 7.8 wird das Ergebnis der ML-Klassifikation vorgestellt. Die Gesamtgenauigkeit mit 66 [%] ist gering. Dies liegt wie im Scatterplot, Abbildung 7.8 (c), ersichtlich an der nicht möglichen Trennung der Trainingsgebiete. Die starke Überschneidung der Grünlandflächen, sowie Mais und Wald verursachen bei der Klassifikation keine eindeutige Trennung und weisen eine hohe Anzahl an Fremdpxeln auf. Hervorgerufen wird dieses Problem durch den hohen *Speckel*-Anteil und durch die Lage zum Sensor auf diesem Gebiet. Der steile Sensorblickwinkel verursacht eine Überabtastung dieses Gebietes, was zu einer erhöhten Rückstreuung der elektromagnetischen Welle führt. Diese Artefakte lassen sich auch nicht durch das zweifache Filtern und die Hauptachsentransformation beseitigen.

Name	Mais	Wald	GL_1	GL_2	GL_3	GL_4	GL_5	GL_6	GL_7	GL_8	GL_9
Mais	86.23	11.17	0	0	0	0.04	0.01	0	0	0	0
wald	35.85	54.53	0	0	0	1.26	0.04	0	0	0.03	0
GL_1	0	0	85.73	3.51	3.62	0	0	1.06	3.03	1.01	0.27
GL_2	0	0	7.07	64.42	2.01	0	0.01	2.02	12.26	2.31	1.3
GL_3	0	0	6.83	3.11	33.5	0	0.15	0.05	0.74	2.44	0.05
GL_4	0.02	0.22	0	0.03	0	86.86	1.23	1.02	0.04	4.18	1.23
GL_5	0	0	0	0	0	2.75	85	1	0	6.17	0.14
GL_6	0	0	0.18	6.24	0.01	1.23	0.1	21.64	20.58	3.63	45.06
GL_7	0	0	6.8	12.82	0.77	0.01	0.05	4.12	57.52	1.47	3.17
GL_8	0	0.01	0.06	4.7	0.18	6.54	17.61	15.26	3.22	34.77	6.63
GL_9	0	0	1.23	5.03	0.15	1.66	0.04	15.25	26.16	4.28	43.96

Tab 7.4.: Scatterplot-Darstellung der Trainingsgebiete im Merkmalsraum der ersten (x-Achse) und zweiten (y-Achse) Hauptkomponente vom Gebietsausschnitt des Lenzener Rückdeichungsbereiches

Die Objektklasse „hohe Vegetation“ wird durch die Baumreihen am Weges- oder Wassergrabenrand dargestellt. Eine Überschneidung mit der Objektklasse „mittelhohe Vegetation“, die in diesem Fall hauptsächlich von Ackerflächen mit Maisbedeckung präsentiert wird, führt dazu, daß diese Objektklasse häufig auch in der Nähe von der Objektklasse „hohe Vegetation“ wiedergefunden werden kann. Trotz der starken Überschneidung von Grünlandflächen ist eine Trennung der Objektklassen möglich. Die Unterscheidungen werden vor allem durch die Objektparameter, Dielektrizitätskonstante und geometrische Eigenschaften, des beleuchteten Areals hervorgerufen. Die Trennung dieser beiden Parameter, über Vegetationsbedeckten Flächen ist nur mit Modellen möglich, die den Faktor der Dämpfung von Mikrowellen bei Eindringung in die Vegetationsdecke mitberücksichtigen. Mit dem statistischen Klassifikationsansatz ist eine Trennung der Objektparameter nicht möglich. Die statistische pixelbasierte Klassifikation von Objektklassen nach der Verteilung der Varianz ermöglicht zwar eine Trennung von Objektklassen macht jedoch eine physikalische Interpretation schwierig.

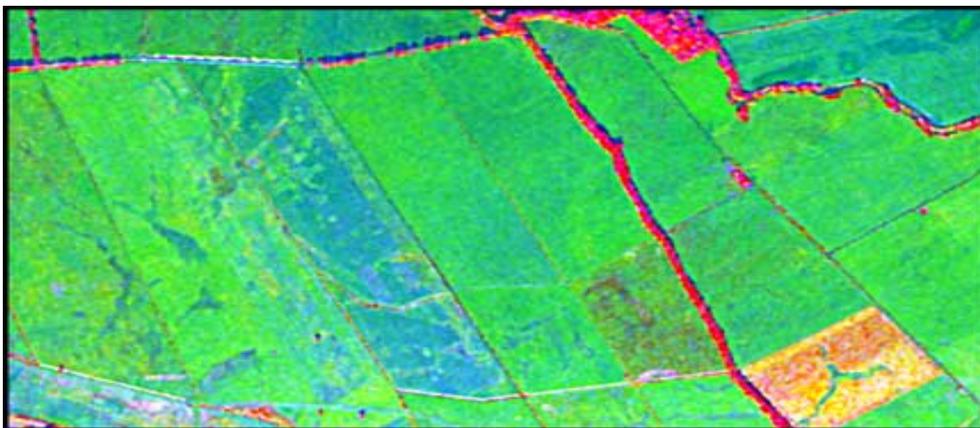


Abbildung 7.8a: Lenzener Rückdeichungsbereich (RGB Darstellung der ersten drei Hauptkomponenten)

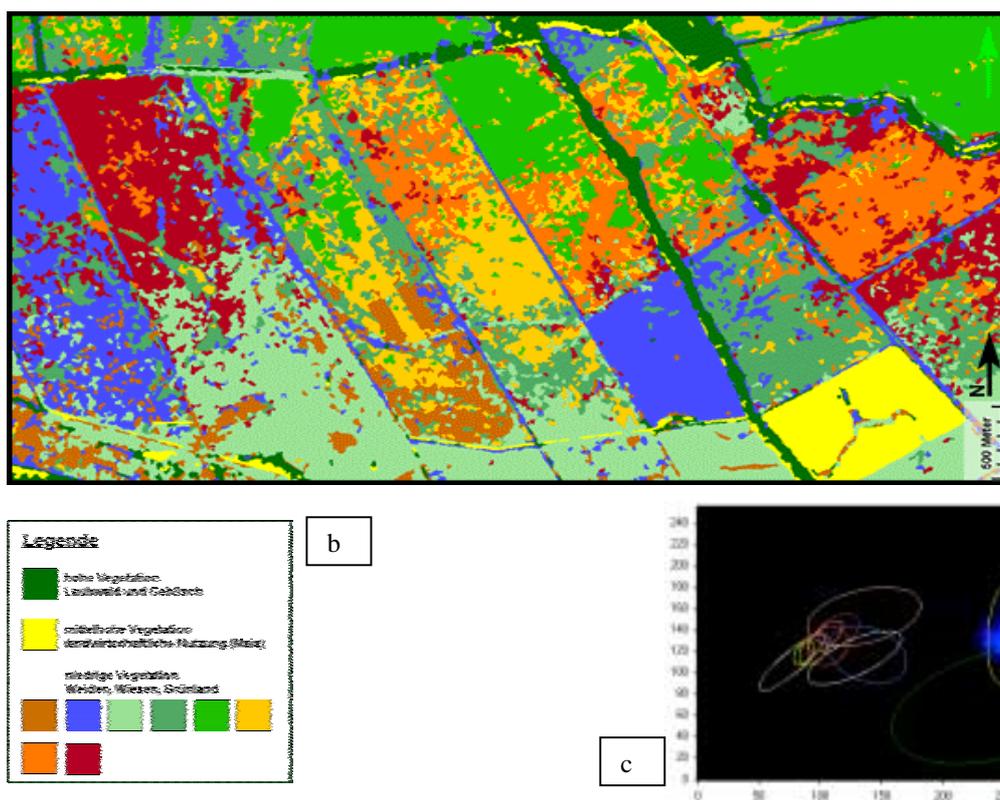


Abbildung 7.8 (b, c): Lenzener Rückdeichungsbereich (b= ML-Klassifikation, c=Scatterplot der Trainingsgebiete)

7.1.5 Jahreszeitlicher Vergleich

Beim jahreszeitlichem Vergleich werden zwei Aufnahmezeitpunkte, April und August, auf ihre Unterschiedlichkeit hin untersucht. Hiermit können jahreszeitliche Unterschiede in der Vegetationsdecke und der Einfluß des schwankenden Wasserstandes des Elbstromes erfaßt werden. Zur Aufdeckung der Differenz wird das *Change Detection* Modul von PCI verwendet. Die Datengrundlage bilden die drei Hauptkomponenten der Hauptachsentransformation von den zwei jahreszeitlichen Aufnahmen. Das Ergebnis ausgegeben in der Differenz zwischen den zwei Jahreszeiten sind drei neue Bildkanäle. Eine Veränderung wird durch eine Varianz angegeben und keine Veränderung wird durch einen konstanten Wert präsentiert. Die drei neu erhaltenen Bildkanäle werden dann im RGB-Farbbild (Rot, Grün, Blau) dargestellt. Im ersten Bildkanal erhält die Veränderung eine rote Färbung im zweiten eine grüne und im dritten eine blaue. Zur Erinnerung sollte nochmals erwähnt werden, das die erste Hauptkomponente die höchste Varianz aufweist und diese mit der zweiten und dritten abnimmt.

Im Gebietsausschnitt Lenzener Rückdeichungsbereich, in Abbildung 7.9, fallen zwei markante Bereiche, ein rotes Feld und linienhafte Strukturen, auf. Das rote Feld ist während der Aprilbefliegung eine unbedecktes Ackerfeld, welches im August mit reifen ausgewachsenem Mais bedeckt war. Dieses Feld erhält eine rote Färbung durch eine hohe Änderung der Varianz. Die linienhaften Strukturen stellen die Veränderung der Belaubung von Baumreihen am Wegesrand dar. Deren grünliche Färbung erhalten sie von der geringeren Varianzänderung zwischen den zwei jahreszeitlichen Aufnahmen. Die großen blauen Flächen stellen Veränderungen des Grünlandes dar, welches durch die Veränderung in der Dielektrizitätskonstante oder in der Veränderung der geometrischen Struktur liegen können.

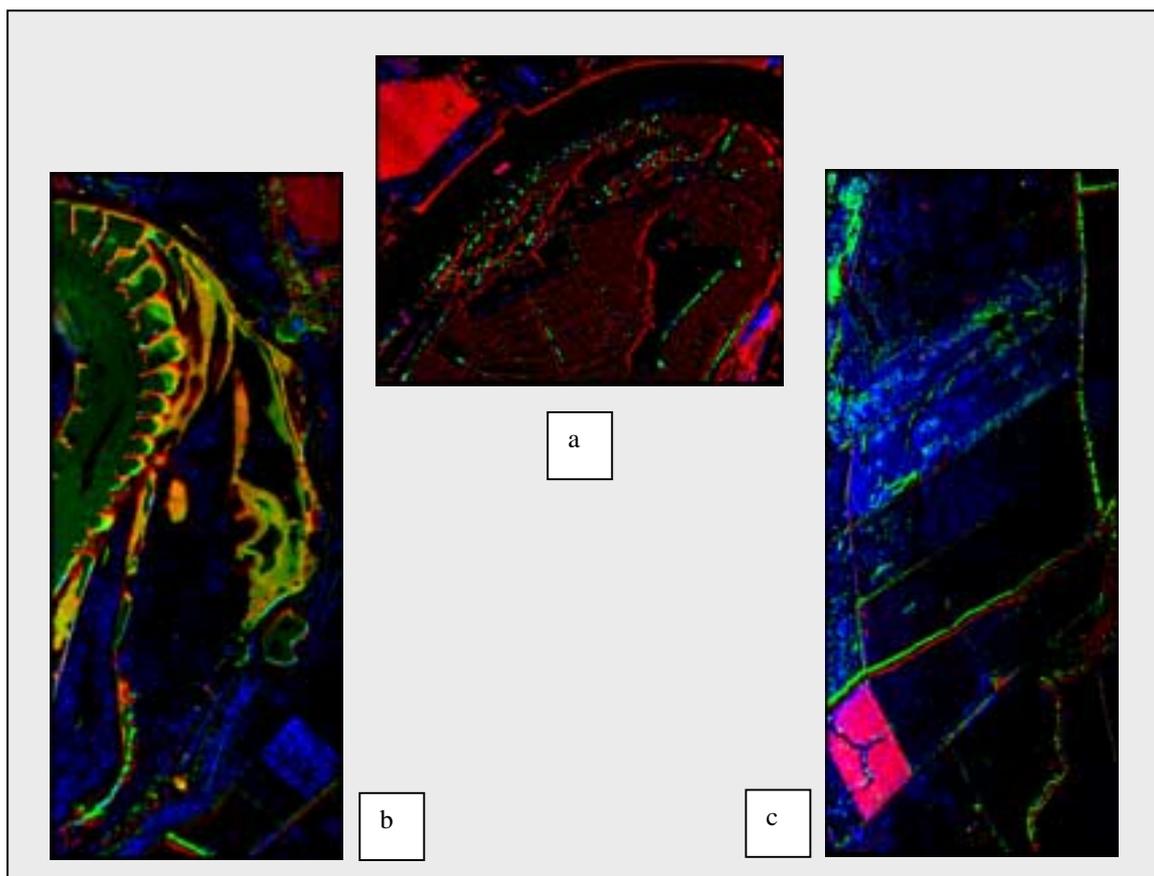


Abbildung 7.9: *Change Detection* Darstellung der drei Gebietsausschnitte (a=Naturschutzgebiet Garbe, b=Lütkenwischer Aussendeichbereich, c=Lenzener Rückdeichungsbereich)

Im Gebietsausschnitt Lütkenwischer Aussendeichbereich, zeigen überwiegend die Überflutungsbereiche oder Vernässungsstellen in den Rinnenstrukturen eine Veränderung. Die roten Bereiche der Bühnen lassen eine Überschwemmung dieser Bereiche vermuten. Eine starke Veränderung durch hohe Vegetation auf den Bühnen ist unwahrscheinlich. Da auf diesem Gebietsausschnitt zu beiden Aufnahmezeitpunkten die Vegetation eine ähnliche Höhe aufweist, ist der Einfluß der Veränderungen durch den Objektparameter der Rauhfugigkeit geringfügig. Veränderungen werden hauptsächlich durch den Objektparameter der Dielektrizitätskonstante hervorgerufen. Markant wird auch die Veränderung einer Ackerfläche im oberen rechten Bereich durch die rote Farbgebung deutlich.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, das ein gutes Bildvorverarbeitungsverfahren, mit einer zweifachen Filtermethode und Anwendung einer Hauptachsentransformation, ermittelt worden ist. Als geeignetes statistisches Klassifikationsverfahren hat sich die pixelweise Klassifikation herausgestellt. Hierbei wurden die besten Ergebnisse mit einem hybriden Klassifikationsverfahren erzielt. Die unüberwachte Klassifikation wurde verwendet um Trainingsgebiete für die überwachte Klassifikation zu bilden. Es konnte gezeigt werden, das folgende Objektklassen klassifiziert und voneinander getrennt werden können: Wasserflächen und Wasserläufe, Grünlandflächen, Ackerflächen, Waldbereiche.

Mit einem statistischen Klassifikationsverfahren konnten Objektklassen voneinander getrennt werden, jedoch ist die physikalische Interpretation der Objektklasse nicht eindeutig. Dazu sollte ein Klassifikationsverfahren, der die physikalischen Beziehungen zwischen der elektromagnetischen Welle und dem beleuchteten Objekt berücksichtigt, verwendet werden. Diese Ansätze sind jedoch noch in der Entwicklung, doch zeigen erste Versuche vielversprechende Ergebnisse.

7.2 Modellierung und Invertierung von Oberflächenparametern

Während der zwei jährigen Projekt-Förderungsphase sind viele Ergebnisse in den drei großen Themenbereichen des Projektes zustande gekommen. Im folgenden sollen nur die wichtigsten Ergebnisse dargestellt werden. Alle Daten die während der zwei Geländekampagnen erhoben worden, sind im Anhang tabellarisch aufgelistet. Es wurden nur die Geländedaten aufbereitet, deren entsprechenden Radar-Daten vorhanden sind.

Feld Nr.	09.April.1997		20.August.1997	
	Feldbedeckung	Feldbearbeitung	Feldbedeckung	Feldbearbeitung
A5/1	Winterraps	Saatbeet	unbedeckt	Saatbeet/grob Geegt
A5/2	Erbse	Saatbeet/grob Geegt	unbedeckt	Gegrubbert
A5/3	unbedeckt	Gegrubbert	Mais	Saatbeet
A5/4	unbedeckt	Gegrubbert	Mais	Saatbeet
A5/5	Wintergetreide	Saatbeet	unbedeckt	Saatbeet/Geeht
A5/6	Wintergetreide	Saatbeet	Halmreste	Saatbeet
A5/7	unbedeckt	Saatbeet/Geeht	Kartoffeln	Saatbeet
A5/8	Wintergetreide	Saatbeet	unbedeckt	tief Gefpflügt (Schollen)
A5/9	unbedeckt	Saatbeet/Geeht	Zuckerrüben	Saatbeet
A5/10	Wintergetreide	Saatbeet	unbedeckt	Gegrubbert
A5/11	unbedeckt	Saatbeet/Geeht	Zuckerrüben	Saatbeet
A5/12	unbedeckt	Saatbeet/Geeht	Saatgras	Saatbeet
A5/13	Wintergetreide	Saatbeet	unbedeckt	Gegrubbert
A5/14	Raps	Saatbeet	unbedeckt	Gegrubbert
A5/15	unbedeckt	Saatbeet/Geeht	Saatgras	Saatbeet
A5/16	Wintergetreide	Saatbeet	unbedeckt	Gepflügt (Schollen)
A5/17	unbedeckt	Gepflügt (Schollen)	Mais	Saatbeet
A5/18	unbedeckt	Gepflügt (Schollen)	Mais	Saatbeet

Tab.75: Bodenbedeckungsart und –bearbeitung während der zwei jahreszeitlichen Meßkampagnen

In Tab. 7.5 sind die jahreszeitlichen unterschiedlichen Bodenbedeckungsarten und –bearbeitungen aufgelistet. Zum Zeitpunkt der August-Kampagne sind viele landwirtschaftlichen Felder mit Feldfruchtarten versehen, da ein Vergleich zwischen den Geländeparametern und den invertierten Oberflächenparametern nur auf unbedeckten Flächen möglich ist, konnten diese Felder nicht in die Invertierung miteinbezogen werden. Wie erwähnt, gibt es bis zum heutigen Stand der Forschung noch keine ausreichenden Möglichkeiten Vegetationsparameter mit Hilfe des Radars zur Modellieren. Alle beprobten Felder im April konnten zum Vergleich mit dem normalisierten Rückstreuoeffizienten einbezogen werden. Im August mußten wegen starkem Vegetationsaufwuchs folgende Felder A5/3, 4, 7, 9, 11, 17, 18 ausgeschlossen werden. Das Ausschließen der genannten Felder bezieht sich auf den Vergleich des invertierten oberflächennahen Rauigkeitsparameter.

Im folgenden werden die Ergebnisse nach den erhobenen Geländedaten, den Radaraufzeichnungen und die Modellierung und Invertierung von geophysikalischen Parametern in den einzelnen Kapiteln beschrieben.

7.2.1 Gelände – Daten

Die zusammenfassenden Ergebnisse für den oberflächennahen Geländeparameter der Bodenfeuchte, der gravimetrisch wie auch mit der TDR Technik erhoben worden ist, sind folgende:

- Für die Messungen im April, in den zwei Bodentiefen, 0 – 4 [cm] und 4 – 8 [cm], kann bei Betrachtung der volumetrischen Werte ein regelmäßiger Trend festgestellt werden. Die mit dem TDR erhobenen Werte weisen im Durchschnitt einen niedrigeren Wert auf als die mit den Stechzylindern erhobenen Werte. Die

absolute mittlere Abweichung zwischen den gravimetrischen und den TDR Messungen in der Bodentiefe 0 - 4 [cm] beträgt 3.63 [vol %] und in der Tiefe 0 - 8 [cm] 3.81 [vol %]. Die Korrelation der beiden Meßreihen, gravimetrisch versus TDR-Methode, ist sehr hoch, dies bedeutet, das die TDR-Meßmethode, die einem viel geringeren Arbeitsaufwand zur Bodenfeuchtemessung erfordert, eine durchaus ebenbürtige Methode darstellt. Die Bodenfeuchtwerte in der tieferen Bodenschicht weisen feuchtere Werte auf. In der Tiefe 0 - 4 [cm] variieren diese von 9 [vol. %] bis 29 [vol. %], in der Tiefe von 4 - 8 [cm] variieren diese von 13 [vol. %] bis 39 [vol. %]. Hier sollte beachtet werden, daß die Bodenfeuchtwerte in der tieferen Schicht von einigen landwirtschaftlichen Testfeldern den Gültigkeitsbereich vom OH-Modell mit der Grenze von 31 [vol %] und DUBOIS-Modell mit einer Grenze bei 35 [vol %] überstiegen werden. Es handelt sich hier um die Felder A5/2, 7, 9, 10 und 16.

- Während der August Geländekampagne konnten nur vereinzelt TDR Aufnahmen aufgrund des sehr stark verdichteten Oberbodens gemacht werden. Das Einführen der Sonden in den Boden war ohne Gefahr, das diese Brechen nicht möglich. Deshalb wurden im Folgenden nur noch die gravimetrischen Bodenfeuchten als Referenzwerte bei der Invertierung herangezogen. Die Bodenfeuchtwerte in der Bodenschicht 0 – 4 [cm] variieren von 5 [vol %] bis 28 [vol %] und in der tieferen Schicht 4 – 8 [cm] variieren diese von 5 [vol %] bis 31 [vol %]. Die Schwankungen im August sind höher und können aufgrund der trockenen klimatischen Verhältnisse auf die unterschiedlichen Speicher- oder Bindungsfähigkeiten des Bodens zurückgeführt werden. Die untere Bodenfeuchtegrenze wird vom OH-Modell, das bei 9 [vol %] liegt, durch folgende Felder A5/1, 2, 5, 7, 17,18 unterschritten.
- Bei einem jahreszeitlichen Vergleich der oberflächlich aufgenommenen Bodenfeuchten in den zwei gemessenen Bodentiefen auf den 18 Testfeldern weisen die August-Messungen geringere Werte auf. Eine Ausnahme bilden hier das Feld A5/6 und A5/8. Die Werte zwischen den beiden jahreszeitlichen Aufnahmen stellen eine absolute mittlere Abweichung von 11 [vol. %] dar.

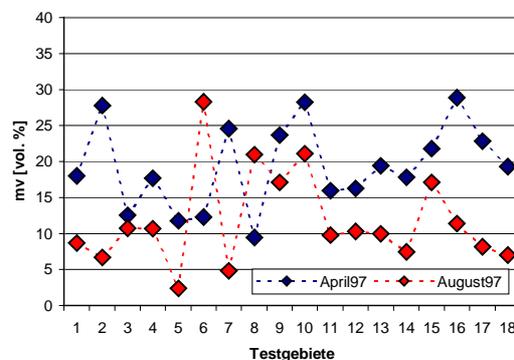


Abbildung 7.10: Jahreszeitliche Bodenfeuchteverteilung m_v [vol. %] in einer Tiefe von 0-4 cm.

- Eine Korrelation der Bodenfeuchte mit der Bodenart ist festgestellt worden. So weisen im April besonders feuchte Felder lehmige bis tonige Zusammensetzungen der Bodenarten auf (Feld A5/ 8, 9, 10, 15, 16, 17). Eine Ausnahme stellt hier das Feld A5/8 mit hohem LT Anteil aber geringer Bodenfeuchte, welches vielleicht durch seine erhöhte Lage im Gelände erklärt werden kann. Die trockensten landwirtschaftlichen Felder im August weisen vor allem einen hohen Anteil an Sand auf (A5/1, 5, 11, 12, 13, 14, 18). Eine Ausnahme in diese Einteilung stellen zwei Felder A5/2 und 7 dar. Beider Felder weisen hohe Bodenfeuchten im April auf und geringe im August. Ein möglicher Grund kann die Fehlklassifizierung des Felder 2 sein, da dieses nach der Fingerprobe eingeteilt worden ist. Das Feld 7 weist einen hohen Anteil an Sand auf und unterliegt durch seine Nähe zum Alandeich, süd-ost im Untersuchungsgebiet, den Schwankungen des Flusses. Im April durch seine Lage im Qualmwasserbereich und im August durch die trockenen klimatischen Bedingungen. Die jeweiligen Umrechnungen von volumetrischer Bodenfeuchte in

den Realteil der Dielektrizitätskonstante erfolgte mit dem Algorithmus von TOPP [1980]. Hier wurde kein Einfluß der Bodenarten auf die Umrechnungen beobachtet.

Die zusammenfassenden Ergebnisse für den oberflächennahen Geländeparameter der Bodenrauigkeit, der erhoben worden ist, sind folgende:

- Auf den 18 landwirtschaftlichen Testflächen können vier Bearbeitungsarten unterschieden werden: Saatbett, Geeggt, Geggrubert und Gepflügt. Die Bodenrauigkeiten wurden in vier Richtungen gemessen, senkrecht zur Bearbeitungsrichtung SB, parallel zur Bearbeitungsrichtung PB, senkrecht zur Flugrichtung SF und parallel zur Flugrichtung PF. Die Abweichungen zwischen den verschiedenen Rauigkeitsrichtungen sind eher gering, als daß von Unterschieden gesprochen werden kann.
- Die oberflächennahen Rauigkeiten, weisen je nach Bearbeitungsart, im April durchschnittlich niedrigere Werte s 1.4 [cm] als im August s 1.9 [cm] auf. Oberflächennahe Messungen der Bodenrauigkeit konnten im August nur auf 11 Testfeldern wegen starkem Bewuchs stattfinden. Die jahreszeitliche Verteilung der Bodenrauigkeiten zeigt deutlich höhere Werte in den August-Messungen auf. Eine absolute mittlere Abweichung von 1 [cm] zwischen den jahreszeitlichen Aufnahmen ist festzuhalten. Hohe Rauigkeiten weisen vor allem landwirtschaftliche Felder auf, die gepflügt oder gegrubbert worden sind. Im April und August überschreitet jeweils ein Feld, A5/18 und A5/16, die Grenzen der Gültigkeitsbedingungen nach DUBOIS. Das OH-Modell faßt seine Rauigkeitsgrenzen weiter und ist für alle im Gelände gemessenen Rauigkeiten gültig.
- Der Parameter der Autokorrelationslänge wurden pro Feld jeweils in vier Richtungen gemessen. Im April weisen die Werte kleine Autokorrelationslängen, von l 4.8 [cm] auf wohingegen die August-Messungen höhere Werte, von l 9.9 [cm] aufweisen.

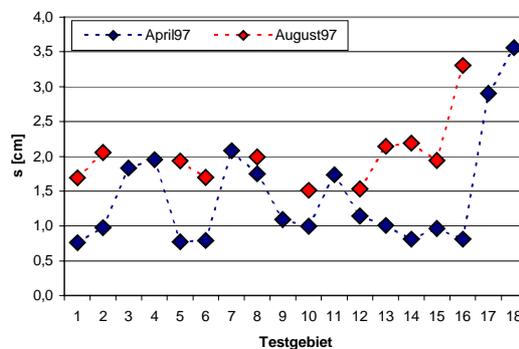


Abbildung 7.11: Jahreszeitliche oberflächennahe Bodenrauigkeitsverteilung s [cm]

Die oberflächennahe Rauigkeit wird wie erwähnt durch zwei Parameter, die horizontale (Autokorrelationslänge l) und vertikale (RMS – Höhe s) Rauigkeit beschrieben. Um eine Beziehung zur verwendeten Wellenlänge zu erhalten, werden beide Parameter mit der Wellenzahl $k = 2\pi/\lambda$ multipliziert. Die Darstellung der Rauigkeitsergebnisse im $ks - kl$ Raum für L – Band zeigen deutlich, das nicht alle gemessenen Werte durch die Gültigkeitsbedingungen der Modelle erfaßt werden können. Das OH – Modell erfaßt einen großen Anteil der im August erhobenen Daten, deckt aber die Vielzahl der im April erhobenen Daten nicht ab. Das Modell von DUBOIS bei Berücksichtigung der Autokorrelationslänge, deckt ebenfalls nicht alle gemessenen Werte ab. Auch bei Betrachtung nur des Wertebereichs für ks ist ersichtlich, daß nicht alle gemessenen Werte in den Gültigkeitsbereich fallen und eine Vielzahl der Werte nicht berücksichtigt werden. Das theoretische Modell SPM erfaßt eine Vielzahl der erhobenen Werte deckt aber landwirtschaftliche Felder mit höheren Rauigkeiten als ks 0.3 nicht. Natürliche Oberflächen, Beispiel der landwirtschaftlichen Flächen an der unteren Mittelalbe, weisen oft Rauigkeiten von $0.2 < ks < 1.5$ und $0.3 < kl < 4.5$ auf.

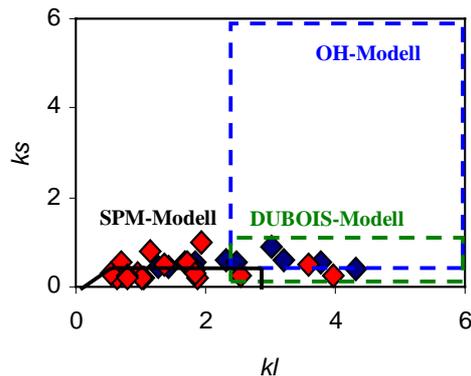


Abbildung 7.12: Gültigkeitsbereich der theoretischen und empirischen Modelle im Vergleich zu den erhobenen Geländeparametern für April (rote Rhomben) und August (blaue Rhomben).

7.2.2 Radar-Daten (E-SAR)

Der Rückstreuquerschnitt im LHH im April 97 variiert über die 18 Testflächen um 8 [dB], im LVV um 10 [dB] und im LHV ebenfalls um 8 [dB]. Festzustellen ist der Trend $HH < VV$ um 1 [dB]. Die landwirtschaftlichen Felder A5/7, 11, 12 und 14 weisen in Vergleich zu den Polarisationen sehr niedrige Unterschiede in den Werten auf. Bei Betrachtung der Werte der mittleren Bodenfeuchte auf diesen Feldern, fällt auf, dass sie einen erhöhten Wert aufweisen. Die RMS – Höhen auf diesen Testflächen ist ebenfalls erhöht. Auffällig ist, dass die genannten Testflächen die gleiche Bodenbearbeitung aufweisen, sie wurden geeggt. Die HV Polarisation, wie auch von anderen Autoren in vielen Studien bestätigt werden kann, weist im Durchschnitt 10 [dB] niedrigere Werte auf.

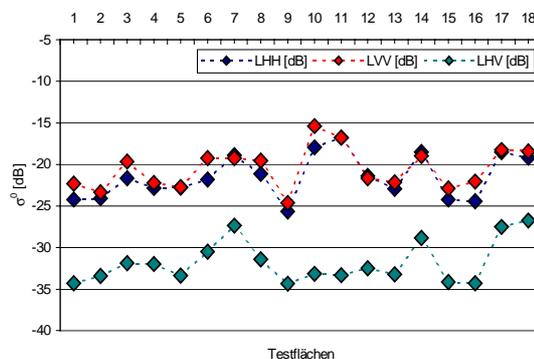


Abbildung 7.13: Rückstreuquerschnitt σ^0 [dB] für April 97 im L – Band dargestellt für die 18 Testflächen.

Der Rückstreuquerschnitt im August 97 für LHH variiert über die 12 landwirtschaftlichen Testfelder um 13 [dB], im LVV um 10 dB und im LHV um 15 [dB]. Zu diesem Zeitpunkt ist der Trend $HH > VV$ im Durchschnitt um 1.2 [dB] zu erkennen. Dieser Trend ist auf den landwirtschaftlichen Testflächen mit dichter Vegetation oder erhöhter Rauigkeit auf den unbedeckten Flächen zu beobachten. Die Flächen, A5/12 und A5/15, die eine geringe Rauigkeit und nur spärliche Vegetation aufweisen, ist $HH < VV$. Auch im August weist die HV Polarisation im Durchschnitt, um 8 [dB], viel geringere Werte auf.

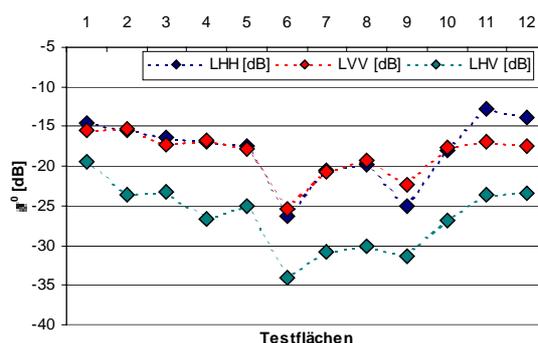


Abbildung 7.14: Rückstreuquerschnitt σ^0 [dB] für August 97 im L – Band dargestellt für die 18 Testflächen.

Die jahreszeitlichen Unterschiede zwischen den beiden Flugkampagnen äußern sich auch im Rückstreuquerschnitt. Im LHH für alle 18 Testflächen ist eine Differenz von 4 [dB], im LVV von 2 [dB] und im LHV von 6 [dB] zu verzeichnen. Das L-Band im April weist in allen drei Polarisationen geringere Rückstreuwerte σ^0 [dB] auf als im August. Angenommen werden könnte gerade der umgekehrte Fall, da im August geringere Bodenfeuchten zu geringeren Rückstreuquerschnitten führen könnten. Die tatsächlichen geringeren Bodenfeuchten führen aber durch die Anwesenheit der Vegetation auf den Testflächen im Rückstreuquerschnitt zu erhöhten Werten. An diesem Beispiel ist sehr schön der Effekt der Depolarisation, wie im Kapitel 3.2 beschrieben, zu erkennen. Eine andere Erklärung wäre, dass die hohe Bodenfeuchte im April verantwortlich ist für den Abfall des Rückstreusignals. Wie aus einigen Studien (DOBSON & ULABY 1986, BRUN 1990, GENG 1996, PULTZ 1997) bekannt ist kann ab einem Schwellwert, der Abhängig ist von der Bodenfeuchte gesehen zur Wellenlänge und dem Einfallswinkel, das Rückstreusignal aufgrund von spiegelnder Reflexion abfallen. PULTZ et al. (1997) weist diese Phänomene bei feuchten Feldern mit hohem Einfallswinkel nach.

7.2.3 Extraktion von Oberflächenparametern

Die Auswertungen der empirischen Modelle, OH-Modell (1992) und DUBOIS-Modell (1995) werden in drei Teile gegliedert. Als erstes sollen die Ergebnisse der Korrelationen zwischen dem Rückstreusignal und dem gemessenen Oberflächenparameter im Gelände dargestellt werden. Als zweites werden die wesentlichen Ergebnisse der Modellierung des Rückstreusignales kurz dargestellt. Hierzu dienen die im Gelände erhobenen Oberflächenparameter als Input für das modellierte Rückstreusignal, welches mit dem Rückstreusignal des Radar (E-SAR) verglichen wird. Diese Untersuchung dient zum Vergleich der empirischen Modelle untereinander. Als drittes werden die Ergebnisse der Invertierung der Oberflächenparameter vorgestellt. Hierzu dienen die Rückstreusignale des Radars als Input für die invertierten Oberflächenparameter.

Um die Güte des Vergleiches beurteilen zu können, die im Gelände gemessenen zu den modellierten oder invertierten Daten wird in Form einer Korrelationsanalyse mit linearer Einfachregression, eine Gegenüberstellung vorgenommen. Ein weiteres Qualitätsmerkmal stellt die Berechnung des RMS-Fehler dar, die ein Maß für die Streuung der Werte ist. Als Gültigkeitsbedingungen für die Berücksichtigung des dominierenden Rückstreumechanismus, die Oberflächenstreuung, wurden alle Werte, die $\sigma_{HH}^0/\sigma_{VV}^0 > 1$ [dB] und $\sigma_{HV}^0/\sigma_{VH}^0 > -11$ [dB] ausgeschieden.

7.2.3.1 Korrelationsanalysen

Das Zusammenwirken von mehreren komplexen Mechanismen macht die Korrelationsuntersuchungen von dem normalisierten Rückstreusignal zu den im Gelände gemessenen Bodenparameter schwierig. Die naturgegebene Komplexität der Oberflächenparameter macht eine Betrachtung von einem variierenden Bodenparameter in einer konstanten Umgebung nicht möglich. Daher ist die Interpretation eines einzelnen Parameters äußerst schwierig und macht es zwingend ihn immer in Beziehung zu seiner Umgebung zu sehen.

Die wichtigsten Ergebnisse der Korrelationsanalysen zwischen dem normalisierten Rückstreukoeffizienten zu einem im Gelände gemessenen Bodenparameter werden im folgenden kurz dargestellt.

- Signifikanteste Korrelationen zu den Aufnahmezeitpunkten ergaben sich zwischen der Bodenfeuchte und dem gleich-polarisierten Ratio des C-Bandes C_{HH}/C_{VV} , die bei Betrachtung der 18 Testflächen zwischen $r = 0.83$ und $r = 0.87$ lag. Diese hohe Korrelation wurde nicht nur auf den unbedeckten Flächen, sondern auch auf den bedeckten Flächen erlangt, die damit eine hohe Sensitivität des gleich-polarisierten Ratios im C-Band zur Bodenfeuchte aufzeigt. Diese Sensitivität konnte auch in vielen Studien mit dem C-Band bestätigt werden (CHEN 1995). Dabei kann festgehalten werden, dass die Sensitivität für die im Gelände gemessene Bodentiefe von 4 – 8 [cm] höher ist als die in der Tiefe von 0 – 4 [cm].
- Signifikanteste Korrelationen ergaben sich zwischen der Rauigkeit und dem kreuz-polarisierten Ratio des L-Bandes mit einer Gesamtvarianz von $r = 0.83$. Festgehalten werden kann hier, dass alle gemessenen Rauigkeitsrichtungen eine ähnlich starke Sensitivität zu den zwei Aufnahmezeitpunkten, April und August, aufzeigen. Wie bereits diskutiert, wird in der Literatur die ‚apparent Roughness‘, die von uns senkrecht zur Flugrichtung gemessen worden ist, als die am sensitivsten betrachtet, welches aber durch die Korrelationsanalyse nicht bestätigt werden konnte. An dieser Stelle sollte deshalb nochmals daraufhingewiesen werden, dass diese Rauigkeitsrichtung von uns für den Zeitpunkt im April nicht direkt im Gelände gemessen worden ist, sondern nach der Methode von SALEH (1994) im nachhinein rekonstruiert worden ist. Hierbei können sich natürlich Fehler bei der Berechnung ergeben. Zusätzlich ergeben sich statistische Instabilitäten bei der Interpretationen von nur je zwei Messungen pro Rauigkeitsrichtung auf einem Feld. Für die weiteren Untersuchungen soll trotzdem diese Rauigkeitsrichtung, senkrecht zur Flugrichtung, im Vergleich zu den invertierten Werten verwendet werden.
- Eine Abhängigkeit des normalisierten Rückstreusignals auf den Einfallswinkel ist nicht zu beobachten. Die Streuung des Einfallswinkels liegt zwischen 39° und 52° . In einigen Studien (ULABY 1986) ist eine hohe Abhängigkeit des normalisierten Rückstreusignals zum Einfallswinkel nahe Nadir, zwischen 0° und 20° , beobachtet worden. Dies liegt am exponentiellen Abfall des Anteils der kohärenten Komponente der Rückstreuintensität mit steigendem Einfallswinkel. Ab 20° ist der Abfall nur noch stetig und hat dadurch keinen signifikanten Einfluß auf das Rückstreusignal.

7.2.3.2 Modellierung des Rückstreukoeffizienten

Bei der Modellierung der Rückstreusignale, aller Polarisierungen (für C-Band HH und VV, für L-Band HH, VV und HV) kann allgemein festgehalten werden, dass sich die Ergebnisse der empirischen Modelle nicht stark voneinander unterscheiden. Die Korrelationen liegen hier bei $r = 0.98$, dabei weisen die Rückstreusignale, berechnet nach dem OH-Modell, tendenziell niedrigere Werte auf als die Rückstreusignale berechnet nach dem DUBOIS-Modell.

- Zur Gegenüberstellung des modellierten zum gemessenen Rückstreusignals stellt als Input die Bodenfeuchte in der Tiefe 0-4 [cm], die höchste Korrelation dar. Für den Vergleich im April liefert sogar die TDR Technik die höchsten Korrelationen.
- Beim C-Band, für die zwei empirischen Modelle, konnten nur signifikante Korrelationen des modellierten zum gemessenen gleich-polarisierten Rückstreusignals beobachtet werden. Die Korrelation beträgt $r = 0.78$, wobei eine schwache Unterschätzung der Werte auftritt.
- Festgehalten werden kann, daß die modellierten gleich-polarisierten Rückstreusignale, der zwei empirischen Modelle bei Anwesenheit von hohen Bodenfeuchten die Werte der Felder überschätzt (Felder A/2, 8, 9 und 15). Eine Überschätzung der Werte, im geringeren Maße, ruft auch eine erhöhte Rauigkeit auf den Feldern hervor. Bei Betrachtung der Felder, deren modellierten Rückstreusignale unterschätzt worden sind handelt es sich um Felder mit spärlichem Vegetationsaufwuchs. Eine hohe Sensitivität zu den Feldern mit spärlicher Vegetationsbedeckung weist das modellierte kreuz-polarisierte Rückstreusignal auf. Wie durch mehrere Studien bekannt, stellt die Kreuzpolarisation ein Maß für die Volumenstreuung, hervorgerufen durch die Vegetation, und damit für Depolarisationseffekte dar. In diesem Fall wäre zu erwarten gewesen, das die spärliche Vegetation keinen Einfluß auf das L-Band (Wellenlänge 23 [cm]) hat. Schlußfolgernd kann hier festgestellt werden, das die Gültigkeitsbedingungen von $HV/VV < -11$ [dB] von dem DUBOIS-Model zu eng gesetzt worden sind und damit nicht alle Effekte, hervorgerufen von der Vegetation, ausgeschlossen werden können.
- Die gleich-polarisierten Ratios werden von beiden Modellen unterschätzt. Eine Sensitivität ist hier für sehr feuchte und mit vegetationsaufwuchs bestandene Felder zu verzeichnen. Das kreuz-polarisierte Ratio unterschätzt alle Felder mit Vegetationsbedeckung, hier ist die Sensitivität der kreuz-polarisation auf Depolarisationseffekte sehr stark. Zwei Felder mit einer hohen Bodenfeuchte werden überschätzt. Diese Felder liegen Senkrecht zur Antennenblickrichtung, hier liegt die Annahme nahe, das der Einfallswinkel einen Einfluß auf die kohärente Komponente des Radarrückstreusignals, der VV-Polarisation in Richtung des Sensors, aufweist.

7.2.3.3 Invertierung der Oberflächenparameter

Im folgenden sollen nun die wesentlichen Ergebnisse der Inversionsmodelle im Vergleich zu den im Gelände gemessenen Bodenparametern vorgestellt werden. Die detaillierte Vorgehensweise der Invertierung wird in der Diplomarbeit von Thomas Busche beschrieben. Die empirischen Modelle ermöglichen eine Invertierung von zwei oberflächennahen Bodenparametern, der Bodenfeuchte m_v [vol %] und der Rauigkeit k_s [cm], die im folgenden für das C-Band und das L-Band in ihrer jahreszeitlichen Änderung vorgestellt werden sollen. Im August konnten leider die Radar-Daten zur Invertierung des Rückstreusignals für die Felder A5/1-6, aus technischen Gründen nicht berechnet werden.

Vor der Invertierung des normalisierten Rückstreusignals ist nach den Gültigkeitsbedingungen der empirischen Modelle ein ausschließen der Element notwendig, die nicht den Kriterien $HH/VV < 1$ und $HV/VV < -11$ dB entsprechen, wobei die kreuz-polarisierte Bedingung nur beim L-Band angewendet werden konnte. Die E-SAR Konstellationen beim C-Band sind nur HH und VV. Das Ausschließen der für die empirischen Modelle ungültigen Elemente rührt von der Bedingung her, daß die Modelle nur für den Mechanismus der Oberflächenstreuung gültig sind und somit ein ‚filtern‘ der Mehrfach- und Volumenstreuung nötig ist. Die Anwesenheit von Mehrfach- und Volumenstreuung kann hervorgerufen werden durch Vegetation auf den Feldern, durch kleine Autokorrelationslängen und hohe Rauigkeiten sowie durch Depolarisationseffekte im Boden selbst. Diese Mechanismen bedingen die hohe Anzahl der ungültigen Elemente im C- und L-Band, die im April ein ausschließen bis zu 89 [%] und im August bis zu 99 [%] der original Elemente erforderten. Die übrig bleibenden Elemente mit ihrer geringen Anzahl von Pixeln können somit nicht als sehr repräsentativ für statistischen Auswertungen gelten. Dies ist ein Hauptproblem das sich in

dieser Arbeit ergab. Die April-Daten weisen eine bessere statistische Grundlage als die August-Daten auf. Die Hauptgründe für die höhere Anzahl an ausgeschiedenen Elementen im August sind zum einem, der erhöhter Bewuchs auf den Feldern durch die sich in voller blüte befindende Vegetationsperiode und zum anderen die niedrigere Bodenfeuchte sowie erhöhte Oberflächenrauigkeit, die Depolarisationseffekte sowie Mehrfach- und Volumenstreuung hervorrufen.

Feld-Charakteristik		April 1997		August 1997	
Feld-Nr	Original Anzahl der Pixel	Anzahl der ausgeschiedenen Pixel	Anzahl der ausgeschiedenen Pixel in [%]	Anzahl der ausgeschiedenen Pixel	Anzahl der ausgeschiedenen Pixel in [%]
A5/1	164841	42115	25.54	-	-
A5/2	80917	28871	35.67	-	-
A5/3	22702	6516	28.70	-	-
A5/4	59055	47619	80.63	-	-
A5/5	116763	72611	62.18	-	-
A5/6	24707	6063	24.53	-	-
A5/7	21373	18949	88.65	21381	99.88
A5/8	13546	6824	50.37	12633	93.26
A5/9	15536	11172	71.91	15481	99.64
A5/10	9952	2468	24.79	7597	76.33
A5/11	7440	4042	54.32	6832	91.82
A5/12	5030	3685	73.26	3919	77.91
A5/13	6887	4639	67.35	5639	81.87
A5/14	4401	3338	75.84	3035	68.96
A5/15	11551	6748	58.41	9958	86.20
A5/16	21005	9709	46.22	18226	86.76
A5/17	4774	3622	75.86	4569	95.70
A5/18	8216	7056	85.88	8136	99.02

Tab.7.6: Darstellung der ausgeschiedenen Pixel nach den Gültigkeitsbedingungen der empirischen Modelle

Zu beobachten ist, das die Felder mit einer hohen Rauigkeit oder mit Vegetationsaufwuchs auch eine hohe Anzahl von ausgeschiedenen Elementen aufweist, dies ist für die April- wie auch für die August-Daten zu beobachten.

Neben den physikalischen Erklärungen für das oben genannte Problem können aber auch Systemimmanente Schwierigkeiten die Radarbildqualität deutlich verringern. So können fehlerhafte Aufzeichnungen oder Prozessierungsfehler zu solchen Ergebnissen führen. Eine zusätzliche Frage stellt sich inwieweit eine Abhängigkeit in Range zu beobachten ist. Festgestellt wurde, das im Nah-Bereich und im Fern-Bereich eine deutliche und systematische Häufung von ungültigen Elementen zu beobachten ist. Die Gültigkeitsbereiche im Einfallswinkel für die zwei empirischen Modelle liegt zwischen 30° und 60°. Die beprobten Felder liegen in diesem Gültigkeitsrahmen. Die Annahme liegt nun nahe, daß die unzureichende Kalibrierung des E-SAR Systems auch eine Rolle bei der hohen Anzahl der auszuschneidenden Elemente spielt. In der Arbeit von DUBOIS (1995) wird die Rolle der Kalibrierung zur genauen Bodenfeuchte Bestimmung ausgiebig diskutiert. Dabei ist festzustellen, das die Kalibrationsgenauigkeiten des E-SAR mit einer relativen von 3 [dB] und einer absoluten von 0.5 [dB] nicht die vorgeschlagenen Gültigkeiten von einer relativen mit 2 dB und einer absoluten von 0.5 [dB] ganz erreichen.

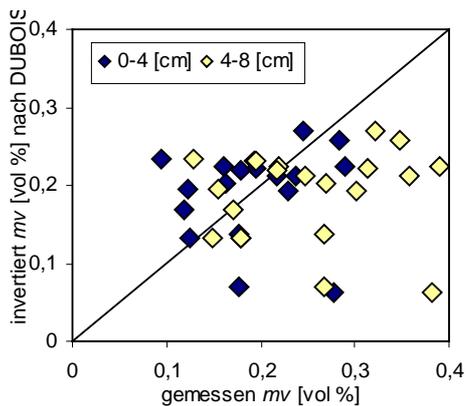


Abbildung 7.15: Bodenfeuchte gemessen versus invertiert für L-Band im April 1997 im Vergleich mit zwei Bodentiefen nach dem DUBOIS-Modell.

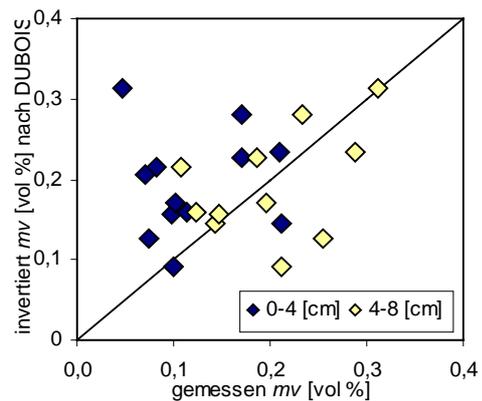


Abbildung 7.16: Bodenfeuchte gemessen versus invertiert für L-Band im August 1997 im Vergleich mit zwei Bodentiefen nach dem DUBOIS-Modell.

Beim Vergleich des invertierten Oberflächenparameter der Bodenfeuchte für das C- und L-Band nach DUBOIS konnte bei einer Bodentiefe von 0 - 4 [cm] ein RMS-Fehler von 7 [vol %] für beide Frequenzen festgestellt werden. Bei einer Bodentiefe von 4 – 8 [cm] wurde beim C-Band ein RMS-Fehler von 8 [vol %] und beim L-Band ein höherer RMS-Fehler 11 [vol %] registriert. Die Werte für die obere Bodenschicht weisen eine höhere Korrelation auf. Die Streuung von der 1:1 Ausgleichsline ist bei beiden Bodentiefen hoch. Die Werte der Bodentiefe 0 – 4 [cm] scheinen dabei eher überbewertet zu werden und die Werte in der tieferen Schicht weisen die Tendenz auf unterbewertet zu werden. Die Über- und Unterbewertung erfolgt vor allem von den Feldern, die nach den Gültigkeitsbedingungen von DUBOIS die Grenze der Bodenfeuchte von 35 [vol %] überschreiten. Im Vergleich zu den Bodenfeuchtwerten im August, liegt der RMS-Fehler tendenziell höher. Den niedrigsten RMS-Fehler weist hier die tiefere Bodenschicht 4 – 8 [cm] von 10 bis 11 [vol %] auf. Dieser jahreszeitliche Unterschied kann mit der Eindringtiefe der elektromagnetischen Welle erklärt werden. Dabei gilt, je trockener der Boden desto tiefer kann die elektromagnetische Welle in den Boden eindringen. Die im Gelände erhobenen Werte für die Bodenfeuchte zeigen deutlich, das im August trockenere klimatische Bedingungen herrschten. Tendentiell sind die invertierten Bodenfeuchtwerte im August überbewerte. Die Überbewertung wird von den sehr trockenen Feldern, die gleichzeitig eine hohe Rauigkeit aufweisen, hervorgerufen. Das Rückstreusignal zeigt, wie schon öfters erwähnt, eine Sensitivität auf hauptsächlich zwei Oberflächenparameter. Bei einem Vergleich mit der im Gelände gemessenen Rauigkeiten fällt auf, das die durchschnittlichen Rauigkeiten im April deutlich geringer sind als im August. Das Modell von DUBOIS gibt an, das bei Vorhandensein von mittlerer bis erhöhter Rauigkeit, die invertierten Bodenfeuchtwerte stark schwanken. Dies erklärt den höheren RMS-Fehler sowie die Überbewertung der invertierten Bodenfeuchtwerte im August. Hervorgehoben werden sollte, das alle Werte, die sich entfernt von der 1:1 Ausgleichsline befinden entweder durch Vegetation oder durch erhöhte Rauigkeiten auf den Feldern sich auszeichnen.

Beim Vergleich des invertierten Oberflächenparameter der Rauigkeit nach DUBOIS für das C- und L-Band kann für die zwei jahreszeitlichen Aufnahmen festgehalten werden, das im C-Band keine Korrelationen mit den im Gelände gemessenen Rauigkeitswerten besteht. Eine erhöhte Korrelation für das L-Band ist im April mit $r = 0.77$ im Gegensatz zum August mit $r = 0.5$ zu beobachten. Die höchsten Schwankungen im April zeigen Felder mit erhöhter Rauigkeit, die Felder A5/18 und 17, und mit spärlichen Vegetationsaufwuchs, die Felder A5/10 und 14. Hervorzuheben ist, das die Felder mit erhöhter Rauigkeit unterbewertet werden und das die Felder mit spärlichem Vegetationsaufwuchs überbewertet werden. Das DUBOIS-Modell räumt ein bei

Anwesenheit von Vegetation die Rauigkeit überzubewerten, dies kann durch die vorgestellten Ergebnisse bestätigt werden. Im August dagegen werden die Felder mit erhöhter Rauigkeit wie auch die Felder mit spärlichem Vegetationsaufwuchs unterbewertet. Bei Betrachtung der erhöhten durchschnittlichen Rauigkeitswerte im August kann festgestellt werden, dass hier der Faktor der Rauigkeit den Einfluß auf das Rückstreusignal zu dominieren scheint.

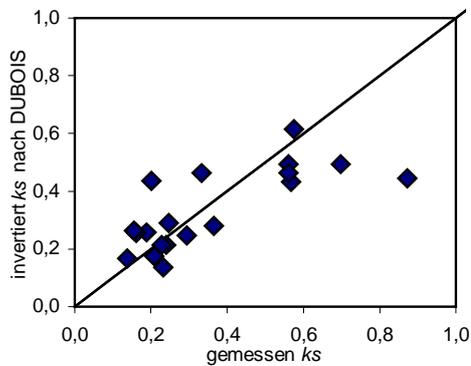


Abbildung 7.17: Rauigkeit gemessen versus invertiert für L-Band im April 1997 nach dem DUBOIS-Modell.

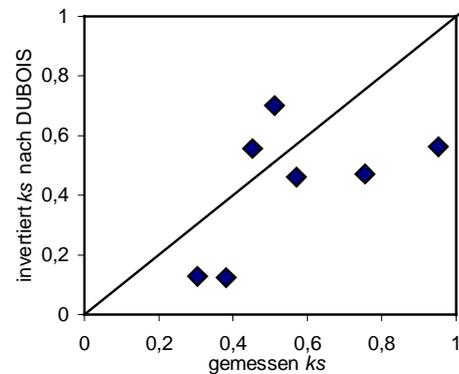


Abbildung 7.18: Rauigkeit gemessen versus invertiert für L-Band im August 1997 nach dem DUBOIS-Modell.

Bei Betrachtung des invertierten Oberflächenparameters der Bodenfeuchte nach dem OH-Modell, wobei nur das L-Band in die Auswertungen mit der Kreuzpolarisation einbezogen werden konnte, zeigt dieses in den zwei Bodentiefen für die zwei Jahreszeiten ähnliche RMS-Fehler auf. Im April weist die Bodentiefe 0 – 4 [cm] einen RMS-Fehler von 7 [vol %] und in der Bodentiefe 4 – 8 [cm] einen RMS-Fehler von 12 [vol %] auf. Die höchsten Schwankungen im April in der Bodentiefe 0 – 4 [cm] verursachen Felder mit spärlichem Vegetationsaufwuchs und mit einer Bodenfeuchte, die die Grenzen der Gültigkeitsbedingungen überschreiten. In der Bodentiefe 4 – 8 [cm] sind es Felder mit einer erhöhten Rauigkeit, Vegetationsaufwuchs und den erhöhten Bodenfeuchten. Auch das OH-Modell zeigt bei Anwesenheit von erhöhter Rauigkeit, Vegetation und erhöhten Bodenfeuchte eine signifikante Unterbewertung der invertierten Werte im April. Im August dagegen bei erheblich geringeren Bodenfeuchtwerten tendiert das OH-Modell die invertierten Bodenfeuchten, wie im April, überzubewerten. Der RMS-Fehler ist in der tieferen Schicht 4 – 8 [cm] mit 9 [vol %] geringer. Bei Betrachtung der einzelnen Werte fällt in der Bodentiefe 0 – 4 [cm] auf, dass die höchsten Abweichungen Richtung Überbewertung von Feldern mit dichter Vegetation verursacht werden. In der tieferen Schicht werden die höchsten Abweichungen durch Felder mit höherer Rauigkeit Richtung Unterbewertung hervorgerufen. Beim OH-Modell ist nicht nur die Rauigkeit der dominierende Faktor zur Überbewertung sondern der Vegetationsaufwuchs scheint hier auch eine gleichwertige Rolle zu spielen.

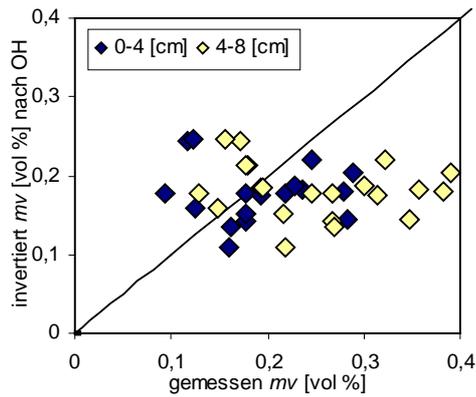


Abbildung 7.19: Bodenfeuchte gemessen versus invertiert für L-Band im April 1997 im Vergleich mit zwei Bodentiefen nach dem OH-Modell.

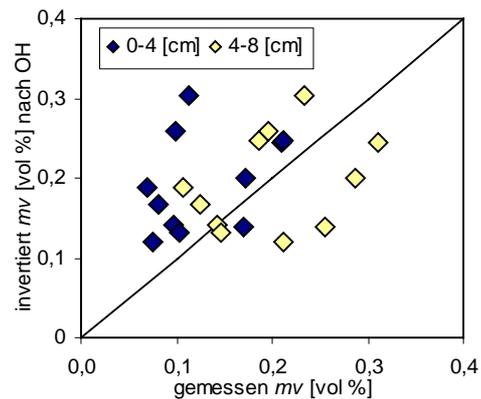


Abbildung 7.20: Bodenfeuchte gemessen versus invertiert für L-Band im August 1997 im Vergleich mit zwei Bodentiefen nach dem OH-Modell.

Bei Betrachtung des invertierten Oberflächenparameter der Rauigkeit nach dem OH-Modell für die zwei Jahreszeiten fällt die geringe Streuung auf. Trotzdem ist keine signifikante Korrelation im April zu verzeichnen. Die August-Daten zeigen eine Korrelation von $r = 0.6$. Eine Überbewertung der Felder mit Vegetationsaufwuchs ist im April zubeobachten; wobei die Felder, die unterbewertet werden vor allem hohe Rauigkeiten aufweisen (Feld A5/17 und 18). Diese Tendenz kann im April auch für das DUBOIS-Modell beobachten werden. Ein Einfluß der Bodenfeuchte auf den Feldern mit starker Streuung für die zwei jahreszeitlichen Aufnahmen ist nicht zu verzeichnen. Festgehalten werden kann, das trotz hoher Rauigkeiten und Vegetationsaufwuchs im August das OH-Modell die Rauigkeit besser erfassen kann als das DUBOIS-Modell. Bei geringeren Rauigkeiten und spärlicher Vegetation, im Fall von April, weist das OH-Modell höhere Schwankungen auf.

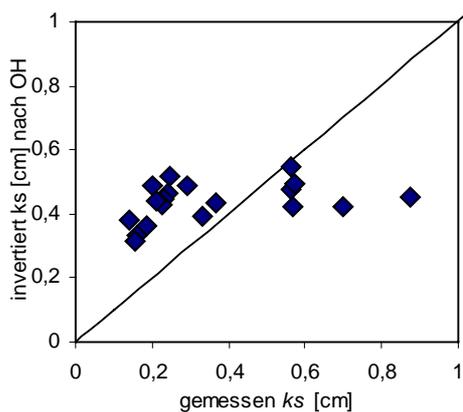


Abbildung 7.21: Rauigkeit gemessen versus invertiert für L-Band im April 1997 nach dem OH-Modell.

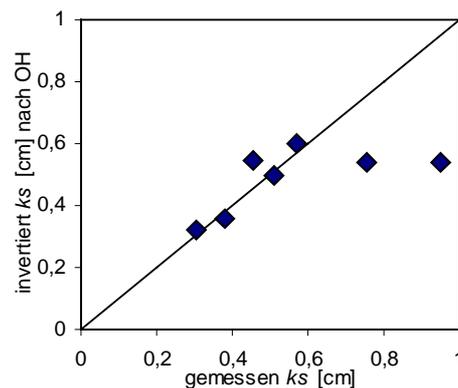


Abbildung 7.22: Rauigkeit gemessen versus invertiert für L-Band im August 1997 nach dem OH-Modell.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, das die zwei empirischen Modelle unterschiedlich auf die jahreszeitlichen Bedingungen reagieren.

- Das DUBOIS-Modell kann trotz sehr trockenerer Bedingungen die Bodenfeuchten der Felder, mit einigen Ausnahmen, erfassen. Diese Ausnahmen bilden vor allem Felder mit hoher Rauigkeit, Vegetationsaufwuchs und die Grenzüberschreitenden Bodenfeuchten. Ein wesentlicher Grund für die

ersten zwei Phänomene sind die unzureichend gesetzten Grenzen zur Ausscheidung der Mehrfach- und Volumenstreuung, $HH/VV < 1$ und $HV/VV < -11$ [dB], die hauptsächlich von der Vegetation verursacht wird. In einigen Studien wird noch ein zusätzlicher Mechanismus für die unzureichende Erfassung der Bodenfeuchte mit dem DUBOIS-Modell genannt. In Hinblick auf die jahreszeitliche Betrachtung und damit auf ein großes Spektrum der zu bestimmenden Bodenfeuchten erwies sich das L-Band im Vergleich zum C-Band als die Wellenlänge mit den geringeren RMS-Fehler. Der Oberflächenparameter der Rauigkeit kann nur hinreichend bei geringen Rauigkeiten, langen Autokorrelationslängen und sehr spärlichen Vegetationsaufwuchs erfaßt werden. Ein Einfluß der Bodenfeuchte auf die Rauigkeitsmessungen ist schwierig zu beurteilen, da die stark streuenden Werte auch hohe sowohl erhöhte Rauigkeiten wie auch erhöhte Bodenfeuchten aufweisen.

- Das OH-Modell dagegen erfaßt die Bodenfeuchten nur mäßig. Bei feuchten Konditionen, im April, werden diese durch Anwesenheit von Rauigkeit, spärlicher Vegetation und Grenzüberschreitenden Bodenfeuchten unterbewertet, dagegen reagiert das Modell mit Überbewertung bei sehr trockenen Konditionen, hohen Rauigkeiten und dichterem Vegetationsbewuchs. Im Unterschied zum DUBOIS-Modell erfaßt das OH-Modell die Rauigkeiten auch bei hohen Rauigkeiten, kurzen Autokorrelationslängen und dichterem Vegetation sehr gut. Wie schon zuvor bei der Korrelationsanalyse beobachtet weist die Kreuzpolarisation eine erhöhte Sensitivität zur Rauigkeit auf. Das OH-Modell berücksichtigt in seinem Algorithmus den kreuz-polarisierten Term und ist damit viel Sensitiver auf den Oberflächenparameter der Rauigkeit. Im August stellt bei den trockenen Konditionen (Bodenfeuchten in der tieferen Schicht bis 31 [vol %]) des Oberbodens die Rauigkeit den dominierenden Faktor im Rückstreusignal dar.
- Der RMS-Fehler der Bodenfeuchte für die zwei jahreszeitlichen Aufnahmen für beide Modelle überschreiten den angegebenen Wert von DUBOIS von 4.5 [vol %] deutlich. Die erhaltenen Werte besitzen einen RMS-Fehler von 7 bis 12 [vol %].
- Aufgrund des Vorhandensein von nur zwei Polarisationen beim C-Band konnte nur der Algorithmus des DUBOIS-Modells angewandt werden. Der Oberflächenparameter der Bodenfeuchte zeigte ein ähnliches Verhalten wie die Frequenz des L-Band, geringe RMS-Fehler bei der Invertierung der Bodenfeuchte. Keine Korrelationen wurden im Vergleich mit dem Oberflächenparameter der Rauigkeit gefunden. Dieses Ergebnis unterstreicht die vorherigen Untersuchungen mit der Korrelationsanalyse. Auch hier wurde eine hohe Sensitivität des gleich-polarisierten Ratios auf die Bodenfeuchte festgestellt. Im speziellen wurden gute Korrelationen in der tieferen Bodenschicht 4 - 8 [cm] festgestellt, diese Ergebnisse können auch bei der Invertierung mit dem DUBOIS-Modell bestätigt werden. Die geringe Sensitivität des DUBOIS-Modells auf die Rauigkeit schlägt sich auch im C-Band durch. Hinzukommt, das die k_s Werte des C-Bandes den Gültigkeitsbereich $k_s < 1$ überschreiten und somit nicht vom DUBOIS-Modell erfaßt werden können.

Diese Ergebnisse müssen vor dem Hintergrund der Anwendung der empirischen Modelle auf die Anzahl der übrig gebliebenen Elemente nach Ausschließen der ungültigen Elemente und deren Repräsentativität sowie deren statistische Stabilität kritisch betrachtet werden. Auch scheint die Frage nach dem Einfluß des Kalibrationsfehlers auf die Genauigkeit der Bodenfeuchtebestimmung nicht geklärt.

Nach Anwendung der Algorithmen der zwei empirischen Oberflächenmodelle können thematische Karten erstellt werden. Hierzu wurde ein Beispiel mit dem L-Band aus dem nördlichen Flugstreifen, der die Testfelder A5/1 bis 6 umfaßt, ausgewählt. Dargestellt wurde der ausgewählte Ausschnitt einmal mit Bodenfeuchte-, AnhangA6, und einmal mit Bodenrauigkeitswerten, AnhangA7. Die Variationen auf den zwei Karten ist relativ gering. Dies liegt daran, das wir es vor allem mit Grünlandflächen zu tun haben, deren Variabilität in der Bodenfeuchte wie in der Rauigkeit gering sind. Es heben sich vor allem landwirtschaftlich genutzte Flächen hervor und Siedlungsbereiche hervor. Ein interessantes Detail kann in AnhangA11 aufgezeigt werden, wo kleinräumige Bodenfeuchteunterschiede aufgezeigt werden können. Hier sind auf einigen Flächen

längliche Strukturen zu erkennen, die einen eindeutigen Feldbearbeitungsursprung haben. Zu vermuten ist, dass es sich hier um Beet- oder auch Dränungsstrukturen handelt, die sich über die Bodenfeuchte abbilden.

7.3 SAR-Interferometrie versus Laser-Scanning-Technik

Hydrologische Modellierung und Hochwasservorhersagen setzen die Kenntnis langjähriger kontinuierlicher Beobachtungen und Dokumentationen des Abflußgeschehens voraus, die durch terrestrische, quantitative-hydrologische Pegelmeßnetze des gewässerkundlichen Meßdienstes gewährleistet werden. Sie stellen nur punktuelle Datenquellen dar, die dem räumlich komplexen Abflußgeschehen nicht vollends gerecht werden können. Nach BROCKMANN (1998) ist die großräumige Erfassung räumlich-hydrologischer Informationen an Fließgewässern zum Aufbau und zur Kalibrierung quantitativer hydrologischer Modelle aus technischer und wirtschaftlicher Sicht nicht zufriedenstellend gelöst. Mit Hilfe hydrologischer Modelle können Wasserspiegel und Wellenabläufe berechnet, Hochwasserschutzanlagen bemessen und Stofftransporte simuliert werden. Dazu werden vor allem geodätische Basisinformationen in Form von digitalen Geländemodellen (DGM) über die Vorlandtopographie, den Wasserspiegel und Wasser-Land-Grenzlinien (WLG) benötigt.

Verwendet werden dazu vor allem digitalisierte Geländemodelle, die nach HOSS (1997) nicht den Genauigkeitsanforderungen zur Kalibrierung quantitativer hydrologischer Modelle genügen. Gegen die Verwendung von digitalisierten Geländemodellen spricht:

- Die Qualität der Höheninformationen ist auch innerhalb der jeweiligen Kartenwerke HFK25 und DGK25 nicht homogen, da während der sehr langen Aufbauzeiträume unterschiedliche Aufnahmemethoden eingesetzt wurden.
- Höhenlinien bilden das Gelände relief mit einer ungünstigen Punktverteilung ab, so daß vorhandene Neigungsänderungen des Geländes z.T. unzureichend repräsentiert werden. Davon betroffen sind vor allem die Neigungsänderungen die parallel zu den Höhenlinien liegen.
- Wegen der meist fehlenden Fortführung ist die Aktualität der analogen damit auch der digitalen Daten nicht gewährleistet.

Nach den Recherchen von BROCKMANN (1998) sollen die interdisziplinären hydrologischen Genauigkeitsanforderungen für ein digitales Geländemodell über dem Vorland bei 4 cm liegen.

Zielgrößen	Vorlandtopographie	Wasserspiegel	Wasser-Land-Grenzlinie
Erfassungsart	Rasterweise, min. 2 m Maschenweite	Rasterweise, min. 10 m Maschenweite	Linienweise, min. 3 m Punktweite
Bezugssystem	Landeskoordinatensystem (Gauß-Krüger oder Normal-Null)		
Anzustrebende absolute Objektpunktunsicherheit ¹ (S = 95 %, u _s = 0 cm)	u _y = u _x = 8 cm, u _H = 4 cm	u _y = u _x = 40 cm, u _H = 4 cm	u _y = u _x = 12 cm, u _H = 4 cm
Ergebnisdarstellung	DHM	DWM	3 D- Linie

¹ $u = u_z + u_s$ (nach DIN 1319 1983/85)

u = Ergebnisunsicherheit

u_z = Zufallskomponente

u_s = Systematikkomponente

S = Sicherheitswahrscheinlichkeit

In der Literatur gehen die Definitionen zur Nomenklatur verschiedenster digitaler Höhenmodelle oft stark auseinander. Der Begriff des digitalen Höhenmodells (DHM) soll im folgenden als Oberbegriff aller digitalen Modelle dienen, die die Höheninformation jeglicher Objekte zum Inhalt haben. Für den Begriff des digitalen Geländemodells (DGM) gilt die Definition nach AdV(1989): "Im digitalen Geländemodell (DGM) wird das

Relief durch eine rasterförmig oder linienförmig angeordnete, nach Lagekoordinaten, Höhenwerten und geomorphologischen Informationen bestimmte Punktmenge nachgebildet, die die Geländeoberfläche in der gewünschten Genauigkeit und Annäherung beschreibt." Es handelt sich also um ein dreidimensionales digitales Modell, das nur die topographische Erdoberfläche durch x,y,z-Koordinaten beschreibt, also ohne jegliche Zusatzhöhenobjekte wie Häuser, Wald usw.. Die Bezeichnung des digitalen Oberflächenmodells (DOM) beinhaltet die x,y,z-Koordinaten der Geländepunkte und der Oberfläche sämtlicher naturräumlicher und anthropogener Objekte, die noch Kontakt mit der Erdoberfläche haben und sich dem Betrachter bei Überflug zeigen. Dieser Begriff weist jedoch eine gewisse Unschärfe auf, da die Oberfläche eines Objektes von der Größenordnung der Betrachtung und damit z.B. bei elektromagnetischen Sensoren von der Wellenlänge des Systems abhängt.

Im Gegensatz zu den vielfach aufwendigeren Punktmessungen mit einem differentiellen Global Position System (DGPS) stellt die Fernerkundung mit zunehmenden effizienteren, aktuellen, sowie kostengünstigeren und höher auflösenden Flugzeug Aufnahme-Sensoren ein vielversprechendes alternatives Instrumentarium dar. In der Fernerkundung kommen vor allem die optischen Aufnahmesysteme, Photogrammetrische Stereoauswertung und Laser-Scanning-Technik und das interferometrische SAR-System zur Anwendung.

Die photogrammetrische Stereoauswertung optischer Aufnahmen ist das traditionelle Verfahren zur Erstellung von digitalen Höhenmodellen in der Fernerkundung. Hierbei werden Senkrechtluftbilder mit 70-prozentiger Längs- und 30-prozentiger Querüberdeckung auf schwarz-weißem Filmmaterial angefertigt. Die Automatisierung der Arbeitsabläufe stellt in der photogrammetrischen Stereoauswertung eine große Herausforderung dar und konnte bis heute noch nicht zufriedenstellend gelöst werden. Der hohe zeitliche Aufwand, selbst bei einer fast automatisierten Prozedur, und Einschränkungen in der Qualität, hervorgerufen durch ein stark reliefiertes Terrain, Änderungen in der Vegetation, dicht bewaldete und bewachsene sowie große Wasserflächen, erfordern die Entwicklung anderer Techniken zur Generierung von digitalen Höhenmodellen (KERSTEN & HÄRING 1997).

Im folgendem, werden die Vor- und Nachteile der SAR-Interferometrie im Gegensatz zu dem neuesten und in der Höhengauflösung genaueren optischen Verfahren der Laser-Scanner Methode abgewogen.

7.3.1 Verfahren der SAR-Interferometrie

Im Kapitel 2.2 wurde die Theorie der SAR-Interferometrie erläutert. In diesem Kapitel werden die Vor- und Nachteile der Flugzeug SAR-Interferometrie diskutiert.

Das Verfahren der SAR-Interferometrie gewann in den letzten Jahren durch zunehmende Operationalisierung und steigende Höhengenaugkeit in der Erstellung von digitalen Oberflächenmodellen (DOM) immer mehr an Bedeutung. Das Prinzip der SAR-Interferometrie beruht auf der kohärenten Verarbeitung zweier SAR-Aufnahmen, die aus unterschiedlichen Positionen mittels zweier Radarsensoren aufgenommen werden. Die Differenz der Abstände zwischen den beiden Sensoren und der abgebildeten Oberfläche werden durch die Phasendifferenz der beiden Aufnahmen gemessen. Aus dieser wird mittels Triangulation die Oberflächenhöhe bestimmt. Der Vorteil der SAR-Interferometrie gegenüber konventionellen Triangulationsverfahren liegt in der Tatsache, daß die Differenz der Abstände über einer Phasenmessung ermittelt wird und dadurch mit einer Genauigkeit in der Größenordnung von Bruchteilen der verwendeten Wellenlänge gemessen werden kann. Das Endprodukt ist ein digitales Oberflächenmodell (DOM).

Ein weitere Vorteil zu den klassischen optischen Geländehöhenaufnahmen ist die Wetter- und jahreszeitliche Unabhängigkeit vom Aufnahmezeitpunkt, sowie seine hohe Flächenleistung, das je nach Modi Streifenbreiten von mehreren Kilometern aufweisen kann. Das gesamte Produktionsverfahren, von der Aufnahme der Daten

bis zum Endprodukt, ist heute operationalisierbar, das heißt es sind keine manuellen Bearbeitungsschritte nötig. Dies garantiert eine konstante Qualität, schnelle Lieferleistung und geringe Kosten.

Die Verschneidung von mehreren Flugstreifen ist ohne Verzerrungen am Bildrand möglich. Nach einer automatischen Radiometrischen- und lokalen Einfallswinkelkorrektur kann ein Mosaikung (Verschneidung) stattfinden.

Die Genauigkeiten des gewonnenen DOM wird aus dem Vergleich mit unabhängigen Messungen (DGPS, Photogrammetrie) ermittelt. Die absoluten Höhengenaugkeiten variieren vom System, können heute aber mit einer Standardabweichung von bis zu 2 m angegeben werden. Die absolute Höhengenaugkeit ist im Bereich von Dezimeter bis Metern anzusiedeln. Die flächenhafte Vermessung eines Reliefs mit der SAR-Interferometrie kann im unteren Skalenbereich nie die Genauigkeit einer Einzelpunktmessung durch die Tachymetrie oder DGPS erreichen. Technische Limitierungen, die Genauigkeit der Phasenmessungen und die Positionsbestimmungen einschränken, können durch die Aufnahmegeometrie nicht ganz kompensiert werden, so daß eine Genauigkeit im Zentimeter Bereich nicht unterschritten werden kann.

Als Nebenprodukt, gleichzeitig zu den SAR-Interferometrischen Informationen, können auch Information aus den Amplituden- und Kohärenzbildern erhoben werden. Die Amplituden-Daten liefern Informationen über die Rückstreucharakteristik der beleuchteten Objekte. Die Kohärenz liefert Information über die räumliche Struktur der beleuchteten Objekte und im Fall der *repeat-pass* Konstellation, über ihre zeitliche Veränderungen von Objekten Änderungen der Bodenfeuchte, des Wachstums, und der Bewegung detektiert und kartiert werden.

Die Generierung eines digitalen Geländemodells (DGM) aus SAR-Interferometrischen Messungen ist heute noch im experimentellen Stadium und entspricht nicht den interdisziplinären Genauigkeitsanforderungen. Die hohe Nachfrage nach sehr genauen digitalen Geländemodellen regt die Forschung nach technischen und wissenschaftlichen optimalen Verfahren an. So finden Versuche, zusätzlich zur interferometrischen Phase, mit Amplituden- und Kohärenzinformation statt, die mit Hilfe einer automatischen flächenhaften Klassifikation und Interpolation die Geländehöhen ermitteln können. Die Genauigkeitsangaben entsprechen hier einer Kartendarstellung von 1:25 000 (SCHMIEDER 1997). Andere Arbeiten widmen sich längeren Wellenlängen zu, dessen höhere Eindringtiefe die Extraktion der Höheninformation auch unter Waldbewuchs ermöglichen sollen. Mit der zur Hilfenahme zweier Wellenlängen, einer kurzen und einer langen, kann durch die Subtraktion der Phasenbilder ebenfalls auf die Geländehöhe geschlossen werden (ULBRICHT & REIGBER 1999, SCWÄBISCH et al. 1999). Eine sehr neue und zukunftsweisende Technik zur Extraktion von Geländehöhen und Geländeobjekten stellt die Polarimetrische SAR Interferometrie dar. Mit dieser Technik ist es möglich die charakteristischen Streumechnismen des beleuchteten Mediums zu lokalisieren und dreidimensional darzustellen. So können Geländeobjekte extrahiert werden ohne das Informationen über die darunterliegende Topographie verloren gehen (PAPATHANASSIOU 1999, TREUHAFI et al. 1996, TREUHAFI & SEQUEIRA 2000). Eine weitere vielversprechende Technik stellt die SAR Tomographie dar, die sich zwar zu diesem Zeitpunkt noch in einer Anfangsphase befindet, jedoch eine vollständige dreidimensionale Aufnahme ermöglicht (REIGBER 1999).

Die Nachteile beim Verfahren der SAR-Interferometrie äußern sich in

- der Erstellung eines genauen DOM und nicht wie von interdisziplinärer Sicht gefordert eines DGM.
- der stark reliefierten Topographie mit Schatten- und Layoverbereichen aufgrund der Besonderheiten der SAR-Aufzeichnungsgeometrie. Dies bringt eine spezielle Art von Artefakten in das DOM, die nur mit großem Aufwand kompensiert werden können.

- der Einschränkung der eindeutigen Trennung von Signalen, die an der Oberfläche oder, nach den Eigenschaften der elektromagnetischen Welle, tiefer eindringend in das beleuchtete Medium, zurückgestreut werden.
- der Notwendigkeit mindestens einen exakt vermessenen Paßpunkt zu besitzen, um die hohe Genauigkeit des DOM zu gewährleisten. Als Paßpunkt wird ein genau einjustierter und vermessener Winkelspiegel (Korner Reflektor) am Boden verwendet, der im SAR Bild durch seine maximale Rückstreuung gut ersichtlich ist.

7.3.2 Verfahren der Laser-Scanner Messung

Die Laser-Scanner Messung ist ein flugzeuggestütztes Verfahren zur Relieferfassung. Der Laserstrahl wird durch den Scanner quer zur Flugrichtung abgelenkt somit kann ein Geländestreifen entlang des Flugweges abgetastet werden.

Die Laser-Scanner Messung basiert auf einem Multisensorsystem mit folgenden Hauptkomponenten: Laserdistanzmesser mit Scanvorrichtung, GPS-Empfänger und Inertiales Navigationssystem (INS). Meist speichert ein Bordcomputer die Daten zeitsynchron ab. Eine zusätzliche integrierte Videokamera dient der Visualisierung des Meßgebiets. Die Entfernung zur Erdoberfläche wird über Laufzeitmessungen ermittelt. Die äußere Orientierung des Systems, das heißt die Position und die Lage des Sensors im Raum, errechnet sich aus GPS- und INS-Beobachtungen. Zusammen mit den Scanner-Winkelmessungen läßt sich für jeden Reflexionspunkt des Laserimpulses auf der Erdoberfläche die genaue Lage im Raum (3D) ableiten.

Die Reflexion des Laserstrahls erfolgt in der Regel diffus, das heißt der Laserstrahl wird nicht gerichtet, sondern über den Raum verteilt zurückgestrahlt, und ist abhängig von der jeweiligen Oberfläche. Die Reflektivität natürlicher Oberflächen variiert von 10 [%] bis 20 [%] für Sand, über 30 [%] bis 50 [%] für Vegetation und zu 50 [%] bis 80 [%] für Eis und Schnee. Die Reflektivität der Zieloberfläche beeinflusst dadurch die Reichweite des Laserdistanzmessers. Für Flächen mit geringer Reflektivität nimmt die Reichweite ab, für Flächen mit höherer Reflektivität nimmt die Reichweite zu. Mit Hilfe der Laufzeitmessung können Mehrfachreflexionen unterschieden werden in die erste oder letzte Reflexion. Die letzte Reflexion einer definierten Oberfläche hat die höchste Wahrscheinlichkeit, eine Bodenreflexion zu sein, kann aber bei dichter Vegetation auch innerhalb der Vegetationsschichten liegen.

Das Verhältnis zwischen der Anzahl von Punkten auf dem Waldboden und der Gesamtanzahl gemessener Punkte wird als Durchdringungsrate bezeichnet. Die Durchdringungsrate für Nadelwald liegen bei 31 [%] und für Mischwald bei 64 [%] (HOSS 1997). Eine unzureichende Durchdringungsrate weisen junge Nadelwaldschonungen auf. Die Dichte und die Verteilung der Laserpunkte auf der Erdoberfläche sind variabel einstellbar. Sie werden durch die Systemparameter Meßrate, Scanwinkel und Scanfrequenz bestimmt. Sehr dichte Profile ergeben sich bei einer Scanfrequenz von 1 Hz. Die Streifenbreite ist eine Funktion von Scanwinkel und Flughöhe über Grund. Mit der maximalen Reichweite von 1000 [m] und dem maximalen Scanwinkel von $\pm 20^\circ$ ergibt sich eine maximale Streifenbreite von 730 [m] und ein Abstand der Punkte < 30 [cm].

Die überwiegenden computerbasierten Bearbeitungsschritte der gewonnenen Daten lassen sich in Vorbereitung, GPS-Auswertung, Systemkalibrierung, Berechnung der Koordinaten aller Laserpunkte im Landessystem und automatische Klassifizierung der Laserpunkte unterscheiden.

Die Genauigkeit der Laser-Scanner Messungen wird aus einem Vergleich der Laser-Scanner Punkte mit einem aus unabhängigen Messungen (Tachymetrie, DGPS, Photogrammetrie) abgeleitetes Kontroll-DHM ermittelt.

Mit dem heutigen Stand des Auswerteverfahrens kann die Höhengenaugigkeit der Laserpunkte mit einer Standartabweichung von < 15 cm angegeben werden (BROCKMANN 1997, HOSS 1997, WEVER 1999).

Die Nachteile des Laser-Scanner Verfahrens äußern sich in

- der Wetterabhängigkeit, so können keine Messungen bei Bewölkung bei Regen und Schnee durchgeführt werden. Sogar Schwankungen in der Luftfeuchtigkeit verursachen Schwankungen in den Meßergebnissen. Daraus ergibt sich, daß Meßkampagnen nur in geringen Höhen durchgeführt werden können. Dies wiederum bewirkt, daß nur ein kleiner Flugstreifen aufgenommen werden kann.
- der nicht ausreichend erfaßbaren Geländestrukturen (z.B. Böschungskanten, Geripplinien, Kuppen usw.).
- der nicht möglichen Durchdringung eines dicht bewachsenen Waldgebietes (z.B. Nadelwaldschonungen). Zur Genauigkeitssteigerung wird eine Befliegung außerhalb der Vegetationsperiode empfohlen.
- der schwachen Reflexion von bestimmten Oberflächen (z.B. Wasser, Asphalt).
- dem schwer zu trennenden Prozess zwischen Boden- und Vegetationsreflexionen.
- der schwierigen Verschneidung von mehreren Flugstreifen, da hohe Verzerrungen am Bildrand (Bidirektionale Reflexionseffekte) auftreten und diese nicht immer exakt korrigiert werden können.
- der Empfehlung eine zusätzliche flugstreifenorientierte Videoaufzeichnung durchzuführen.

7.3.3 Verfahrensgegenüberstellung

Bevor ein Verfahrensvergleich statt findet sollte erwähnt werden, das die Entwicklung der Technik im Bereich des Laser-Scanner Systeme zwei bis drei Jahre vor der Entwicklung der SAR-Interferometrie begann und damit einen Zeitvorsprung in der Entwicklung aufweist. Nach BROCKMANN (1998) stellt die Laser Technik gegenüber der SAR-Interferometrie ein genaueres, zuverlässigeres und wirtschaftlicheres Verfahren zur Erstellung hochauflösender digitaler Höhenmodelle von Flußvorlandbereichen dar. Mit der Technik des Laser-Scanner Systems sind Ergebnisunsicherheiten für DHM Höhen von $u_H = 15$ [cm] bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit $S = 95$ [%] einhaltbar, wobei diese Genauigkeiten nur bei flachen und ebenen Gelände erreicht werden können. Er führt ein Vergleich zwischen dem Laser-Scanner System Optech ALTM 1020 und dem Flugzeuggestütztem Interferometrischen SAR System AeS-1 durch:

Erreichbare Höhengenaugigkeiten	Laser-Scanner	SAR-Interferometrie
- bei flachen bis wenig geneigtem Gelände und geringen Bewuchs	15 [cm]	20 [cm]
- stark geneigtes Gelände	55 [cm]	20 [cm]
- flach mit dichtem Bodenbewuchs	40 [cm]	20 [cm]
- Wasserspiegel	20 [cm]	20 [cm]
Technische Daten		
Flughöhe	900 [m]	3100 [m]
Streifenbreite	350 [m]	2000 [m]
Streifenlänge	100 [m]	500 [m]
Raster	2.3 x 2.3 [m]	2 x 2 [m]

Die Überlegenheit in der Genauigkeit der Höhe und in der Auflösung des Laser-Scanner Systems gegenüber der SAR-Interferometrie kann durch technische Überlegenheit kompensiert werden. Die vielfach flexiblere SAR-Interferometrie mit der Unabhängigkeit der Wetterlage sowie einer vielfachen höheren Flächen- und somit kostengünstigeren Leistung ist ein zukunftsfähiges System deren erreichbare Höhengenaugigkeiten mit der Verbesserung der Technik steigen. Steigende Genauigkeiten in der Höhengenaugigkeit, die im Dezimeter-

Bereich liegen, wurden zum jetzigen Zeitpunkt mit Flugzeugsensoren in Europa schon bestätigt. Neben dem SAR-Interferometrischen Produkt können gleichzeitig Informationen in Form von Amplituden- und Kohärenzbildern gewonnen werden.

7.3.4 Entwicklung der SAR-Interferometrie am Beispiel des ESAR (DLR)

Die Entwicklung und Operationalisierung der SAR-Interferometrie bei der DLR begann vor drei Jahren, fast gleichzeitig mit dem Beginn des Pilotprojektes an der unteren Mittelelbe 1997. Das E-SAR System ist an einer Do-228 angebracht und operiert im X-band in einem *single-pass across-track* Mode, das heißt die Antennen sind übereinander am Flugzeug montiert und benötigen nur einem Überflug, um die gewünschten zwei Aufnahmen zu erhalten, aus denen dann das DOM berechnet wird. Die detaillierte Konfiguration des SAR-Interferometers wird im Kapitel XXX beschrieben.

Zum Zeitpunkt der ersten Befliegung im April 1997 konnten aus technischen Gründen die DGPS Daten nicht mit den Daten des Flugführungssystem verschnitten werden. Eine exakte Positionsbestimmung der Flugrute war aus diesem Grund nicht möglich. Das Ergebnis zeigte ein Höhenbild in *slant-range*, das in keinem Koordinatensystem eingebunden war und absolute Höhengenaugkeiten von 8 [m] bis 10 [m] aufwies. Zusätzlich wies das Höhenbild Streifenmodulationen auf, die nicht korrigiert werden konnten. Trotz dieser technischen Schwierigkeiten konnte im ersten Schritt gezeigt werden, daß aus Phaseninformationen Höhen in Metern gewonnen werden können. Die Höheninformationen aus der SAR-Interferometrie zeigte erste erstaunliche Übereinstimmungen mit den Geländemessungen, die aber nur lokal an einigen Stellen bestätigt werden konnten. Am Beispiel einer Rinne im Areal 1 (Rückdeichungsbereich) konnten Schwankungen zwischen dem aus der SAR-Interferometrie und den Geländemessungen gewonnenen Höhen zwischen 3 [cm] bis 50 [cm] beobachtet werden.

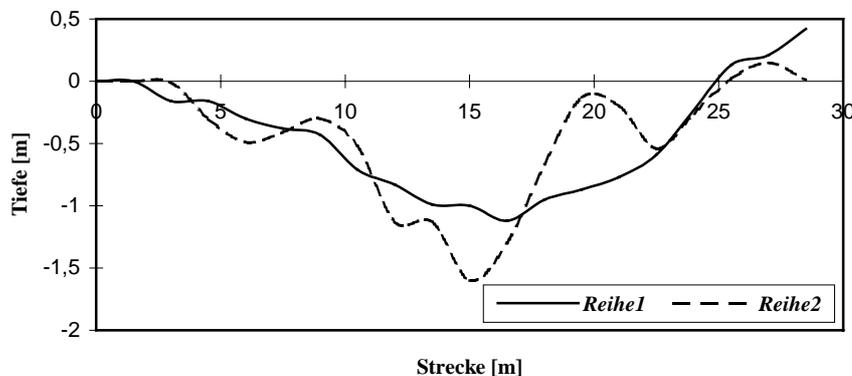


Abbildung 7.23 : Vergleich zwischen den Höhen gewonnen aus der SAR-Interferometrie und den Geländemessungen. (Reihe1=Phasenbild, Reihe2=insitu-Messungen)

Aufgrund Systembedingter Schwierigkeiten und den daraus resultierender Höhenungenauigkeiten erfolgten keine weiteren Auswertungen.

Die zweiten Flugkampagne im August 1997 wurde mit einen neuen Flugführungssystem durchgeführt. Dieses ermöglichte eine höhere Genauigkeit in der Positionsbestimmung, doch erwies es sich als ein unausgereiftes System, welches noch technischen Verbesserungen in der Hardware bedurfte. Jedoch, anders als bei der ersten Kampagne, konnten die im Gelände erhobenen DGPS Daten als Referenzpunkte mit dem Flugsystem verschnitten werden. Trotz dieser technischen Verbesserungen traten nicht lokalisierbare Störungen im Phasenbild auf, die erhebliche Mängel in der Höhengenaugkeit auslösten. Die leichten Höhenunterschiede, die im April im Areal 1 beobachtet wurden, konnten mit dem zweiten Überflug nicht registriert werden. Der

gesamte Rückdeichungsbereich erschien als ebene Fläche. Die absolute Höhengenaugigkeit betrug 5 [m] bis 8 [m]. Auch hier erfolgten, aufgrund der nicht ausreichenden Höhengenaugigkeit, keine weiteren Auswertungen.

Bis zum heutigen Zeitpunkt fanden erhebliche Verbesserungen des Interferometrischen Systems statt, die sich auf ein ausgereifteres Hardwareprogramm zur Flugroutenbestimmung stützt. Hinzu kamen erhebliche technische Hardware Verbesserungen zur Lokalisierung des empfangenen Signals, wie z.B. verbessertes Chirp-Signal, interne Vermessung des Delay, exakte Bestimmung der Baseline. Eine weitere Verbesserung der Datenakquisition wurde mit dem besseren Verständnis des aussenden und empfangen eines Signales erreicht. So hat sich der *single baseline* Modus, Senden mit einer Antenne und Empfangen mit der anderen, als sensitivere Methode erwiesen. Dies hat eine höhere Genauigkeit und eine verbesserte Aufnahme vor allem von scharfen Bildübergängen (Wald und Häuser) zur Folge. Mit dieser neuen technischen Konstellation ist es heute möglich bei Single-Look Bildern eine absolute Genauigkeit von 2 [m] und eine relative von 0.5 [m] zu erreichen. Wobei mit einer Standartabweichung von < 2 [m] zu rechnen ist. Bei Multi-Look Daten verbessert sich die absolute Genauigkeit. Eine E-SAR Szene von 25 [m²] kann in 8 Stunden voll operationel prozessiert werden und wird als geokodiertes Produkt (UTM-Koordinatensystem) ausgegeben. An einer automatischen DOM Ausgabe im Gauß-Krüger System wird zur Zeit gearbeitet und ist in naher Zukunft zu erwarten.

8 Zusammenfassung

Die flugzeug- und satellitengestützte Fernerkundung der Erde stellt seit vielen Jahren eine anerkannte und vielgenutzte Informationsquelle für kartographische, geodätische und geowissenschaftliche Fragestellungen dar, die auch bereits früh zur aktuellen und großräumigen Erfassung von Umweltveränderungen genutzt wurde. Die Fernerkundung ermöglicht die Abbildung und Untersuchung von der Erdoberfläche und Atmosphäre in Abhängigkeit vom Reflexions- und Absorptionsspektrum der interessierenden Objekte in verschiedener räumlicher, zeitlicher und spektraler Auflösung sowie mit unterschiedlicher radiometrischer Empfindlichkeit. Die flugzeuggestützte Radarfernerkundung ist ein relativ neues Werkzeug zur Beschreibung der Topographie, zur Vegetations- und Landnutzungskartierung und Erfassung von geophysikalischen Oberflächenparametern.

Das Ziel des Pilotprojektes „Pilotstudie Radarbefliegung“, war die Möglichkeiten und Grenzen der Radarfernerkundung aufzuzeigen. Mit Hilfe des multifrequenten, polarisierten, interferometrischen und flugzeuggetragenen Radarsensors wurden drei Untersuchungsschwerpunkte zu zwei unterschiedlichen Jahreszeiten, April und August 1997, eingehend bearbeitet. Die Untersuchungsschwerpunkte lagen in den drei Themenbereichen Klassifizierung, Modellierung und Invertierung vom Radarrückstreusignal und SAR-Interferometrie. Die drei Themenbereiche wurden hinsichtlich der folgender Fragestellung bearbeitet:

- Können Radarsensoren zur Vegetations- und Landnutzungskartierung herangezogen werden ?
- Ist die Invertierung von geophysikalischen Oberflächenparametern aus Radarsensoren möglich ?
- Stellt die Interferometrie ein gleichwertiges Werkzeug zur Erfassung von kleinräumlichen topographischen Höhenunterschieden dar ?

Zur Validierung der Ergebnisse wurden zeitgleich zum Radarüberflug Geländemessungen und -kartierungen im Untersuchungsgebiet durchgeführt, die zu Genauigkeitsanalysen herangezogen worden sind.

Die Ergebnisse dieses Pilotprojektes in den drei Themenbereichen werden im folgenden zusammenfassend dargestellt.

8.1 Vegetations- und Landnutzungsklassifikation

Die Klassifizierung von Fernerkundungsdaten nach interessierenden Zielobjekten ist eines der wichtigsten Anwendungsgebiete vielkanaliger Fernerkundungsdaten. Zur Vegetations- und Landnutzungsklassifikation im Pilotprojekt ergaben sich drei Untersuchungsschwerpunkte:

1. Der erste Schwerpunkt lag in der Auswahl eines geeigneten Bildverarbeitungsverfahrens, um den radarspezifischen *Speckle*-Effekt so weit wie möglich zu reduzieren und ohne dabei die geometrische Auflösung zu verringern. Hier konnte gezeigt werden, dass eine kombinierte Vorgehensweise aus zwei Filtermethoden und einer Hauptachsentransformation, die genauesten Klassifikationsergebnisse lieferte. Die Datenvorverarbeitung stellt die Grundlage für eine gute und genaue Trennbarkeit von Objektklassen dar und wurde aus diesem Grund intensiver bearbeitet.
2. Der zweite Schwerpunkt lag in der Auswahl eines geeigneten Klassifikationsverfahrens zu bestmöglicher Trennung von Objektklassen. Von den zwei untersuchten Klassifikationsverfahren, der textur- und pixelbasierten, hat sich die pixelbasierte Klassifikationsmethode als die mit den eindeutigeren trennbaren Klassen herausgestellt. Innerhalb der pixelbasierten Klassifikation konnten die besten Ergebnisse mit einer hybriden Vorgehensweise, einer Kombination zwischen einer unüberwachten und überwachten Klassifizierung, erzielt werden. Hierbei fand mit dem unüberwachten Klassifizierungsalgorithmus, ISOCLUS, die Traininggebietssauswahl statt, die dann Eingang in die überwachte Klassifizierung, Maximum-Likelihood (ML), hatte. Die Genauigkeitsanalysen der Klassifikation fanden mit der Confusionsmatrix und dem Scatterplot statt. Aus dem umfangreichen Datensatz wurden drei Gebietsausschnitte ausgewählt, an denen, die Klassifikationsvorgehensweise erläutert und deren Ergebnisse interpretiert worden sind. Zu den drei ausgewählten Gebieten gehört das Naturschutzgebiet Garbe, der Lütckenwischer Aussendeichbereich und der Lenzener Rückdeichungsbereich. Die Klassifikationsgenauigkeit der drei Gebiete reicht für die Garbe von 93 [%], für den Lütckenwischer Aussendeichbereich über 94 [%] und für den Lenzener Rückdeichungsbereich zu 66 [%] hin. Für alle drei Gebietsausschnitte konnten folgende Objektklassen getrennt werden: Wasserflächen und Wasserläufe, Grünlandflächen, Ackerflächen und Waldbereiche. Die eindeutigste Trennung, aufgrund der sehr hohen oder sehr niedrigen Varianz der Rückstreusignale, konnte von Wasserflächen und Waldbereichen erfolgen. Die niedrige Varianz ist das Ergebnis einer geringen Rückstreuung bei der Reaktion der elektromagnetischen Wellen mit dem beleuchteten Objekt, die hervorgerufen wird durch den höheren Anteil an Vorwärtsstreuung. Die hohe Varianz wird hervorgerufen durch die Viel- bis Mehrfachstreuung des beleuchteten Objektes, die zu einer erhöhten Rückstreuung zum Sensor führt. Die Trennung von Grünlandklassen und Ackerflächen ist dagegen etwas schwieriger. Es konnten zwar zahlreiche Objektklassen gebildet werden, jedoch war nicht eindeutig bestimmbar welcher Objektparameter, Dielektrizitätskonstante oder geometrische Eigenschaften, der Bodenbedeckung die dominante Charakteristik für die Klassenzuweisung war.
3. Der dritte Untersuchungsschwerpunkt lag in der Eignung von SAR-Bilddaten zur Objektklassifizierung und deren Genauigkeit im Vergleich zu den Geländedaten. Die Vegetations- und Landnutzungsklassifizierung mit SAR-Bilddaten ist möglich. Mit einem statistischen Klassifikationsverfahren konnten Objektklassen voneinander getrennt werden, jedoch ist die physikalische Interpretation der Objektklasse nicht eindeutig. Dazu sollte ein Klassifikationsverfahren, das die physikalischen Beziehungen zwischen der elektromagnetischen Welle und dem beleuchteten Objekt und damit die Streumechanismen berücksichtigt, verwendet werden. Diese Ansätze sind jedoch noch in der Entwicklung, doch zeigen erste Versuche vielversprechende Ergebnisse.

8.2 Modellierung und Invertierung von Oberflächenparametern

Die Abhängigkeiten des Rückstreuquerschnittes von den drei Hauptparametern Oberflächenrauigkeit, Autokorrelationslänge (ks und kl) und relativen Dielektrizitätskonstante (ϵ') ermöglichen mit Hilfe von Modellen eine Invertierung dieser Parameter. Die Modelle weisen unterschiedliche Möglichkeiten auf diese Parameter zu extrahieren und werden in der Literatur kontrovers diskutiert. Die Vielzahl der komplex ineinanderwirkenden Einflußparameter erschweren die Erfassung der Zusammenhänge in einfachen und anwendbaren Modellen, so wurden mehrskalige komplexe Rauigkeitsmodelle entwickelt, deren Anzahl der statistischen Inputparameter die Anzahl der Outputparameter bis um ein neunfaches Übersteigen können. Die Anwendbarkeit solcher Modelle ist nur mit a priori Wissen über das betrachtete Medium möglich, welches ein unabhängiges und objektives Modellieren erschweren und nicht zur automatischen Bestimmung der Bodenparameter dienlich ist. Allen Modellen ist gemeinsam, das sie sehr große Abweichungen in der Genauigkeit bei der Validierung aufzeigen.

Zur Anwendung sind zwei einfache und vielversprechende Modelle, ein semi-empirisches und ein empirisches, Modell von OH et al. (1992) und DUBOIS et al. (1995) gekommen. Die empirischen Modelle ermöglichen eine Invertierung von zwei oberflächennahen Bodenparametern, der Bodenfeuchte m_v [vol %] und der Rauigkeit ks [cm], die für das C-Band und das L-Band in ihrer jahreszeitlichen Änderung bearbeitet wurden. Für die zwei jahreszeitlichen Aufnahmen wurden 18 Ackerflächen beprobt und untersucht, deren Messungen als Vergleich zur Invertierung des Rückstreusignals dienen.

Vor der Invertierung des normalisierten Rückstreusignals ist nach den Gültigkeitsbedingungen der empirischen Modelle ein ausschließen der Elemente notwendig, die nicht den Kriterien $HH/VV < 1$ und $HV/VV < -11$ dB entsprechen, wobei die kreuz-polarisierte Bedingung nur beim L-Band angewendet werden konnte. Die E-SAR Konstellationen beim C-Band sind gleich-polarisierte, HH und VV. Das Ausschließen der für die empirischen Modelle ungültigen Elemente rührt von der Bedingung her, daß die Modelle nur für den Mechanismus der Oberflächenstreuung gültig sind und somit ein ‚filtern‘ der Mehrfach- und Volumenstreuung nötig ist. Die Anwesenheit von Mehrfach- und Volumenstreuung kann hervorgerufen werden durch Vegetation auf den Feldern, durch kleine Autokorrelationslängen und hohe Rauigkeiten sowie durch Depolarisationseffekte im Boden selbst. Diese Mechanismen bedingen die hohe Anzahl der ungültigen Elemente im C- und L-Band, die im April ein ausschließen bis zu 89 [%] und im August bis zu 99 [%] der original Elemente erforderten. Die übrig bleibenden Elemente mit ihrer geringen Anzahl von Pixeln können somit nicht als repräsentativ für statistischen Auswertungen gelten. Dies ist ein Hauptproblem das sich in dieser Arbeit ergab. Die April-Daten weisen eine bessere statistische Grundlage als die August-Daten auf. Die Hauptgründe für die höhere Anzahl an ausgeschiedenen Elementen im August sind zum einem, der erhöhte Bewuchs auf den Feldern durch die sich in voller blüte befindende Vegetationsperiode und zum anderen die niedrigere Bodenfeuchte sowie erhöhte Oberflächenrauigkeit, die Depolarisationseffekte sowie Mehrfach- und Volumenstreuung hervorrufen.

Die Ergebnisse werden im folgenden zusammenfassend dargestellt:

- Das Dubois-Modell kann trotz sehr trockenerer Bedingungen die Bodenfeuchten der Felder, mit einigen Ausnahmen, erfassen. Diese Ausnahmen bilden vor allem Felder mit hoher Rauigkeit, Vegetationsaufwuchs und die Grenzüberschreitenden Bodenfeuchten. Ein wesentlicher Grund für die ersten zwei Phänomene sind die unzureichend gesetzten Grenzen zur Ausscheidung der Mehrfach- und Volumenstreuung, $HH/VV < 1$ und $HV/VV < -11$ [dB], die hauptsächlich von der Vegetation verursacht wird. In einigen Studien wird noch ein zusätzlicher Mechanismus für die unzureichende Erfassung der Bodenfeuchte mit dem DUBOIS-Modell genannt. Dabei wird der signifikante Effekt der spiegelnden Reflexion auf besonders feuchten Flächen, die in einem hohen Einfallswinkelbereich liegen, gemeint und beurteilen die Detektierung der Bodenfeuchte mit dem L-Band als problematisch. In Hinblick auf die jahreszeitliche Betrachtung und damit auf ein großes Spektrum der zu bestimmenden Bodenfeuchten

erwies sich das L-Band im Vergleich zum C-Band als die Wellenlänge mit den geringeren RMS-Fehlern. Der Oberflächenparameter der Rauigkeit kann nur hinreichend bei geringen Rauigkeiten, langen Autokorrelationslängen und sehr spärlichen Vegetationsaufwuchs erfaßt werden. Ein Einfluß der Bodenfeuchte auf die Rauigkeitsmessungen ist schwierig zu beurteilen, da die stark streuenden Werte sowohl erhöhte Rauigkeiten wie auch erhöhte Bodenfeuchten aufweisen.

- Das OH-Modell dagegen erfaßt die Bodenfeuchten nur mäßig. Bei feuchten Konditionen, im April, werden diese durch Anwesenheit von Rauigkeit, spärlicher Vegetation und Grenzüberschreitenden Bodenfeuchten unterbewertet, dagegen reagiert das Modell mit Überbewertung bei sehr trockenen Konditionen, hohen Rauigkeiten und dichterem Vegetationsbewuchs. Im Unterschied zum DUBOIS-Modell erfaßt das OH-Modell die Rauigkeiten auch bei hohen Rauigkeiten, kurzen Autokorrelationslängen und dichterem Vegetation sehr gut. Wie schon zuvor bei der Korrelationsanalyse beobachtet weist die Kreuzpolarisation eine erhöhte Sensitivität zur Rauigkeit auf. Das OH-Modell berücksichtigt in seinem Algorithmus den kreuz-polarisierten Term und ist damit viel Sensitiver auf den Oberflächenparameter der Rauigkeit. Im August stellt bei den trockenen Konditionen (Bodenfeuchten in der tieferen Schicht bis 31 [vol %]) des Oberbodens die Rauigkeit den dominierenden Faktor im Rückstreusignal dar.
- Der RMS-Fehler der Bodenfeuchte für die zwei jahreszeitlichen Aufnahmen für beide Modelle überschreiten den angegebenen Wert von DUBOIS von 4.5 [vol %] deutlich. Die erhaltenen Werte besitzen einen RMS-Fehler von 7 bis 12 [vol %].
- Aufgrund des Vorhandensein von nur zwei Polarisierungen beim C-Band konnte nur das empirische Modell von DUBOIS angewandt werden. Der Oberflächenparameter der Bodenfeuchte zeigte ein ähnliches Verhalten wie die Frequenz des L-Band, geringe RMS-Fehler bei der Invertierung der Bodenfeuchte. Keine Korrelationen wurden im Vergleich mit dem Oberflächenparameter der Rauigkeit gefunden. Dieses Ergebnis unterstreicht die vorherigen Untersuchungen mit der Korrelationsanalyse. Auch hier wurde eine hohe Sensitivität des gleich-polarisierten Ratios auf die Bodenfeuchte festgestellt. Im speziellen wurden gute Korrelationen in der tieferen Bodenschicht 4 - 8 [cm] festgestellt, diese Ergebnisse können auch bei der Invertierung mit dem DUBOIS-Modell bestätigt werden. Die geringe Sensitivität des DUBOIS-Modelles auf die Rauigkeit schlägt sich auch im C-Band durch. Hinzukommt, dass die k_s Werte des C-Bandes den Gültigkeitsbereich $k_s < 1$ überschreiten und somit nicht vom DUBOIS-Modell erfaßt werden können.

Diese Ergebnisse müssen vor dem Hintergrund der Anwendung der empirischen Modelle auf die Anzahl der übrig gebliebenen Elemente nach Ausschließen der ungültigen Elemente und deren Repräsentativität sowie deren statistische Stabilität kritisch betrachtet werden. Auch scheint die Frage nach dem Einfluß des Kalibrationsfehlers auf die Genauigkeit der Bodenfeuchtebestimmung nicht geklärt.

An den vorgestellten empirischen Modellen zur Invertierung von geophysikalischen Parametern konnte gezeigt werden, daß die Anwendbarkeit solcher Modelle auf unterschiedlichen Datensätzen, erhoben von anderen Sensoren und aufgenommen über anderen Testflächen, in Frage gestellt werden kann. Ein Versuch mit der „Eigenvector Decomposition“ (HAJNSEK 1999) die statistische Stabilität des Datensatzes zu erhöhen zeigte erfolge in der Erhöhung der Anzahl von gültigen Elementen und verbesserte die Invertierungsergebnisse. Doch zeigt die Genauigkeitsanalyse immer noch unzureichende RMS-Fehler auf. Mit einer neuen vielversprechenden Methode (CLOUDE 1999), die allerdings noch validiert werden muß, konnten erste Ergebnisse einen RMS-Fehler für die Bodenfeuchte und Rauigkeit von kleiner als 5 [vol. %] erzielt werden. Diese Methode besteht auf der Modellierung von reinen physikalischen Parametern, die aus der Reaktion der elektromagnetischen Welle zur beleuchteten Oberfläche erhalten werden.

In der Modellierung und Invertierung von Oberflächenparametern, sowie auch Vegetationsparametern, besteht weiterhin reger Forschungsbedarf, der zum heutigen Stand der Forschung eine schnelle Entwicklung hervorruft.

8.3 SAR-Interferometrie

Die SAR-Interferometrie stellt ein Werkzeug zur Erfassung von topographischen Höhenunterschieden dar. Das Verfahren der SAR-Interferometrie gewann in den letzten Jahren durch zunehmende Operationalisierung und steigende Höhengenaugkeit in der Erstellung von digitalen Oberflächenmodellen (DOM) immer mehr an Bedeutung. Im Pilotprojekt erfolgten aufgrund systembedingter Schwierigkeiten und den daraus resultierenden Höhengenaugkeiten, die bis 10 [m] reichen, keine Auswertungen mit dem Datensatz. Es erfolgte jedoch eine theoretische Bearbeitung der Vor- und Nachteile der SAR-Interferometrie zum optischen Verfahren der Laser-Scanner Methode.

Die Überlegenheit in der Genauigkeit der Höhe und in der Auflösung des Laser-Scanner Systems gegenüber der SAR-Interferometrie kann durch technische Überlegenheit kompensiert werden. Die vielfach flexiblere SAR-Interferometrie mit der Unabhängigkeit der Wetterlage sowie einer vielfachen höheren Flächen- und somit kostengünstigeren Leistung ist ein zukunftsfähiges System deren erreichbare Höhengenaugkeiten mit der Verbesserung der Technik steigen. Steigende Genauigkeiten in der Höhengenaugkeit, die im Dezimeter-Bereich liegen, wurden zum jetzigen Zeitpunkt mit Flugzeugsensoren in Europa schon bestätigt. Neben dem SAR-Interferometrischen Produkt können gleichzeitig Informationen in Form von Amplituden- und Kohärenzbildern gewonnen werden.

Zur Bearbeitung dieser drei Themenbereiche war immer wieder ein Austausch mit dem BMBF-Verbundvorhaben „Möglichkeiten und Grenzen der Auenwaldgeneration und Auenwaldentwicklung am Beispiel von Naturschutzprojekten an der Unteren Mittelbe “ (FKZ 0339571) der Landesanstalt für Großschutzgebiete Brandenburg (LAGS) nötig. Zur Vegetations- und Landnutzungskartierung wurden Informationen über den momentan Zustand im Untersuchungsgebiet ausgetauscht, die hilfreich zur Interpretation der Radardaten waren. Ein weitere Verknüpfungspunkt ergab sich bei der Gegenüberstellung der SAR-Interferometrie zur Laser-Scanner Technik, da beide Verfahren über dem gemeinsamen Untersuchungsgebiet erprobt wurden sind.

Im Pilotprojekt wurden während der zwei jährigen Förderungsphase zum Sachstand der Projektes drei Zwischenberichte erstellt. In Form von drei Diplomarbeiten SCHULZE (1998), ALLGEYR (1999) und BUSCHE (1999) konnten bestimmte Fragestellungen, die sich während der Projektförderungszeit ergaben, intensiver bearbeitet werden. Desweiteren wurde das Projekt auf internationalen Konferenzen und Tagungen in Form von Vorträgen und Postern vorgestellt, deren Ergebnisse in fünf Veröffentlichungen präsentiert wurden.

9 Ausblick

Eine Anwendung von SAR-Daten für die flächendeckende Ermittlung des Bodenwassergehaltes als Start- und Kontrollwert für Bodenwasserhaushalts- und Gebietswasserhaushaltsmodelle oder als Unterlage für regionale Planungen ist vom heutigen technischen Standpunkt möglich und stellt eine Alternative zu den aufwendigen klassischen Punktmessungen dar. Der besonders hohen räumlichen Auflösung von flugzeuggetragenen Systemen steht allerdings die Unflexibilität in der zeitlichen Verfügung entgegen, sowie die umfangreiche

Infrastrukturplanung einer Kampagne mit Geländeaufnahmen, die zur Zeit noch als Validierung benötigt werden.

Mit der einhergehenden technischen Entwicklung werden noch manuelle Verarbeitungsschritte für flugzeuggetragene Systeme in naher Zukunft Operationalisiert werden können. Derzeit ermöglichen schon satelliten Radarsysteme eine operationelle Vorgehensweise, jedoch ist die Verfügbarkeit von geeigneten Radarfernerkundungsdaten eingeschränkt. Hier spielt vor allem die technische Realisierbarkeit, in der benötigten Stromversorgung, Datenrate und –menge sowie Antennendimension eine limitierende Rolle. Die geometrische Auflösung von Satellitensystemen erreicht nicht, die der flugzeuggetragenen Systemen mit der eine kleinräumige Untersuchung ralisierbar ist. Die derzeitigen Satellitensysteme werden oft nur mit einer Frequenz und gleich-polarisierten Konfiguration betrieben. In vielen Arbeiten (Proceedings IGARSS 1997-1999) konnte gezeigt werden, daß ein voll-polarimetrisches System bei der Extraktion, Modellierung und Invertierung des Radarrückstreuquerschnittes in der qualitativen Analyse zusätzliche Informationen liefern kann und in der quantitativen Analyse genauere Ergebnisse erhalten werden können.

Für die untersuchten Themenbereiche können folgende Perspektiven genannt werden:

- Die Entwicklung im Bereich der Vegetations- und Landnutzungsklassifikation geht hin zur automatischen unüberwachten Klassifizierung. Erste Versuche zur automatischen Objektfindung im Bereich des statistischen Ansatzes fanden mit Neuronalen Netzen und Fuzzy Logik (BENZ 1996) statt. Im Bereich des physikalischen Ansatzes, der mit dem Ansatz der *Decomposition* von Streumechanismen arbeitet, wurden gute Klassifikationsgenauigkeiten mit dem unüberwachten *Complex Wishart* Klassifikator (LEE 1999, POTTIER 1999) erzielt. Auch hier fanden erste Versuche zur Automatisierung mit Neuronalen Netzen (HELLMANN 1999) statt. Der limitierende Faktor ergibt sich aber noch durch eine eingeschränkte Objektklassenanzahl, die nach der Anzahl der Hauptstreumechanismen (Vorwärts-, Oberflächen-, Volumenstreuung und Double Bounce) bestimmt wird. Erste Ansätze von FERRO-FAMIL (1999) weisen mit einer weiteren Unterteilung von Objektklassen nach der *Gell-Mann Decomposition* erhöhte Klassifikationsgenauigkeiten auf.
- Im Bereich der Modellierung und Invertierung des Radarrückstreuquerschnittes konnten auch mit dem Ansatz der *Decomposition* erste hohe quantitative Genauigkeiten zwischen den in-situ gemessenen und den invertierten Werten aufgezeigt werden (CLOUDE 1999). Die Arbeiten von TREUHAF (1996) und PAPATHANSSIOU (1999) stellt bei der Extraktion von Vegetations- sowie von den darunterliegenden Bodenparametern einen entscheidenden Beitrag dar. Zur Modellierung und Invertierung, der Vegetationsschicht und den oberflächennahen Bodenparametern werden kombinierte Informationen aus der Interferometrie und Polarimetrie verwendet mit deren ein Informationsgewinn hervorgerufen wird.
- Mit der weiteren technischen Entwicklung im Bereich der SAR-Interferometrie geht auch eine Verbesserung hin zur Erhöhung der Auflösungsgenauigkeit in der Höhe einher. Jedoch wird die Höhengenaugigkeit, aufgrund von systembedingten Eigenschaften, die Dezimeter-Grenze nicht unterschreiten können.

10 Referenzen

Allgemein (Kapitel: 1, 5, 6)

- HORN, R., MOREIRA, J. & MEIER, E. (1992): "A Refined Procedure to Generate Calibrated Imagery from Airborne Synthetic Aperture Radar Data", Proceedings IGARSS, Houston (USA).
- GRAY, A., MATTER, K. E. & FARRIS-MANNING, P. J. (1992): „Airborne SAR Interferometry for Terrain Elevation“, IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens., vol. 31, no.1, 1589-1951.
- HOLECZ, F. (1993): „Postprocessing von SAR-Satellitenbilddaten“, Diplomarbeit der Universität Zürich im Fachbereich Geographie, S. 141, unveröffentlicht.
- VON PONCET, F. (1995): „Methodenentwicklung zur Nutzung von Satelliten-SAR-Daten für die Kartierung und Erfassung von Parametern und Phänomenen des Bodenwasserhaushaltes“, ZALF-Berichte Nr. 17, S. 83.
- RADKE, M. (1996): „Bestimmung der Rauigkeit bracher Felder aus Synthetic-Aperature-Radar-Daten“, Diplomarbeit DLR, unveröffentlicht.
- ULABY, F. T & K. M. MOORE (1981-86): „Microwave Remote Sensing, Active and Passive“, vol. 1-3, Artech House.
- WEIMANN, A. (1997): „Bestimmung der Bodenfeuchte mittels aktiver Mikrowellensensoren“, DLR Forschungsbericht 96-38, S. 132.

Geographie des Untersuchungsgebietes (Kapitel: 4)

- BUNDESANSTALT FUER GEWÄSSERKUNDE (Hrsg.)(1994): „Die Elbe - ein Strom mitten in Deutschland“, Koblenz.
- DUPHORN, K. & SCHNEIDER, U. (1983): „Zur Geologie und Geomorphologie des Naturparks Elbufer-Drawehn“, Abh. Naturwiss. Ver. Hamburg, (NF) 25, 9 – 40.
- FAULHABER, P.(1997): „Hydraulisch-morphologische Untersuchung von Rückdeichungen bei Lenzen (Elbe) (Auszug)“, Auenreport 3, 3.Jg., 66 – 81.
- FLEMMING, A. (1997): „Die Bedeutung des Grabensystems für den Gebietswasserhaushalt im geplanten Rückdeichungsgebiet Lenzen (Elbe)“, Diplomarbeit im Fachbereich Geographie der Universität Hamburg, unveröffentlicht.
- ELLENBERG, H. (1996): „Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht“, 5.stark veränd. u. verb. Aufl., Stuttgart, S. 1095.
- GRÖNGRÖFT, A., SCHWARTZ, R. & MIELICH, G. (1997): „Verbreitung und Eigenschaften der Auenböden in dem geplanten Rückdeichungsgebiet Lenzen – erste Ergebnisse“, Auenreport 3, 3.Jg., 58 – 65.
- HEINKEN, A., GAUSSMANN, P. & SSSCHWARTZ, H.-J. (1999): „Ergebnisse vegetationskundlicher und betriebswirtschaftlicher Untersuchungen zur Analyse und Bewertung von ökologischen und ökonomischen Wirkungen der projektierten Deichrückverlegung bei Lenzen- Wustrow“, Auenreport-Sonderband 1, 96-107.
- HELLWIG, M., KUNITZ, T., SPEIER, M. & POTT, R. (1999): „Untersuchungen zur Syndynamik und Bioindikation von Pflanzengesellschaften im potentiellen Rückdeichungsgebiet Lenzen-Wustrow an der Unteren Mittelbe“, Auenreport-Sonderband 1, 55 – 67.
- IBS-INGENIEBÜRO SCHWERIN FÜR LANDESKULTUR, UMWELTSCHUTZ & WASSERWIRTSCHAFT GmbH (1996): Umweltverträglichkeitsstudie, Rekonstruktion rechter Elbdeich Fahrstraße Wootz-Hafen Wittenberge, Projekt-Nr. 504 306.
- IKSE-Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (Hrsg.)(1995): Die Elbe und ihr Einzugsgebiet. Magdeburg.
- KESEL, R. (1997): „Aspekte der Auenentwicklung am Beispiel Neue Weser und Werdersee bei Bremen“, Bremer Beiträge für Naturkunde und Naturschutz, Bd. 3, 77 – 92.

- LOZAN, J. L. & KAUSCH, H. (Hrsg.) (1996): „Warnsignale aus Flüssen und Ästuaren. Wissenschaftliche Fakten“, Berlin, S. 389.
- MEYER, H. & MIELICH G. (1983): „Einfluß periodischer Hochwässer auf Genese, Verbreitung und Standorteigenschaften der Böden in der Pevestorfer Elbaue (Kreis Lüchow-Dannenberg)“, Abh. naturwiss. Ver. Hamburg, vol. 25, 41-73.
- NEUSCHULZ, F., PLINZ, W. & WILKENS, H. (1994): „Elbtaale-Landschaft am großen Strom“, Naturerbe Verlag Jürgen Resch, Überlingen.
- NEUSCHULZ, F., PURPS, J. & HAPE, M. (1999): „Auenregeneration durch Deichrückverlegung – Methodik und Zwischenergebnisse eines Forschungsverbundvorhabens im Rahmen des BMBF-Förderungsschwerpunktes Elbe-Ökologie“, Auenreport-Sonderband 1, 6 – 13.
- POTT, R. (1995): „Die Pflanzengesellschaft Deutschlands“, Stuttgart, S. 622.
- POTT, R. (1996): „Biotoptypen. Schützenswerte Lebensräume Deutschlands und angrenzender Regionen“, Stuttgart, S. 448.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1992): „Lehrbuch der Bodenkunde“, 13. Auflage, Stuttgart.
- SCHWARZ, R., GRÖNGRÖFT, A. & MIELICH, G. (1999): „Auswirkung von Eindeichung und Melioration auf den Wasserhaushalt von Auenböden – aufgezeigt am Beispiel zweier Grünlandstandorte an der unteren Mittelbe bei Lenzen“, Auenreport-Sonderband 1, 41-54.
- TACKE, D. (1989): „Qualmwasser in der Gartower Elbmarsch (Landkreis Lüchow Dannenberg)“, Diplomarbeit im Fachbereich Geographie an der Universität Hannover, unveröffentlicht.
- WALTHER, K. (1977): „Die Vegetation des Elbtales. Die Flußniederung von Elbe und Seege bei Gartow (Kreis Lüchow-Dannenberg)“, Abh. Verh. Naturwiss. Ver. Hamburg, NF 20 (Suppl.).
- WILKENS, H. (1983): „Faunistisch-ökologische Analyse einer Flußmarsch der Mittleren Elbe“, Abh. Verh. Naturwiss. Ver. Hamburg, (NF) 25, 151 – 167.
- WILKENS, H. (1999): „Die Aland-Niederung (Sachsen-Anhalt): Planungen im alten Stil statt Hochwasserschutz im Gesamtkonzept“, Natur und Landschaft, 74 Jg., Nr. 2, 52 – 57.

Vegetation- und Landnutzungsklassifikation (Kapitel 1.2.1, 3.1, 7.1)

- BRAUN, H. M. (1997): „Radarkurs Synthetisch Apertur Radar (SAR)“, Erdansichten: Anwendung der ERS-1 Radarfernerkundung über der Landoberfläche, CD-ROM, Bonn-Oberkassel.
- DOBSON, C., ULABY, F. T. & PIERCE, E., L. (1995): „Land-Cover Classification and Estimation of Terrain Attributes Using Synthetic Aperture Radar“, Remote Sens. Environ., vol. 51, 199 – 214.
- FERRO-FAMIL, L., POTTIER, E., DEDIEU, J. P., CORGIER & C., SAILLARD, J. (1999): „Application of Polarimetric SAR Data Processing to Snow Cover Remote Sensing. Validation Using Optical Images and Ground Data“, CEOS-Workshop, Toulouse, in print.
- HILDEBRANDT, G. (1996): „Ferneerkundung und Luftbildmessung – für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie“, Heidelberg, S. 676.
- HABERMEYER, M. (1996): „Entwicklung eines Algorithmus zur wissensbasierten Klassifikation von multifrequenten Radar-Ferneerkundungsaufnahmen“, Diplomarbeit der Technischen Universität München Institut für Informatik, S. 112.
- HARALICK, R., SHABMUGAM, K. & DINSTEIN, I. (1973): „Textural Features for Image Classification“, IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, 3(6), 610 – 621.
- HARALICK, R. (1979): „Statistical and Structurel Approaches to Texture“, Proceedings of the IEEE, 67(5), 768 – 804.
- HARALICK, R. & SHAPIRO, L. (1991): „Glossary of Computer Vision Terms. Pattern Recognition“, 24(1), 69 – 93.
- HELLMANN, M. (1999): „Classification od Full Polarimetric SAR-Data for Cartographic Application“, Dissertation of the Fakultü of Electrical Engineering at the Technical University Dresden, p. 156.

- GONG, P. & HOWARTH, P. J. (1992): „Frequency-Based Contextual Classification and Gray-Level Vector Reduction of Land-Use Identification“, *Pieers* 58, 423-437.
- GLITZ, R. (1995): „Polarimetrie zur Charakterisierung von SAR-Daten“, *Forschungsbericht der DLR*, 15, S. 118.
- KOUSKOULAS, Y., PIERCE, L., ULABY, F. T. & DOBSON, M. C. (1999): „Classification of Short Vegetation Using Multifrequency SAR“. *Proceedings IGARSS, Hamburg*.
- LANDGREBE, D. (1992): „Multispectral Data Analysis a Signal Theory Perspective“. *School of Electrical & Computer Engineering, Purdu University, West Lafayette*.
- LEE, J. S., GRUNES, M. R., AINSWORTH, T. L., DU, L. J., SCHULER, D. L. & CLOUDE, S. (1999): „Unsupervised Classification Using Polarimetric Decomposition and Complex Wishart Classifier“. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 37, no. 5, 2249 – 2258.
- POTTIER, E. & LEE, J. S. (1999): „Application of the H/A/a Polarimetric Decomposition Theorem for Unsupervised Classification of Fully Polarimetric SAR Data Based on the Wishart Distribution“. *CEOS-Workshop, Toulouse*, in print.
- RICARD, M. R. & CRAWFORD, M. M. (1998): „Multiscale Hierarchical Classification of Wetland Environments Using SAR-Data“, *Proceedings of IGARSS, Seattle*.
- SCHMIDT, M. (1997): „Untersuchung des Informationsgehalts und der Eignung experimenteller und operationeller SAR-Sensoren zur Erfassung tropischer Primär- und Sekundärwälder, periodischer Überschwemmungen und zur Überwachung der Rodungsdynamik“. *Forschungsbericht des Deutschen Fernerkundungszentrum Oberpfaffenhofen*, Nr. 97-47, S. 107
- SCHMULLIUS, C. C. & D. L. EVANS (1997): „Synthetic Aperture Radar (SAR) Frequency and Polarisation Requirements for Applications in Ecology, Geology, Hydrology and Oceanography: A Tabular Status Quo after SIR-C/X-SAR“, *Int. J. Remote Sensing*, vol. 18, no. 13, 2713-2722.
- SMITH, P. C. & DELLEPIANE, S. G. (1999): „Quality Assesment of Image Classification Algorithms of Land-Cover Mapping: A Review and a Proposal for a Cost-Based Approach“, *Int. J. Remote Sensing*, vol. 20, no. 8, 1461 – 1486.
- TOWNSHEND, J. R. G. & JUSTICE, C. O. (1988): „Selecting the Spatial Resolution of Satellite Sensors Required for Global Monitoring of Land Transformation of Land Transformation“, *Int. J. Remote Sens.*, vol. 9, 187 – 236.
- TOU, J. T. & GONZALEZ, R. C. (1974): „Pattern Recognition Principles“. *Addison-Wesley Publishing Co.*

Modellierung und Invertierung von Oberflächenparametern (Kapitel 1.2.1, 2.1, 3.2,7.2)

- BRUN, C., BERNARD, R., VIDAL-MADJAR, D., GASCUEL-ODOUX, C., MEROT, P., DUCHESNE, J., NICOLAS, H. (1990): „Mapping Saturated Areas with a Helicopter-Borne C Band Scatterometer“, *Water Resources Res.*, vol. 26, no. 5, 945 - 955.
- CHEN, M.F. & FUNG, A.K. (1988): „A Numerical Study of the Regions of Validity of the Kirchhoff and Small Perturbation Rough Surface Scattering Models“, *Radio Science*, vol. 23, no. 2, 163 - 170.
- CHEN, K.S., YEN, S.K., HUNAG, W.P. (1995): „A Simple Model for Retrieving Bare Soil Moisture from Radar-Scattering Coefficients“, *Remote Sensing*, vol. 16, no. 18, 3555 - 3567.
- CURLANDER, J.C. & MCDONOUGH, R.N. (1991): „Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Theory“, *John Willey & Sons, New York*.
- DOBSON, M.C., ULABY, F.T. (1986): „Active Microwave Soil Moisture Research“, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GE-24, no.1, 23 - 36.
- CLOUDE, S. R., HAJNSEK, I. & PAPANASSIOU, K. P. (1999): „An Eigenvector Method for the Extraction of Surface Parameters in Polarimetric SAR“, *CEOS-Workshop, Toulouse*, in preparation.
- DUBOIS, P.C, VAN ZYL, J.J., ENGMAN, T. (1995): „Measuring Soil Moisture with Imaging Radars“, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 33, no. 4, 915 - 926.

- ELACHI, C. (1988): „Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques“, IEEE Press, New York, NY.
- FUNDINGER, R., KÖHLER, K. & STACHEDER, M. (1997): „Messung der Material- und Bodenfeuchte mit der TRIME-Methode“. TRIME Produktkatalog. IMKO Micromodultechnik GmbH, Ettlingen.
- GENG, H., GWYN, H.J., BRISCO, B., BOISVERT, J., BROWN, R.J. (1996): „Mapping of Soil Moisture from C-Band Radar Images“, Can. J. Remote Sensing, vol. 22, no. 1, 117 - 126.
- HALLIKAINEN, M., ULABY, F., DOBSON, M.C., EL-RAYES, M.A., WU, L.K. (1985): „Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part I: Empirical Models and Experimental Observations“, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. GE- 23, no.1, 25 - 32.
- HOVANESSIAN, F.T. (1980): „Introduction to Synthetic Array and Imaging Radars“, Artech House, Inc., Norwood, MA.
- ISHIMARU, A. (1978): „Wave Propagation and Scattering in Random Media“, New York. Academic Press.
- LOPES, A., NEZRY, E., TOUZI, R. & LAUR, H. (1993): "Structure Detection and Statistical Adaptive Speckle Filtering in SAR Images", International Journal of Remote Sensing, vol. 14, no. 9, 1735-1758.
- OH, Y., SARABANDI, K., ULABY, F. (1992): „An Empirical Model and Inversion Technique for Radar Scattering from Bare Soil Surface“, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 30, no. 2, 370 - 381.
- PAPATHANASSIOU, K. P. , REIGBER, A. & CLOUDE, S. R. (1999): „Vegetation and Ground Estimation using Polarimetric Interferometry, Part II: Parameter Inversion and Optimal Polarisation“, CEOS-Workshop, Toulouse, in print.
- PAPATHANASSIOU, K. P. , REIGBER, A. & CLOUDE, S. R. (1999): „Vegetation and Ground Estimation using Polarimetric Interferometry, Part I: Role of Polarisation“, CEOS-Workshop, Toulouse, in print.
- PRIETSCH, C. (1998): „Vergleichende Analyse von SAR-Daten für die Regionalisierung des Wassergehalts im Oberboden“, Dissertation, Universität Potsdam, S.159
- PULTZ, T.J., CREVIER, Y., BROWN, R.J. & BOISVERT, J. (1997): „Monitoring Environmental Conditions with SIR-C/X-SAR“, Remote Sens. Environ., no. 59, 248 - 255.
- SALEH, A. (1994): „Measuring and Predicting Ridge-Orientation Effect on Soil Surface Roughness“, Soil Sci. Soc. Am. J., no. 58, 1228 - 1230.
- SCHANDA, E. (1986): „Physical Fundamentals of Remote Sensing“,Berlin.
- STACHEDER, M. (1996): „Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik. Messung von Wassergehalt, elektrischer Leitfähigkeit und Stofftransport“, Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, 40, S. 170.
- TOMIYASU, K. (1978): „Tutorial Review of Synthetic Aperture Radar“, Proceedings of the IEEE, vol. 66, no. 5, 563-583.
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. (1980): „Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines“, Water Resources Reserach, vol.16, no.3, 574 - 582.
- ULABY, F.T., KOUYATE, F., FUNG, A.K., SIEBER, A.J. (1982): „A Backscatter Model for a Randomly Pertubated Periodic Surface“, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. GE- 20, no. 4, 518 - 528.
- ULABY, F.T., SARABANDI, K., FUNG, A.K. (1986): „Microwave Remote Sensing.Active and Passive. Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory“, vol. II, Ann Arbor, Michigan.
- VAN ZYL, J.J., ZEBKER, H.A. & ELACHI, C. (1987): „Imaging Radar Polarization Signatures: Theory and Observation“, Radio Science, vol. 22, no. 4, 529 - 543.
- WEIMANN, A. (1996): „Bestimmung der Bodenfeuchte mittels aktiver Mikrowellensensoren“, Dissertation, DLR-Forschungsbericht 96 - 38.
- ZRIBI, M., CIARLETTI, V. & VIDAL-MADJAR, D. (1999): „An Inversion Model of Soil Roughness Based on Two Radar Frequency Measurements“, Proceedings IGARSS, vol. 5, 2528-2530.

SAR-Interferometrie (Kapitel: 1.2.3, 2.2, 7.2)

- BAMLER, R. & HARTL, P. (1997): „Synthetic Aperture Radar Interferometry“, Inverse Problems 14, S.62.
- BENZ, U. (1996): „Automatische Klassifizierung von E-SAR Daten zur Kartierung von Überflutungsflächen in den Rheinauen“, DLR-Mitteilungen, H. 5, S. 183.

- BROCKMANN, H. (1998): "Einsatzmöglichkeiten der Flugzeuggestützten Laser-Scanner-Technik zur Erfassung räumlich-hydrologischer Informationen an Fließgewässern", DGM, Nr. 42, Heft 2, S. 68.
- BUCK, T. (1999): "Erfassung räumlich-hydrologischer Parameter mittels DLR-SAR-RADAR-Bilddaten und Laser-Scanner-Höhenmodellen am Bsp. des Rhein-Hochwassers 1995", Diplomarbeit der Universität Köln Institut für Geographie, S. 90, unveröffentlicht.
- HARTL, P. & XIA, Y. (1993): "Besonderheiten der Datenverarbeitung bei der SAR-Interferometrie", ZPF, Nr. 6, S. 214.
- HARPE, M., KATZUR, L. & BLEYEL, B.: "Vergleich verschiedener Verfahren für die Entwicklung eines digitalen Höhenmodells für einen Ausschnitt der Elbtalau",
- HOSS, H. (1997): "Einsatz des Laserscanner-Verfahrens beim Aufbau des Digitalen Geländehöhenmodells (DGM) in Baden-Württemberg", DGPF, S. 131.
- KERSTEN, T. & HÄRING, S. (1997): „Effiziente automatische digitale Aerotriangulation“, ZPF, Nr. 4, S. 118.
- KILIAN, J. & ENGLISH, M. (1994): "Topographische Geländeerfassung mit flächenhaft abtastenden Lasersystemen", ZPF, Nr.6, S. 207.
- KWOCK, R. & FAHNENSTOCK, M.A. (1996): "Ice Sheet Motion and Topography from Radar Interferometry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 34, no. 1, s. 189.
- LINDENBERGER, J. (1993): "Laser-Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme", Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Nr. 400, S. 131.
- LOHR, U. (1997): "Digital Elevation Models by Laserscanning Principles and Applications", Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition: Proceeding, Development, Integration, Application & Operations, vol. I, Copenhagen, S 174.
- MASSONET, D., BRIOLE, P. & ARNAUD, A. (1995): "Deflation of Mount Etna Monitored by Spaceborne Radar Interferometry", Nature, vol. 375, p. 567.
- PAPATHANASSIOU, K. P. (1999): "Polarimetric SAR Interferometry", Forschungsbericht der DLR 99 – 07, S. 149.
- REIGBER, A. (1997): „Multitemporale Analyse der Kohärenz von SAR-Daten“, unveröffentlichte Diplomarbeit der Universität Konstanz, S. 110
- SCHEIBER, R., REIGBER, A., ULBRICHT, A., PAPATHANASSIOU, K. P., HORN, R., BUCKREUß, S. & MOREIRA, A. (1999): "Overview of Interferometric Data Acquisition and Processing Modes of the Experimental Airborne SAR System of DLR", Proceedings IGARSS.
- SCHMIEDER, A. (1997): "Gewinnung von Höhendaten aus InSAR-Daten durch automatische Klassifikation zur Geländemodellbearbeitung", Diplomarbeit der Fachhochschule München, S. 119, unveröffentlicht
- SCHWÄBISCH, M. (1995): "Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemodelle", Forschungsbericht der DLR.
- SMALL, D. (1998): "Generation of Digital Elevation Models through Spaceborne SAR Interferometry", Remote Sensing Series, S. 137.
- TREUHAFT, R.N., MADSEN, S.N., MOGADDAHM, M. & VAN ZYL, J. J. (1996): "Vegetation Characteristics and Underlying Topography from Interferometric Data", Radio Science, vol. 31, s. 1449-1495.
- TREUHAFT, R.N. & SEQUEIRA, P. (2000): "The Vertical Structure of Vegetation Land Surfaces from Interferometric Data", Radio Science, in print.
- ULBRICHT, A. & REIGBER, A. (1999): "L-Band Repeat Pass DEM- Generation with DLR's Experimental SAR (E-SAR), Proceedings IGARSS.
- VOIGT, S. (1997): "Interferometrische Verarbeitung von Flugzeug-SAR-Daten zur operationellen Ableitung digitaler Oberflächenmodelle am Beispiel des AeS-&", Diplomarbeit der Ludwig-Maximilian-Universität München, unveröffentlicht.
- WEVER, C. (1999): "Laserscannermessungen – ein Verfahren setzt sich durch", GIS 2, S. 12 – 17.
- ZEBKER, H.A., ROSEN, P.A., GOLDSTEIN, R.M., GABRIEL, A.G. & WERNER, C.H. (1994): "On the Derivation of Coseismic Displacement Fields Using Differential Radar Interferometry: The Landers Earthquake", Journal of Geophysical Research , vol. 99, no. 10, S. 19 - 617.

ZEBKER, H. A. & R. M., GOLDSTEIN (1986): „Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations“, J. of. Geophysical Research, vol. 91, no. 5, p. 4993-4999.

Diplomarbeiten angefertigt im Pilotprojekt

ILKA SCHULZE (1998): „Auswertung von multifrequenter Echtzeit-prozessierter ESAR Daten am Beispiel zweier Testgebiete an der Elbe“. Unveröffentlichte Diplomarbeit der Freien Universität Berlin im Fachbereich Geographische Wissenschaften, S. 93.

THOMAS BUSCHE (1999): „Bestimmung von Oberflächenparametern aus ESAR Daten am Beispiel unbedeckter Felder im Bereich der Unteren Mittelelbe-Niederung“. Unveröffentlichte Diplomarbeit der Universität Göttingen des Institutes für Geographie, S. 161.

STEFFEN ALLGYER (1999): „Vegetations- und Landnutzungs-klassifikation mit Hilfe eines multifrequenten, multipolarisierten E-SAR Datensatzes am Beispiel der unteren Mittelelbe“. Unveröffentlichte Diplomarbeit der Universität Erlangen des Institutes für Physische Geographie, S. 75.

Veröffentlichungen im Pilotprojekt

HAINSEK I., ERGENZINGER P., & SCHMULLIUS C., „Flood-Plain Mapping of the River Elbe with Multi-Frequency and Multi-Polarisation Airborne-Radar Data“, Proceedings IGARSS, Seattle, 1998.

HAINSEK I., ERGENZINGER P., & SCHMULLIUS C., „Pilotprojekt Radarbefliegung der mittleren Elbtalau“, 8. Magdeburger Gewässerschutzseminar, 1998.

HAINSEK I., PAPANASSIOU K. P., REIGBER A., & CLOUDE S., „Soil-Moisture Estimation Using Polarimetric SAR Data“, Proceedings IGARSS, Hamburg, 1999, vol. V, 2440-2442

HAINSEK I., BUSCHE T., SCHMULLIUS C., & ERGENZINGER P., „Determination of Hydrological Parameters Using Airborne-Radar Data (DLR E-SAR)“, Proceedings IGARSS, Hamburg, 1999, vol. II, 1108-1110

HAINSEK I., ALLGEYER S., SCHMULLIUS C., & ERGENZINGER P., „Landnutzungs-klassifikation mit Hilfe der Radarfernerkundung am Beispiel der mittleren Unterelbe“, Tagungsband: Fachtagung Elbe, Wittenberge, 1999, 113-114

HAINSEK I., BUSCHE T., SCHMULLIUS C., & ERGENZINGER P., „Vergleich von Algorithmen zur Modellierung von hydrologischen Parametern mit Hilfe von flugzeuggetragenen Radarsensoren (DLR E-SAR)“, Tagungsband: Fachtagung Elbe, Wittenberge, 1999, 115-116

10.1 Karten und Arbeitsmaterialien

Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltung der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), 1989, Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS), Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, Bonn.

AKADEMIE DER LANDWIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN DER DDR (1997): Mittlemaßstäbige landwirtschaftliche Standortkartierung, 1:100.000, Blatt 19, Perleberg.

PCI, Bildverarbeitungssoftware Version V.3, 1998

ANHANG

Tabellen und Abbildungen