

Bundesweite Landnutzungskartierung mit ERS-1 SAR-Bilddaten

ABSCHLUSSBERICHT

Wilhelm Hagg, Manfred Sties
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
Universität Karlsruhe
Englerstr. 7, 76128 Karlsruhe
Tel. (0721) 608 -3945 oder -2315 (Skr.)
Telefax (0721) 694568

29. März 1996

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln der Deutschen Agentur für Raumfahrtangelegenheiten (DARA) GmbH unter dem Förderkennzeichen 50 QS 8910 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
1.1	Projektziel	6
1.2	Vorgehensweise	6
2	Datengrundlage	7
2.1	Multitemporale, geokodierte ERS-1 SAR-Bilddaten	7
2.2	Digitales Geländemodell (DGM)	8
2.3	Digitales Situationsmodell (DSM)	8
2.4	Karten der naturräumlichen Gliederung	8
2.5	Topographische Karten, Luftbilder	9
3	Entwickelte Verfahren	9
3.1	Prozeßkette	9
3.2	Qualitätskontrolle	12
3.2.1	Bewertung der geometrischen Bildqualität durch Messung der geometrischen Auflösung in Azimut- und Range-Richtung	12
3.2.2	Bewertung der radiometrischen Bildqualität durch Messung der Nebengipfeldämpfung in Azimut- und Range-Richtung	13
3.2.3	Einfache globale statistische Untersuchungen	14
3.2.4	Untersuchung der Genauigkeit der Geokodierung	14
3.3	Radiometrische Korrektur von Beleuchtungseffekten aufgrund der Hangneigung	14
3.3.1	Korrekturprinzip	16
3.3.2	Vergleich verschiedener Modelle zur Beschreibung der geländeabhängigen Radarrückstreuung	19
3.3.3	Klassenspezifische Korrektur	24
3.4	Merkmalsextraktion	27
3.4.1	Speckle-Filterung	27
3.4.1.1	Das EPOS Speckle Filter	28
3.4.1.2	Vergleich verschiedener Filter	29
3.4.2	Extraktion von Texturmerkmalen	33
3.4.2.1	Merkmalsextraktion durch Specklemodellierung	34
3.4.2.2	Texturbeschreibung durch Strukturanalyse	35
3.4.2.3	Vergleich der Texturmerkmale	36
3.5	Klassifikation	38
3.5.1	Definition von Trainingsgebieten	38
3.5.2	Überwachte Klassifizierung	39
3.5.3	Verifikation der Klassifizierungsergebnisse	39
3.6	Generalisierung (Relaxation)	39
4	Durchgeführte Untersuchungen	40
4.1	Untersuchung von JERS-1 Daten für die Landnutzungskartierung	40
4.1.1	Verwendetes Datenmaterial	41
4.1.2	Diskussion der Ergebnisse	41
4.2	Kombination der Abbildungen verschiedener operationeller Satellitensensoren zur Optimierung der Landnutzungsklassifikation	44
4.2.1	Datenmaterial	45
4.2.2	Definition der Trainingsgebiete	45
4.2.3	Klassifizierung getrennt nach Sensoren	47
4.2.4	Kombination der Sensoren	49

4.2.5	Beurteilung und Vergleich	50
4.3	Kombination von ERS-1 Daten aus sich kreuzenden Orbits zur Reduzierung von Layover- und Shadowgebieten	51
4.3.1	Geometrieuntersuchung	52
4.3.2	Radiometrieuntersuchung	53
4.3.3	Radiometrische Anpassung	54
4.3.4	Minimierung der Layover/Shadow-Gebiete	55
4.3.5	Beurteilung	56
4.4	Analyse nicht differenzierbarer ERS-1 SAR-Signaturen in Siedlungsbereichen	57
4.4.1	Methodik der Untersuchung	57
4.4.2	Ergebnisse	58
4.4.2.1	Ausrichtung der Gebäude zum Sensor	58
4.4.2.2	Dachneigung	59
4.4.2.3	Bodenversiegelungsgrad	59
4.4.2.4	Art und Anordnung der Bepflanzung um die Häuser	60
4.4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	62
4.4.4	Lösungsansätze zur differenzierteren Erfassung von Siedlungen	62
4.5	Analyse der Multitemporalen Auswertung von SAR-Bilddaten des ERS-1	63
4.5.1	Vorgehensweise	64
4.5.2	Einfluß der Aufnahmezeitpunkte	66
4.5.3	Einfluß der Anzahl der Abbildungen	68
5	Ergebnisse	70
5.1	Beispiele	70
5.2	Beurteilung der Genauigkeit	77
5.2.1	Vergleich mit dem Digitalen Situationsmodell (DSM)	77
5.2.2	Vergleich mit einer LANDSAT-TM Klassifizierung	78
5.3	Datenformat	80
5.4	Programme	80
5.5	Sach- und Personalaufwand	81
5.5.1	Datengrundlage	82
5.5.2	Rechnerausstattung	82
5.5.3	Personal	83
6	Probleme	83
6.1	Qualität	83
6.2	Produktspezifische Probleme	84
6.3	Verfahrensspezifische Probleme	84
6.4	Automatisierbarkeit	84
6.5	Probleme der einzelnen Verfahren	85
6.5.1	Radiometrische Korrektur von Beleuchtungseffekten	85
6.5.2	Texturanalyse	85
7	Ausblick	85
8	Veröffentlichungen	86

Abbildungsverzeichnis

1	Naturraum-Areale (BRD-Süd)	9
2	Schematische Darstellung der Prozessierungskette	11
3	Häufigkeit gemessener -3dB-Strahlweiten	13
4	Graphische Darstellung der Residuen	15
5	Radiometrische Korrektur	25
6	DSM und Einfallswinkelmaske (GIM)	26
7	Aufteilung der Filtermatrix beim EPOS Filter	29
8	Mit EPOS gefilterter ERS-1 Ausschnitt in multitemporaler Darstellung	30
9	Testbild mit Meßbereichen und synthetischem Speckle	30
10	Fehler verschiedener Geometrien (KONTRAST = 100)	32
11	Fehler bei verschiedenen Kontrast-Werten (Kanten)	33
12	Textur- und Strukturelemente in SAR-Abbildungen	35
13	Schwellwertbildung der Speckle-Dynamik und des Haralick-Kontrastes	36
14	Multitemporaler SAR-Ausschnitt und Klassifikation mit Haralick und Strukturparametern	37
15	Generalisierung durch Relaxation	40
16	Geglättete Radarbilddaten mit JERS-1 in ROT und zweimal ERS-1 in GRUEN bzw. BLAU	42
17	Ergebnis der Klassifizierung nach Generalisierung	43
18	Farbzuordnung und Klassenliste	44
19	Wolken in einem Landsat-TM Bild	45
20	Landsat-TM (Kanäle 4, 5 und 7) und Radardaten (ERS-1, JERS-1, ERS-1)	46
21	Klassifikation mit LANDSAT-TM und ERS-1/JERS-1	48
22	Klassifikation mit allen Sensordaten und Farbzuordnung zur Klassenliste	50
23	Grauwertverlauf zwischen zwei markierten Pixeln in drei Kanälen	53
24	Grauwertverteilung der Waldgebiete nach Anpassung	55
25	Klassifikation ohne und mit Verwendung der Komplementären Orbits	56
26	Häufigkeit erfaßter und nicht erfaßter Häuser bei verschiedenen Versiegelungsgraden	60
27	Klassifizierung eines homogenen Laubwaldgebietes	66
28	Gesamtergebnisse der einkanaligen Klassifizierungen	67
29	Ergebnisse der einkanaligen Klassifizierungen für alle Klassen	67
30	Gesamtergebnisse der 3 Folgen 'auf', 'ab' und 'z' im Vergleich mit LANDSAT; Angaben in %	68
31	Differenzen in % zwischen den Kurven 'auf' und 'ab'	69
32	Legende zu den TÜK 200 Blättern	70
33	TÜK 200 Blatt CC 7118 Stuttgart-Nord	73
34	TÜK 200 Blatt CC 8710 Freiburg-Süd	74
35	TÜK 200 Blatt CC 3918 Hannover	75
36	TÜK 200 Blatt CC 6310 Frankfurt a.M.-West	76
37	ERS-1 Szene und Übereinstimmung zwischen ERS-1 und TM Klassifizierung	79
38	Legende zum Vergleich ERS-1 – LANDSAT-TM	79
39	Blattschnitt der TÜK 200	81

Tabellenverzeichnis

1	Globale statistische Werte	14
2	Residuen (in Pixel)	15
3	Verteilung der Pixel auf die Klassen	19
4	Mittlere Quadratische Abweichung der Interpolationsfunktion	20
5	Mittlere Quadratische Abweichung der Interpolationsfunktion	20
6	Klassen-Mittelwerte und Standardabweichungen	21
7	Klassen-Mittelwerte und Standardabweichungen	21
8	Klassen-Mittelwerte und Standardabweichungen	22
9	Klassen-Mittelwerte und Standardabweichungen	22
10	Veränderung der Klassen-Varianz durch die Korrektur	23
11	Veränderung der Klassen-Varianz durch die Korrektur	23
12	Reduzierung der Standardabweichung und Mittelwerttreue	31
13	RMS-Fehler für verschiedene Geometrien und Kontrastwerte.	32
14	Vergleich der Klassifizierung mit dem DSM	43
15	Prozentuale Abweichungen aus den Differenzbildern	50
16	<i>Layover</i> in den einzelnen Szenen	51
17	<i>Shadow</i> in den einzelnen Szenen	52
18	Grauertsprünge an Kanten	53
19	Multiplikative Korrekturglieder	54
20	Verringerung von <i>Layover/Shadow</i> durch verschiedene Kombinationen	55
21	Erfasste und nicht erfasste Häuser verschiedener Orientierungen	58
22	Abstandsbereich x für direkte Reflektion zum Sensor	61
23	Anzahl der Trainingsgebiete in den einzelnen Klassen	64
24	Konfusionsmatrix: Vergleich mit LANDSAT-TM-Klassifizierung	65
25	Zuordnung zu den Klassen des DSM	65
26	Zuordnung zu den Klassen der LANDSAT-TM-Klassifizierung	66
27	Reihenfolge der in den Folgen „auf“, „ab“ und „z“ hinzugefügten Kanäle	68
28	Prozessierte ERS-1 Szenen (Teil 1)	71
29	Prozessierte ERS-1 Szenen (Teil 2)	72
30	Vergleich von DSM und ERS-1 Klassifizierung: Absolute Anzahl	78
31	Vergleich von DSM und ERS-1 Klassifizierung: Relative Anzahl in Prozent	78
32	Vergleich der ERS-1 Klassifizierung mit einer LANDSAT-TM Klassifizierung im Gebiet Karlsruhe	80

1 Einleitung

Die Bundesrepublik Deutschland ist mit hoher Priorität und mit Einsatz großer finanzieller Mittel an der Entwicklung und dem Betrieb des ERS-1, dem Empfang, der Archivierung und der Verarbeitung der Sensor-Daten beteiligt. Das hier beschriebene Vorhaben ist ein Beitrag zur Demonstration der vielfältigen Verwendbarkeit aktueller, mit modernster Sensortechnologie flächendeckend erfaßter Fernerkundungsdaten. Das Vorhaben hat nicht die Entwicklung neuer Hardware zum Ziel; es ist als ein wichtiges Bindeglied an der Schnittstelle zwischen der Fernerkundungs-Datenerfassung und der vielfältigen fachspezifischen Datennutzung angesiedelt. Das Vorhaben "Bundesweite Landnutzungskartierung" ist Teil des durch ESA in der Bewertungskategorie B angenommenen ERS-1 Experimentvorschlags D5 "Radarkarte der Bundesrepublik Deutschland", in dem unter der Projektleitung der DLR Oberpfaffenhofen weitere drei Partnerinstitutionen (Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung (IPI) in Hannover, Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG) in Frankfurt und Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) in Karlsruhe) zusammenarbeiten. Das Vorhaben ist als ein Pilotvorhaben anzusehen, durch das demonstriert werden kann, wie mit Hilfe von Fernerkundungssystemen zusätzliche Informationen über den Zustand der Erde gewonnen, interpretiert und verknüpft werden können und dadurch Aufgabenstellungen, die den menschlichen Lebensraum betreffen, effektiver bewältigt oder überhaupt erst einer Lösung zugeführt werden können.

Die Durchführung des Projektes erfolgte am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) an der Universität Karlsruhe. Beteiligte Mitarbeiter sind Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Bähr, Dr.-Ing. Manfred Sties, Dipl.-Inf. Stefan Tex und Dipl.-Ing. Wilhelm Hagg. Das Projekt wurde mit Mitteln der Deutschen Agentur für Raumfahrtangelegenheiten (DARA) gefördert.

1.1 Projektziel

Es ist das Ziel dieses Teils des Vorhabens, durch automatische, überwachte Klassifizierung der ERS-1 SAR-Bilddaten thematische Karten der Landnutzung im Maßstab 1 : 200 000 für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland herzustellen. Damit wird die Karte der (originalen) Radarbildinformation, die von der DLR Oberpfaffenhofen in Zusammenarbeit mit IPI Hannover hergestellt wird, um thematische Karten mit im Bezug auf Landnutzung ausgewerteter Radarinformation ergänzt und erweitert. Die Herstellung eines solchen aktuellen, bundesweiten Kartenwerkes auf der Basis modernster Sensor- und Verarbeitungstechnik ist als ein Pilotprojekt zur Demonstration der vielfältigen Verwendbarkeit großflächig erfaßter Radar-Fernerkundungsdaten anzusehen.

1.2 Vorgehensweise

Als Eingabedaten wurden in diesem Vorhaben multitemporale, kalibrierte, geländehöhenkorrigierte und geokodierte SAR-Bilddaten des ERS-1 in bester geometrischer Auflösung verwendet. Die automatische überwachte Klassifizierung wurde auf der Basis von Texturmerkmalen angestrebt. Zur Texturbeschreibung sind eine Reihe von Verfahren bekannt und in Übersichtsartikeln erläutert und verglichen worden ([Haralick, 1978], [Wechsler, 1980], [Davis, 1982]). Praktisch alle Verfahren wurden für die Analyse von Bilddaten des optischen und infraroten Spektralbereichs entwickelt, in denen das Phänomen des 'Speckle' nicht auftritt. Speckle entsteht durch die beim SAR-Sensor prinzipiell unumgängliche Überlagerung kohärenter Abbildungen, also durch Interferenz kohärenter Wellen und ist nicht mit dem in allen Sensorsignalen feststellbaren störenden Rauschanteil zu vergleichen. Hier wird eine Anpassung der Texturbeschreibungsverfahren an diese SAR-Signaleigenschaften angestrebt. Ein Ansatz einer solchen Entwicklung wurde von [Ebert und Mauer, 1987] veröffentlicht. Eine allgemeine Darstellung der Methoden der digitalen Bildverarbeitung findet man zum Beispiel in [Bähr und Vögtle, 1991], aktuelle Forschungsergebnisse im Bereich der Auswertung von Radarbilddaten sind in [Schreier, 1993] zusammengefaßt. Statistische Grundlagen können dem Buch [Fisz, 1962] entnommen werden.

Für eine Jahreszeit, vorzugsweise während der Pflanzenwachstumsperiode zwischen April und Oktober eines Jahres, werden vollflächig deckungsgleiche multitemporale Abbildungen, vorzugsweise von drei Zeitpunkten, die nicht weiter als vier bis sechs Wochen auseinanderliegen sollen, zur Herstellung einer bundesweiten Landnutzungsklassifikation verwendet. Es werden jedenfalls die Grobklassen

- Wasserfläche,
- besiedelte Fläche,
- landwirtschaftliche Fläche,
- Waldfläche

unterschieden werden. Eine weitere Trennung der drei letztgenannten Grobklassen in

- unterschiedlich dicht besiedelte Flächen,
- Flächen unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung,
- Waldflächen unterschiedlicher Baumarten und Altersstufen

wird erreichbar sein, jedoch wegen der auf etwa 20m x 20m begrenzten Bildpunktgröße einen merklichen Generalisierungseffekt aufweisen.

Aus den technischen Zielen des Vorhabens wurde ein SAR-spezifisches Verarbeitungskonzept zur Landnutzungsklassifikation abgeleitet. Dieses Konzept wurde in Form einer automatisierten Verarbeitungskette implementiert. Das Resultat der Verarbeitungskette stellen thematische Karten der Landnutzung in digitaler Form im Maßstab 1:200.000 dar. Die analoge, kartographische Aufbereitung sollte von dem Projektpartner IfAG durchgeführt werden, der sich aus Gründen einer Änderung der Aufgabenschwerpunkte aus dem Projekt zurückgezogen hat. Es ist noch nicht abschließend geklärt, wer diesen Teil übernehmen wird.

2 Datengrundlage

Zur Kartierung der Landnutzung wurden neben den ERS-1 SAR-Bilddaten noch andere Datensätze benötigt. Die hier verwendeten Eingabedaten und ihre Aufbereitung zur Verwendung in der implementierten Prozesskette sind im folgenden detailliert beschrieben.

2.1 Multitemporale, geokodierte ERS-1 SAR-Bilddaten

Aufgrund der notwendigen multitemporalen Arbeitsweise benötigten wir geländehöhenkorrigierte und geokodierte ERS-1 Bilddaten (GTC-Produkt) von mindestens zwei, besser drei Aufnahmezeitpunkten. Die nur ellipsoid-korrigierten ERS-1 Datensätze (GEC-Produkt) weisen nach ersten Analysen erhebliche geometrische Verzerrungen mit bis zu 12 Pixel gegenüber der topographischen Karte auf. Eine pixelgenaue Überlagerung der verschiedenen multitemporalen ERS-1 Szenen insbesondere mit den unten geschilderten Kontextdaten scheint mit den ellipsoid-korrigierten Bilddaten nicht möglich zu sein. Die ERS-1 SAR-Bilddaten werden vom D-PAF, DLR als ESA-Produkte im sog. CEOS-Datenformat mit 16 Bit/Pixel und einer Rasterung von 12,5 Meter ausgeliefert. Das Referenzkoordinatensystem ist UTM, und eine Vollszene besteht typischerweise aus 10.000 x 10.000 Pixel, so daß eine einzige ERS-1 Szene einen Speicherplatz-Bedarf von $10000 * 10000 * 2 \text{ Byte} = 200 \text{ MByte}$ benötigt. Der eigentliche Bildinhalt überdeckt effektiv eine Fläche von ca. 100 km x 100 km. Um die Datenmenge (ca. 60 solcher Szenen werden benötigt, um die alte Bundesrepublik einfach abzudecken) zu reduzieren, werden die Bilder auf eine Pixelgröße von 25 m x 25 m resampelt. Da die konstruktionsbedingte geometrische Auflösung des ERS-1 SAR-Sensors in der Größenordnung von 25 Metern liegt, ist ein Resampling

der einzelnen Szenen auf eine 25 Meter Rasterung in Azimut- und Range-Richtung unkritisch. Die Datenmenge reduziert sich dadurch um den Faktor 4. Eine weitere signifikante Datenreduktion um den Faktor 2 ergibt sich durch die lineare Transformation des Dynamikbereichs von 16 Bit/Pixel auf 8 Bit/Pixel. Analysen der ERS-1 Bilder haben gezeigt, daß von dem theoretisch möglichen Wertebereich der 16 Bit-Daten nur ca. 10 Bit tatsächlich auch ausgenutzt werden, so daß insgesamt nur wenig an radiometrischer Differenzierung durch diese Kompression verloren geht. Der Speicherplatz der für eine Szene benötigt wird reduziert sich dadurch auf ca. 25 MByte.

Zusätzlich zum GTC-Produkt wird auch noch das GIM (Geocoded Incidence-Angle Mask) zu jedem GTC ausgeliefert, welches den lokalen Einfallswinkel für jede Pixelposition enthält. Dieses Produkt kann in ähnlicher Weise wie ein digitales Höhenmodell zur Korrektur radiometrischer Fehler durch Hangneigungseffekte benutzt werden (siehe auch Abschnitt 3.3).

2.2 Digitales Geländemodell (DGM)


Vom Amt für Militärisches Geowesen (Milgeo) in Euskirchen erhielten wir das bundesweite DGM im Raster von 1" x 1" für die alten Bundesländer bzw. 3" x 3" für die neuen Bundesländer. Das DGM ist in einzelnen Dateien/Kacheln mit 16Bit/Höhenwert entsprechend dem Blattschnitt der TK 50 aufgeteilt und basiert wie die TK 50 auf dem geographischen Koordinatensystem. Zur paßgenauen Überlagerung des DGM's mit den ERS-1 Bilddaten mußte im Vorfeld eine Transformation in das Referenzsystem UTM erfolgen. Das DGM wird zur radiometrischen Korrektur der ERS-1 SAR-Bilder aufgrund der Geländeneigung benötigt.

2.3 Digitales Situationsmodell (DSM)

Das DSM ist eine Vektordatenbank und enthält die aus der TK 50 (Stand 1980-1985) übernommene und in digitale Form umgesetzte Oberflächenbedeckung des Landes. Auch diese Kontextdaten entstammen dem Milgeo und sind ebenso wie das DGM in einzelnen Dateien/Kacheln entsprechend dem TK50-Blattschnitt organisiert. Das DSM basiert auf dem WGS-72 Koordinatensystem. Das DSM fließt an 3 Stellen in die Verarbeitung mit ein: bei der klassenspezifischen radiometrischen Relief-Korrektur, bei der Bestimmung von Trainingsgebieten sowie bei der Verifikation des Klassifizierungs-Ergebnisses. Das DSM ist in einem stark komprimierten, DEC-VAX-spezifischen Format auf Magnetband gespeichert. Zur Decodierung dieser Daten wird ein spezielles Leseprogramm unter UNIX benötigt. Danach ist noch eine verarbeitungsgerechte Aufbereitung der DSM-Vektordaten erforderlich. Diese Vektordaten können dann zusammengesetzt, Vektor-Raster-transformiert und in das UTM-Koordinatensystem entzerrt werden, so daß schließlich Rastermatrizen mit den DSM-Informationen zur Verfügung stehen.

2.4 Karten der naturräumlichen Gliederung

Diese Karten werden von der Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung in Bad Godesberg im Maßstab 1:250.000 herausgegeben und enthalten in verschiedenen Ordnungsstufen die Grenzlinien der Naturraum-Areale. Für die Zwecke der Landnutzungsklassifikation wurden die Grenzlinien I. und II. Ordnung mit dem Programmpaket ARC/INFO digitalisiert, von der Vektorform in die Rasterform konvertiert und von geographischen in UTM-Koordinaten umgewandelt. Die Grenzlinien der Areale sind in Abbildung 1 für den südlichen Teil Deutschlands exemplarisch dargestellt. Als Resultat stehen somit Rastermasken zur Zerlegung der multitemporalen ERS-1 Radarbilddaten nach naturräumlichen Gesichtspunkten zur Verfügung. Die Zerlegung in Ausschnitte einheitlicher Naturräume erlaubt die Berücksichtigung verschiedener Faktoren wie Klima und Bodenbeschaffenheit bei der Klassifikation der Daten. Die Auswirkung dieser Faktoren auf die Remission, und damit auf den Klassifikationsprozeß, wird durch die getrennte Behandlung der Areale eliminiert. Dies führt zu einer verbesserten Trennung der betrachteten Landnutzungskategorien.



image/natur.eps

Abbildung 1: Naturraum-Areale (BRD-Süd)

2.5 Topographische Karten, Luftbilder

Soweit vorhanden und noch aktuell, dienen topographischen Karten und Luftbilder der Bestimmung von Trainingsgebieten für die überwachte Klassifizierung, sowie der Verifikation des Klassifizierungsergebnisses. Topographische Karten werden außerdem bei der Qualitätsanalyse (Kontrolle der Geokodierung) eingesetzt. Aus Kostengründen waren die topographischen Karten im mittleren Maßstabsbereich (TK 50, TK 25) nicht flächendeckend für die gesamte Bundesrepublik verfügbar, sondern wurden nur auszugsweise beschafft.

3 Entwickelte Verfahren

Zur Durchführung der bundesweiten Landnutzungskartierung wurden eine Reihe von Verfahren entwickelt, die eine verbesserte Auswertung von SAR-Daten des ERS-1 ermöglichen. Primär waren dies Methoden zur Qualitätskontrolle, radiometrischen Korrektur, Merkmalsextraktion und zur Generalisierung. Diese Verfahren wurden zusammen mit Standardverfahren der Bildverarbeitung in eine weitestgehend automatisierte Verarbeitungskette integriert.

3.1 Prozeßkette

Die Kartierung der Landnutzung großer Gebiete, wie das der gesamten BRD, erfordert die Implementierung einer automatisierten Prozeßkette. Diese Verarbeitungskette wurde insbesondere im Hinblick auf die speziellen Anforderungen des Radarmap-Projektes konzipiert: es müssen sehr große Datenmengen in relativ kurzen Zeitintervallen durch die Verarbeitungskette geschleust werden; das Klassifizierungsergebnis soll trotzdem ein Höchstmaß an Genauigkeit und Zuverlässigkeit besitzen. Interaktive Eingriffe in die einzelnen Verarbeitungsschritte müssen somit auf das notwendige Maß beschränkt

bleiben (z.B. Trainingsgebietsbestimmung), und die gesamte Prozessierungskette hat hohen Anforderungen hinsichtlich Stabilität und operationeller Einsetzbarkeit im Massenbetrieb zu genügen. Darüber hinaus ist innerhalb der Verarbeitungskette eine Berücksichtigung der SAR-spezifischen Sensoreigenschaften erforderlich, da eine Übertragung der Vorgehensweise aus der IR/optischen Sensorauswertung nur bedingt möglich ist. Die hierzu implementierte Prozeßkette ist in Abb. 2 dargestellt.

Die Prozessierung gliedert sich im wesentlichen in folgende Schritte:

- Vorverarbeitung der einzelnen ERS-1 Szenen
- Ausschneiden von Naturräumen gemäß der naturräumlichen Gliederung der Bundesrepublik
- Iterative Klassifikation der Ausschnitte
- Herstellen eines Mosaiks der Ergebnisse im Schnitt der TÜK 200 und anschließende Relaxation.

Die szenenbezogene Vorverarbeitung umfaßt das Resampling von 12.5 auf 25 Meter Pixelgröße, die Komprimierung von 16-Bit auf 8-Bit pro Pixel, die radiometrische Korrektur von Hangneigungseffekten und die Speckle-Filterung. Das Resampling beruht auf einer zweidimensionalen Gewichtungsmatrix im Ortsbereich mit einem $\sin(x)/x$ Verlauf (idealer Tiefpaß im Frequenzbereich). Dadurch werden hochfrequente Störungen im Signal unterdrückt und ein repräsentativer Wert aus dem ursprünglichen Signalverlauf berechnet. Aus Einfachheitsgründen wurde ein Rechteckfenster zur Begrenzung der Filtermatrix verwendet, auf Aliasing-Effekte wurde hier somit keine Rücksicht genommen, da es sich im SAR-Signal um eine untergeordnete Störung handelt. Die Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung und Filterung sind zum Beispiel in [Hamming, 1977] dargestellt. Die Kompression der Signaltiefe auf 8 Bit erfolgte linear, um keine unnötigen Verzerrungen des Merkmalsraumes bei der Klassifikation zu erhalten. Die Parameter für die Kompression werden hierzu aus der Statistik jeder Szene berechnet, um den verbleibenden Signalbereich möglichst optimal auszunutzen. Allerdings geht durch diese Art der Kompression die absolute Kalibrierung der Daten verloren. Die hier angewandten und speziell für dieses Projekt entwickelten Verfahren der radiometrischen Korrektur und der Speckle-Filterung werden in den nachfolgenden Abschnitten (Kapitel 3.3 und 3.4.1) ausführlich erläutert.

Nach diesen Vorverarbeitungsschritten wird jede multitemporale Szene, bestehend aus drei Aufnahmezeitpunkten, entsprechend der naturräumlichen Gliederung in Teile zerlegt. Der Grund für diese Zerlegung ist die Eliminierung von nicht klassenbedingten Einflußfaktoren auf die Rückstreuung. Solche Faktoren sind neben dem lokalen Klima auch die Beschaffenheit der Böden und regionale Unterschiede in der Bewirtschaftung. Durch die Zerlegung wird erreicht, daß in jedem der entstehenden Teile ähnliche Bedingungen bezüglich der angesprochenen Faktoren herrschen, wodurch die Rückstreuwerte innerhalb des Ausschnittes vergleichbar sind und somit einer gemeinsamen statistischen Beschreibung unterliegen. Diese gemeinsame, vergleichbare Statistik (gleiche Klassen haben gleiche Klassenmittewerte) ist die Grundvoraussetzung für eine automatische Klassifikation.

Das Zusammenfügen kompletter Naturräume aus verschiedenen ERS-1 Szenen hat sich in diesem Zusammenhang nicht bewährt, da die Remission gleicher Landnutzungsklassen sehr stark von den Aufnahmezeitpunkten der einzelnen Szenen und der zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden Witterungsbedingungen—insbesondere Niederschläge und Bodenfeuchte—abhängt. In den dynamischen Bereichen der Landwirtschaft verschieben sich die Grauwerte durch Pflanzenwachstum und Bearbeitung der Felder so schnell, daß eine vernünftige Kombination von zwei Szenen nur in Ausnahmefällen möglich ist. Da die Aufnahmezeitpunkte der Szenen teilweise mehrere Wochen auseinander lagen, waren keine konstanten Wetterbedingungen und auch kein einheitlicher Vegetationszustand in der Landwirtschaft gegeben. Eine szenenübergreifende Klassifikation in einem Arbeitsschritt war somit nicht möglich, da die Grundvoraussetzung einer gemeinsamen Statistik nicht mehr gegeben war. Aus diesem Grund wurde jeder Ausschnitt getrennt klassifiziert.

Der wichtigste und zugleich aufwendigste Arbeitsschritt war die überwachte Klassifikation der einzelnen Ausschnitte. Hier ist ein hohes Maß an Interaktion durch einen erfahrenen Operateur erforderlich. Die Auswahl von Trainingsgebieten erfolgte unter Zuhilfenahme von Karten (TK 50, TK 25,



Abbildung 2: Schematische Darstellung der Prozessierungskette

TÜK 200), dem Digitales Situationsmodell und durch visuelle Interpretation der Signaturen in den multitemporalen ERS-1 Daten. Nach erfolgter automatischer Klassifikation mußte das Ergebnis verifiziert werden. Bedingt durch ähnliche Signaturen in manchen Landnutzungsklassen muß in der Regel,

in einem iterativen Prozeß von abwechselnder Trainingsgebiets-Definition und Verifikation des Klassifizierungsergebnisses, die Auswahl der Trainingsgebiete optimiert werden. Die Details der Klassifikation sind im Abschnitt 3.5 ausführlich erläutert.

Im letzten Schritt werden die Ergebnisse zu einem Mosaik zusammengefügt und mittels eines Relaxationsprozesses generalisiert. Das Mosaik erfolgt automatisiert ohne Interaktion durch den Operateur. Dies wird durch die automatische Georeferenzierung aller Bilder durch die entsprechenden Verarbeitungsmodule erreicht. Das Verfahren der Generalisierung durch Relaxation ist im Kapitel 3.6 beschrieben. Zum Zweck einer sinnvollen kartographischen Ausgabe des Endproduktes wird das Gesamtmosaik gemäß dem Blattschnitt der TÜK 200 zerlegt, wobei die Zerlegung ebenfalls ohne Interaktion durch den Operateur erfolgt.

Die gesamte Prozeßkette ist so konzipiert, daß nur wenige einfache Kommandos benötigt werden, um die entsprechenden Prozesse anzustoßen. Die Vorprozessierung geschieht in der Regel nachts und bedarf keinerlei Interaktion, abgesehen vom Einlesen der entsprechenden Szenen vom Band. Aufwendig dagegen ist die interaktive Bestimmung von Trainingsgebieten aus Karten und der Signatur der multitemporalen ERS-1 Szene. Da die überwachte Klassifikation die Möglichkeit bietet, durch Hinzufügen weiterer Trainingsgebiete eine Iteration durchzuführen, ist mit beliebigem Zeitaufwand sicherlich ein zunehmend besseres Ergebnis zu erzielen. Wir haben uns nach mehreren Versuchen - je nach Erfahrung des Operateurs - auf einen Zeitaufwand von fünf bis acht Stunden für die Klassifizierung eines Ausschnittes festgelegt. Diese zeitliche Beschränkung führt sicherlich dazu, daß die so entstandenen Ergebnisse etwas weniger perfekt sind als solche, die durch einen größeren Einsatz an Zeit in einem kleinen Ausschnitt entstehen können.

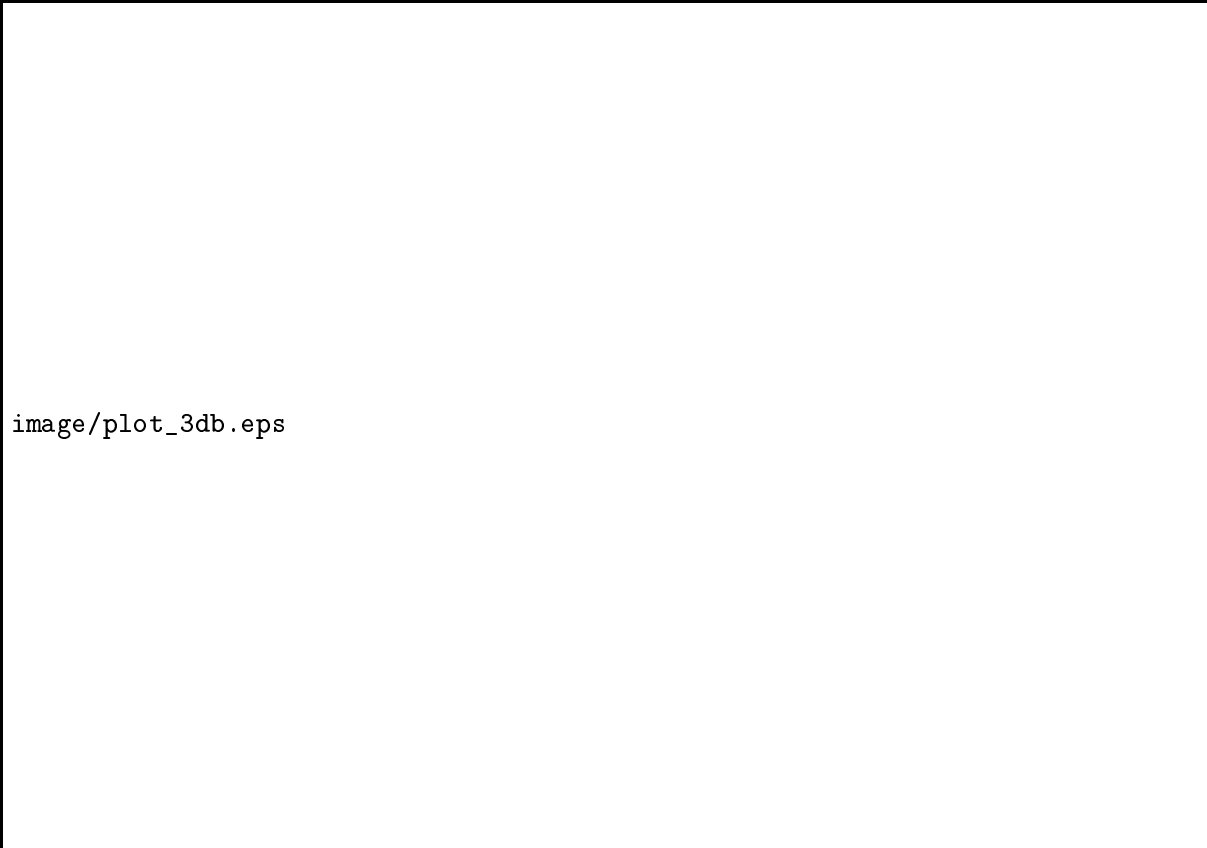
3.2 Qualitätskontrolle

Die vom D-PAF gelieferten ERS-1 Radar-Bilddaten wurden im ersten Schritt auf ihre Qualität hin untersucht. Dazu wurden verschiedene Verfahren implementiert und Untersuchungen durchgeführt. Die Verfahren wurden aus Effizienzgründen nur stichprobenartig auf die Daten angewandt, da sich die Datenqualität schnell als sehr konstant herausstellte. Aus der Vielzahl der in der Literatur beschriebenen Merkmale zur numerischen Charakterisierung der Qualität von geokodierten SAR-Bildern wurden für unsere Zwecke der Landnutzungsklassifikation die folgenden vier Verfahren ausgewählt.

3.2.1 Bewertung der geometrischen Bildqualität durch Messung der geometrischen Auflösung in Azimut- und Range-Richtung

Die geometrische Auflösung von SAR-Bildern wird gemäß [Pike, 1985] durch den Abstand zwischen den Signalpunkten in Azimut- und Range-Richtung mit einer um 3dB niedrigeren Intensität als der Hauptgipfel festgelegt. Diese -3dB-Strahlweiten-Definition entspricht in etwa dem Grad des System-Fokus in Azimut- und Range-Richtung. Da in digitalem Bildmaterial diese -3dB-Abstände nur bildelementgenau berechnet werden können, wird zur Erhöhung der Meßgenauigkeit zuvor noch eine Bildfunktionsinterpolation durchgeführt. Diese erfolgt durch eine Transformation des interessierenden Bildbereiches in den Frequenzraum und, nach der Erweiterung des Fourierspektrums um hohe Frequenzen ohne Auftretshäufigkeit (Zero-Padding), durch eine Rücktransformation in den Ortsbereich. Die Messung der geometrischen Auflösung darf streng genommen nur an im Bildmaterial auftretenden isolierten, kleinen, lokal hellen Punktzielen mit einem gering-reflektierenden, möglichst einheitlichen Hintergrund erfolgen. Da solche Targets (z.B. Corner-Reflektoren) i.a. nicht vorhanden sind, ermittelt man aus dem SAR-Bild solche punktähnlichen Bildteile entweder interaktiv, oder automatisch aufgrund ihrer Intensitätswerte mittels Schwellwertverfahren. Ein solches Verfahren wurde von [Roth, 1993] im Rahmen einer Studienarbeit beschrieben und implementiert.

Da Punktstrahler vor einem gering reflektierenden Hintergrund in der Praxis nur annäherungsweise vorhanden sind, wurde versucht, die Grenzauflösung aus der Häufigkeitsverteilung der gemessenen Auflösung zu extrahieren. Diese Häufigkeit der gemessenen -3dB-Strahlweiten in Range und Azimut



image/plot_3db.eps

Abbildung 3: Häufigkeit gemessener -3dB-Strahlweiten

ist in Abbildung 3 dargestellt, wobei sich Range und Azimut auf die Orientierung der geokodierten Bildmatrix beziehen und somit nicht exakt der tatsächlichen Range- und Azimutrichtung entsprechen. Die Tatsache, daß sehr viele Messungen eine Strahlweite weit über den erwarteten 25 Metern liefern, ist auf die nicht idealen Punktstrahler zurückzuführen, die hier vermessen wurden. Im unteren Bereich müßte die Kurve jedoch die Grenzauflösung approximieren. Bei dieser Interpretation der Messung liegt die -3dB-Strahlweite—und damit die Grenzauflösung des SAR-Systems—deutlich unter 30 Meter.

3.2.2 Bewertung der radiometrischen Bildqualität durch Messung der Nebengipfeldämpfung in Azimut- und Range-Richtung

Nach [Pike, 1985] ist die Güte einer SAR-Signalabbildung umso besser, je ausgeprägter der Hauptgipfel und je weniger ausgeprägt die Nebengipfel der realen Antennen-Charakteristik des SAR-Sensors sind. Als Meßgröße wird die sogenannte Nebengipfeldämpfung in Azimut- und Range-Richtung verwendet, also der Quotient aus der minimalen Intensitätsdifferenz zwischen Haupt- und Nebengipfel und der Intensität des Hauptgipfels. Aufgrund des Fehlens der theoretisch notwendigen Corner-Reflektoren wird die Nebengipfeldämpfung approximativ — wie oben — entweder anhand von interaktiv ausgewählten punktförmigen Returns oder anhand einer Menge automatisch ausgewählter, prägnanter Peaks gemessen. Die Nebengipfeldämpfung betrug bei automatisch ausgewählten Peaks im Mittel ca. -13 dB in Range- und in Azimutrichtung. Hierbei wurden Ausreißer in den Meßreihen beseitigt, wobei keine eindeutige Abgrenzung fehlerhafter Messungen gefunden werden konnte.

3.2.3 Einfache globale statistische Untersuchungen

Die gelieferten ERS-1 Szenen werden durch Berechnung der Mittelwerte, der Standardabweichungen und der Verteilung der Grauwerte im Histogramm charakterisiert. Für die erste zur Verfügung stehende Gesamtszene sowie dem ausgewählten Testgebiet ergeben sich die in Tabelle 1 gezeigten Resultate.

	Vollszene	Testgebiet
Wertebereich [Bit/Pixel]	16	8
Mittelwert	291.68	34.19
Standardabweichung	309.35	22.49
Median	285.00	29.00
Grauwert-Dynamik	27997	256

Tabelle 1: Globale statistische Werte

3.2.4 Untersuchung der Genauigkeit der Geokodierung

Grundvoraussetzung für die unerläßliche multitemporale Arbeitsweise ist die pixelgenaue Überlagerung der ERS-1 Bilddaten untereinander und mit den beschriebenen Kontextdaten. Da alle Kontextdaten letztlich auf den topographischen Karten basieren, wird in diesem Schritt die Genauigkeit der Geokodierung, bezogen auf die topographische Karte analysiert. Dazu werden interaktiv, möglichst gleichmäßig über dem gesamten Bild verteilt, Paßpunkte im Radarbild und in den entsprechenden topographischen Karten identifiziert und durch Anwendung einer Transformation 1. Ordnung die resultierenden RMS Residuen berechnet. Residuen im Bereich von einem Pixel zeichnen dann eine geometrisch einwandfreie SAR-Szene aus. Bei höheren Werten sind eine Überlagerung der ERS-1 Bilder mit dem zugehörigen DGM-, DSM- und Naturraum-Ausschnitt und die multitemporale Überlagerung mehrerer ERS-1 Szenen fragwürdig. Für eine geländekorrigierte Gesamtszene wurde eine Überprüfung der Geometrie durchgeführt. Es wurden Paßpunkte im ERS-1 Bild und der topographischen Karte TK50 identifiziert und durch eine affine Transformation die resultierenden Residuen bestimmt.

Tabelle 2 gibt die erzielten, ihrer Güte nach geordneten Residuen-Werte bei einem um Ausreißer bereinigten Paßpunkt-Satz wieder (1 Pixel entspricht 12.5 Meter), in Abbildung 4 ist die Lage der Residuen im Bild graphisch dargestellt.

3.3 Radiometrische Korrektur von Beleuchtungseffekten aufgrund der Hangneigung

Ein zentrales Problem bei der Auswertung von Radarbildern ist die Abhängigkeit der Rückstreuung von der lokalen Geländeneigung. Unterschiedliche Geländeneigung im Bezug auf die Blickrichtung des SAR-Sensors führt unter sonst gleichen Bedingungen alleine schon zu stark veränderten Grauwerten. Dieser topographische Effekt muß, falls er nicht korrigiert wird, zu größeren Fehlern bei der Klassifikation der Radardaten hinsichtlich verschiedener Oberflächentypen führen. Ziel dieses Verarbeitungsschrittes ist es deshalb, anhand verschiedener Rückstreumodelle sowie einer pixelgenauen DGM-Überlagerung der abgebildeten ERS-1 Szene eine solche Bildkorrektur durchzuführen. Steht der entsprechende paßgenaue DSM-Ausschnitt auch zur Verfügung, so kann die Bildkorrektur entsprechend den DSM-Oberflächenbedeckungen klassenspezifisch erfolgen; ansonsten wird eine klassenunspezifische Korrektur der Variation der Bildsignalintensitäten in Abhängigkeit von der Geländeneigung durchgeführt. Mit den so radiometrisch korrigierten Bilddaten stehen für die automatische Klassifikation von der Geländeneigung weitgehend unabhängige Grauwertemittel zur statistischen Analyse der einzelnen Landnutzungsklassen zur Verfügung. Aufbauend auf den Arbeiten von [Bayer, 1990] wurde am IPF das Programmpaket KORSAR zur Korrektur des Reliefeinflusses implementiert ([Hermann, 1992]).

Nr.	Passpunkte (METER)		Passpunkte (PIXEL)		Residuen (PIXEL)	
1	3482800.0	447000.0	5119.5	2607.5	1.503	2.205
4	3480900.0	447350.0	4968.5	2632.5	2.486	-0.777
11	3471850.0	436100.0	4241.5	1734.5	-1.778	-1.089
8	3498925.0	444625.0	6408.5	2413.5	0.700	-1.837
14	3443700.0	453425.0	1991.5	3120.5	1.086	1.430
2	3478250.0	447650.0	4752.5	2656.5	-1.555	-0.787
5	3485900.0	452050.0	5364.5	3009.5	-0.955	1.219
17	3450800.0	442475.0	2560.5	2244.5	1.265	-0.427
9	3490825.0	445500.0	5759.5	2486.5	-0.429	1.125
15	3447775.0	455900.0	2315.5	3315.5	-0.582	-1.010
10	3495550.0	447700.0	6136.5	2660.5	-1.105	-0.350
16	3440950.0	453900.0	1769.5	3156.5	-0.941	-0.550
13	3467975.0	426575.0	3934.5	976.5	0.249	1.047
6	3486550.0	450900.0	5417.5	2917.5	-0.043	1.021
3	3477350.0	447600.0	4681.5	2652.5	-0.583	-0.819
7	3494500.0	447600.0	6054.5	2652.5	0.858	-0.394
12	3476000.0	430600.0	4575.5	1296.5	-0.176	-0.007
RMS					1.138	1.086

Tabelle 2: Residuen (in Pixel)

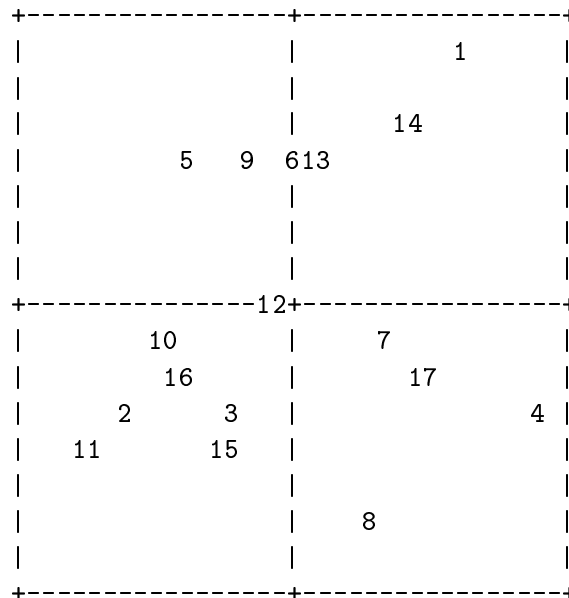


Abbildung 4: Graphische Darstellung der Residuen

Dort stehen verschiedene statistische Modelle der geländeabhängigen Rückstreuung für eine Korrektur zur Verfügung. Einzelheiten zu dem Verfahren wurden auch in [Tex und Sties, 1993b] veröffentlicht.

3.3.1 Korrekturprinzip

Ziel der Korrektur ist es, ein von der Geländeneigung unabhängiges Grauwertmittel für verschiedene Bodenbedeckungsklassen zu erhalten. Als Zielwert eignet sich dafür der Grauwert, welcher der Radarrückstreuung einer horizontalen Fläche entspricht. Die Referenzwerte für die einzelnen geometrischen Parameter definieren sich dann wie folgt (siehe [Bayer, 1990]; [Leberl, 1990]) :

Parameter	Referenzwert
lokaler Einfallswinkel	<i>variabler look angle</i>
Komponente in Range	<i>variabler look angle</i>
Komponente in Azimut	0^0
max. Hangneigung	0^0
Exp. zum Sensor	90^0

Die korrigierten Grauwerte lassen sich dann mittels einer parameterabhängigen Korrekturfunktion $K(\theta)$ [Bayer, 1990] unter Veränderung der Varianz berechnen:

- *Funktionswert* > *Zielwert* → *Varianzverkleinerung*
- *Funktionswert* < *Zielwert* → *Varianzvergrößerung*

$$K(\theta) = \frac{\text{Zielgrauwert } f(\text{incl}_{loc})}{\text{Funktionswert } f(\theta)}$$

$$\text{Grauwert}_{\text{korr}} = \text{Grauwert}_{\text{org}} \cdot K(\theta)$$

Zur Korrektur des neigungsabhängigen Grauwertes werden in der Literatur eine Anzahl von Modellen aufgelistet. Eine übersichtliche Zusammenfassung findet sich in [Bayer, 1990]. Die Modelle der Rückstreuung von rauhen Oberflächen werden in der Literatur in drei Kategorien gegliedert:

- Geometrische Modelle
- Statistische Modelle
- Halbempirische Modelle

Aus der Klasse der halbempirischen Modelle wurden die unten aufgelisteten implementiert und auf ihre Eignung zur Korrektur verschiedene Bodenklassen analysiert. Sie lassen sich in 4 große Klassen einteilen.

1. Aus der Klasse der Polynomischen Modelle:

LINEAR : *lineare Regression*

$$g = a + b \cdot \text{incl}_{loc} \quad (1)$$

POLY2 : *Polynom 2. Ordnung*

$$g = a + b \cdot \text{incl}_{loc} + c \cdot \text{incl}_{loc}^2 \quad (2)$$

POLY3 : *Polynom 3.Ordnung*

$$g = a + b \cdot inc_{loc} + c \cdot inc_{loc}^2 + d \cdot inc_{loc}^3 \quad (3)$$

2. Aus der Klasse der Kosinusmodelle

KOS : *Clapp (1946)*

$$g = a + b \cdot \cos(inc_{loc}) \quad (4)$$

KOS2 : *Clapp (1946)*

$$g = a + b \cdot (\cos(inc_{loc}))^2 \quad (5)$$

KOSQ : *Teillet et al. (1983)*

$$g = a + b \cdot (\cos(inc_{loc}))^c \quad (6)$$

KOSQOFF : *abgewandeltes Modell 6*

$$g = a + b \cdot (\cos(inc_{loc} + d))^c \quad (7)$$

LOGTRIG : *Keydel (1976)*

$$g = a + \log_{10} \left(\frac{\cos(inc_{loc})^{(b+1)}}{\sin(inc_{loc})^c} \right) \quad (8)$$

3. Aus der Klasse der Mittelwertmodelle

AVGINC : *Mittlerer Grauwert je Einfallswinkel*

$$g = \bar{g}_{inc_{loc}} \quad (9)$$

AVGSLP : *Mittlerer Grauwert je Hangneigungswinkel*

$$g = \bar{g}_{slp} \quad (10)$$

AVGEXP : *Mittlerer Grauwert je Expositionswinkel relativ zum Sensor*

$$g = \bar{g}_{exp} \quad (11)$$

4. Aus der Klasse der Bivariablen Modelle

INCOMP : *Einfallswinkelkomponenten*

$$g = a + b \cdot inc_{ra} + c \cdot inc_{az} + d \cdot inc_{ra}^2 + e \cdot inc_{az}^2 + f \cdot inc_{ra} \cdot inc_{az} \quad (12)$$

SLPEXP : *Hangneigungsparameter*

$$g = a + b \cdot slp_{max} + c \cdot exp_{sen} + d \cdot slp_{max}^2 + e \cdot exp_{sen}^2 + f \cdot slp_{max} \cdot exp_{sen} \quad (13)$$

mit :

g	=	theoretischer Bildgrauwert
inc_{loc}	=	lokaler Einfallswinkel [rad]
inc_{ra}	=	Komponente des lokalen Einfallswinkels in Range [rad]
inc_{az}	=	Komponente des lokalen Einfallswinkels in Azimut [rad]
slp_{max}	=	maximale Hangneigung [rad]
exp_{sen}	=	Exposition relativ zum Sensor [rad]
\bar{g}_{slp}	=	mittlerer Grauwert je Hangneigungswinkel
\bar{g}_{exp}	=	mittlerer Grauwert je Expositionswinkel
$\bar{g}_{inc_{loc}}$	=	mittlerer Grauwert je lokalem Einfallswinkel
a, b, c, d, e, f	=	Anpassungsparameter der Funktionen

Kosinusmodelle

Das einfache Kosinusmodell entsteht durch die Tatsache, daß die wirksame Radarquerschnittsfläche σ die Projektion der wirklichen Fläche in die einfallende Wellenfront ist (Modell: **KOS**). Geht man zusätzlich davon aus, daß die Rückstreuung auch nach dem Kosinusetz erfolgt, so verhält sich die rückgestreute Energie $\sim \cos^2$ (Modell: **KOS2**) [Elachi, 1987]. Neben den rein geometrischen Einflüssen bestehen zusätzlich noch komplexere Zusammenhänge zwischen dem lokalen Einfallswinkel θ und z.B. der verwendeten Frequenz, der Polarisation (HH, VV...) und dem Rückstreuoeffizienten $\sigma_0 \sim f(\theta)$ einer natürlichen Oberfläche. Für *rauhe* Oberflächen ergeben sich dann schon Proportionalitäten zwischen Einfallswinkel und Radarrückstreuung von $\sim \cos^q$ (Modell: **KOSQ**). In anderen Ansätzen werden für den Rückstreuoeffizient σ_0 folgende Proportionalitäten angegeben [Leberl, 1990] (Modell: **LOGTRIG**):

$$\sigma_0(\theta) \sim \frac{\cos^m(\theta)}{\sin^n(\theta)}$$

(generalisiertes Lambertmodell) oder

$$\sigma_0(\theta) \sim \log_{10} \frac{\cos(\theta)}{\sin(\theta) + \cos(\theta)^3}$$

(Modell von Muhleman).

Polynomische Modelle

Da sich das Verhalten der Radarrückstreuung natürlicher Oberflächen schwer durch eine explizite Formel darstellen läßt, bietet sich die Verwendung von Näherungslösungen an, die zwar keinen theoretischen Hintergrund haben, aber dem empirischen, neigungsabhängigen Grauwertverlauf eines Bildes gut angepaßt werden können. An erster Stelle steht dabei eine lineare Regression bzw. eine Polynomapproximation (Modell: **LINEAR**, **POLY2** und **POLY3**).

Mittelwertmodelle

In die Kategorie der Näherungslösungen fallen ebenfalls die Mittelwertmodelle. Hierbei wird jedoch kein funktionaler Zusammenhang zwischen den Grauwertmitteln benachbarter Hangneigungen hergestellt, sondern jede Hangneigungsklasse ist ein eigener Merkmalsraum, der aus den Bildgrauwerten ermittelt und auf den Zielgrauwert (der ebenen Fläche) transformiert wird.

Bivariable Modelle

Wie oben gezeigt, ist die Interaktion zwischen Radarwelle und Oberfläche kein eindimensionaler Vorgang, sondern in der Regel ein zweidimensionales, flächenhaftes Ereignis. Einen Versuch, diesen Aspekt zu berücksichtigen, sind die bivariablen Modelle **INCOMP** und **SLPASP**. Sie stellen quadratische Regressionsflächen dar, die von [Bayer, 1990] analog zu dem monovariablen Polynom zweiten Grades aufgestellt wurden. Dabei bestehen die Komponenten des Modells **INCOMP** aus den Einfallswinkelkomponenten in Range und Azimut, d.h. sie beschreiben die flächenhafte Projektion des getroffenen Oberflächenelementes (single resolution cell) in die einfallende Wellenfront. Das Modell **SLPEXP** benutzt die beiden unabhängigen Komponenten maximale Hangneigung und deren Exposition zum Sensor zur Beschreibung der Geometrie zwischen Radarstrahl und Geländeexposition und damit der unterschiedlichen Intensität der von dort zurückkommenden Strahlungsenergie.

3.3.2 Vergleich verschiedener Modelle zur Beschreibung der geländeabhängigen Radarrückstreuung

Um ein optimales Verfahren für die radiometrische Korrektur zu verwenden, wurden die beschriebenen Modelle bezüglich ihrer Korrekturergebnisse an einer ERS-1 Szene miteinander verglichen ([Hermann, 1992]). Insgesamt wurden 708 000 Pixel ausgewertet. Die Verteilung der Pixel auf die Klassen ist aus Tabelle 3 ersichtlich. Innerhalb der untersuchten Szene ergab sich nur für die drei Klassen

Klasse	Pixelanzahl		prozentualer Anteil
Siedlung	: 51443	≈	7 %
Boden	: 236678	≈	33 %
Mischwald	: 411836	≈	58 %
Nadelwald	: 374	≈	0.05 %
Laubwald	: 7184	≈	1 %
Steinbruch	: 485	≈	0.05 %

Tabelle 3: Verteilung der Pixel auf die Klassen

Siedlung, **Boden** und **Mischwald** eine ausreichende Grundgesamtheit zur statistischen Analyse. Eine getrennte Betrachtung der klassenunspezifischen Korrektur ist schwierig, da sie in hohem Maße (58 %) mit der Klasse **Mischwald** korreliert ist. Trotzdem soll sie aus Vollständigkeitsgründen mit aufgeführt werden.

Die Güte zwischen der gewählten Funktion und den Daten (Grauwerten), die sie modellieren soll, kann durch die mittlere quadratische Abweichung MVV zwischen Funktionswert und Istwert an den Stützstellen beschrieben werden:

$$MVV = \frac{SUMVV}{n_{Stützstellen}}$$

FNR	Nr. der Korrekturfunktion
SUMVV	Verbesserungsquadratsumme zwischen Istwerten und Funktionswerten
MVV	mittlere quadratische Abweichung pro Stützstelle
$n_{Stützstellen}$	Anzahl der Stützstellen

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 4 und 5 dargestellt. Für das Modell KOSQOFF (7), konnte keine Anpassung der Funktion an die Daten gefunden werden: dies deutet auf ein in der Praxis nicht relevantes Modell hin, da sich Daten und Modell nicht im Einklang befinden. Die Tabellen 4 und 5 (wie auch alle folgenden Tabellen) enthalten aus diesem Grund keinen Eintrag in der entsprechenden Zeile. Bei den Mittelwertmodellen (9,10 und 11) entspricht der Funktionswert dem Istwert an der Stützstelle,

so daß für diese Modelle keine Abweichung berechnet werden kann. Vergleicht man die erhaltenen

Klasse : 0 \equiv Alle			Klasse : 3 \equiv Mischwald		
FNR	SUMVV	MVV	FNR	SUMVV	MVV
1	317	6.5	1	289	6.0
2	284	5.8	2	289	6.0
3	273	5.6	3	262	5.5
4	2495	51	4	2026	42.2
5	9824	200	5	8685	181.0
6	264	5.4	6	271	5.6
7	–	–	7	–	–
8	309	6.3	8	301	6.3
9	–	–	9	–	–
10	–	–	10	–	–
11	–	–	11	–	–
12	3827	7.3	12	4391	8.6
13	2317	3.5	13	2452	4.1

Tabelle 4: Mittlere Quadratische Abweichung der Interpolationsfunktion

Klasse : 1 \equiv Siedlung			Klasse : 2 \equiv Boden		
FNR	SUMVV	MVV	FNR	SUMVV	MVV
1	572	21	1	457	12.0
2	467	17	2	229	5.8
3	177	6.5	3	218	5.7
4	814	30	4	900	23.6
5	2183	81	5	2967	78.1
6	556	21	6	277	7.3
7	–	–	7	–	–
8	446	16.5	8	255	6.7
9	–	–	9	–	–
10	–	–	10	–	–
11	–	–	11	–	–
12	1433	19.6	12	1611	6.8
13	1082	14.1	13	1218	4.5

Tabelle 5: Mittlere Quadratische Abweichung der Interpolationsfunktion

Werte, so fällt sofort das schlechte Anpassungsvermögen (4 bis 30 mal schlechter) der beiden einfachen Kosinusfunktionen (4 \equiv **KOS** und 5 \equiv **KOS2**) in Relation zu allen übrigen Funktionen auf. Dies deutet auf eine schlechte bzw. zu einfache Modellbildung hin.

Ein Kriterium des Korrekturerfolges ist das Verhalten des winkelabhängigen Grauwertmittels. Nachfolgend sind alle berechneten Grauwertmittel einer Klasse und ihre Standardabweichung vor und nach der Korrektur aufgetragen. Dabei bedeutet eine kleinere Standardabweichung eine Verbesserung.

Die Veränderung ist im Vergleich zur unkorrigierten Standardabweichung in Prozent angegeben. Negative Prozentzahlen deuten auf eine homogenes Verhalten der hangneigungsabhängig berechneten Grauwertmittel hin. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 6 bis 9 dargestellt.

Klasse : 0 \equiv Alle					
	unkorrigiert		korrigiert		Varianzänderung
FNR	AVG	STD	AVG	STD	\pm
1	63.9	3.48	63.8	2.62	-24.7 %
2	"	"	63.0	2.45	-29.6 %
3	"	"	63.2	2.41	-30.7 %
4	"	"	67.8	8.12	+133.3 %
5	"	"	73.8	19.6	+463.2 %
6	"	"	63.0	2.40	-31.0 %
7	"	"	*	*	
8	"	"	63.2	2.57	-26.1 %
9	"	"	60.8	0.58	-83.3 %
10	63.6	0.83	61.8	0.14	-83.1 %
11	63.5	3.01	61.9	0.11	-96.3 %
12	63.8	3.65	62.5	2.81	-23.0 %
13	63.6	3.29	61.4	1.83	-44.4 %

Tabelle 6: Klassen-Mittelwerte und Standardabweichungen

Klasse : 1 \equiv Siedlung					
	vor Korrektur		nach Korrektur		Varianzänderung
FNR	AVG	STD	AVG	STD	\pm
1	71.2	4.81	71.0	4.63	-3.7 %
2	"	"	73.1	4.36	-9.4 %
3	"	"	74.5	2.76	-42.6 %
4	"	"	72.4	5.51	+14.5 %
5	"	"	74.4	9.32	+93.8 %
6	"	"	71.1	4.87	+1.2 %
7	"	"	*	*	
8	"	"	73.3	4.22	-12.6 %
9	"	"	76.4	1.87	-61.1 %
10	71.1	5.74	80.2	0.27	-95.3 %
11	72.9	4.94	80.1	0.28	-94.3 %
12	74.2	6.66	78.4	4.88	-26.7 %
13	75.6	5.94	81.8	4.03	-32.2 %

Tabelle 7: Klassen-Mittelwerte und Standardabweichungen

Eine Bewertung der Varianzminderung des neigungsabhängigen Grauwertmittel bestätigt die schlechte Anpassungsfähigkeit der Funktionen (4) und (5); statt eines homogenen Verhaltens der Mittelwerte kommt es zu Überkorrekturen bis zum 4-fachen der unkorrigierten Werte vor allem im Bereich exponierter Hänge. Die besten Werte zeigen natürlich die diskreten Mittelwertmodelle. Theoretisch müßte hier sogar der Wert -100% stehen. Er wird jedoch nicht erreicht, da erst Hangneigungsklassen ab 100 Grauwerten zur Mittelwertbildung erfaßt wurden, und die anderen Klassen die

Klasse : 2 \equiv Boden					
	vor Korrektur		nach Korrektur		Varianzänderung
FNR	AVG	STD	AVG	STD	\pm
1	59.5	4.56	59.2	3.41	-25.2 %
2	"	"	56.5	2.28	-50.0 %
3	"	"	56.6	1.92	-50.0 %
4	"	"	60.8	5.35	+17.3 %
5	"	"	63.2	11.29	+147.6 %
6	"	"	57.2	2.52	-44.8 %
7	"	"	*	*	
8	"	"	56.7	2.41	-47.1 %
9	"	"	54.3	0.50	-89.0 %
10	59.4	2.26	55.5	0.14	-93.8 %
11	58.6	3.80	55.5	0.10	-97.4 %
12	58.2	4.00	55.0	2.45	-38.8 %
13	58.2	4.21	52.8	1.95	-53.7 %

Tabelle 8: Klassen-Mittelwerte und Standardabweichungen

Klasse : 3 \equiv Mischwald					
	vor Korrektur		nach Korrektur		Varianzänderung
FNR	AVG	STD	AVG	STD	\pm
1	64.8	3.55	64.8	2.53	-28.7 %
2	"	"	64.8	2.53	-28.7 %
3	"	"	65.1	2.43	-31.5 %
4	"	"	68.7	7.64	+115.2 %
5	"	"	74.6	19.07	+437.2 %
6	"	"	64.7	2.45	-31.0 %
7	"	"			
8	"	"	65.0	2.59	-27.0 %
9	"	"	63.4	0.33	-90.7 %
10	64.5	0.67	62.8	0.14	-79.1%
11	64.8	3.18	63.1	0.12	-96.2 %
12	64.8	3.92	64.2	2.87	-26.8 %
13	64.8	3.56	64.5	2.02	-43.2 %

Tabelle 9: Klassen-Mittelwerte und Standardabweichungen

Originalwerte erhalten. Weiterhin zeigt sich, daß die Klasse **Boden** für alle Korrekturansätze die besten Werte liefert, gefolgt von der Klasse **Wald** und (mit Abstand) der Klasse **Siedlung**. Bei der Klasse **Siedlung** zeigt sich auch, daß die Verwendung eines Polynoms 3.Ordnung immer gute Ergebnisse produziert, obwohl hier keine sinnvolle Interpretation des Kurvenverlaufes möglich ist.

Als ein weiteres Gütekriterium einer Korrektur ist eine Abnahme der Varianz innerhalb einer Klasse zu erwarten. In [Bayer, 1990] sind einige Untersuchungsergebnisse zitiert. Die besten lagen bei über 60 % Varianzminderung, während andere nur zwischen 8 % und 38 % der Varianz auf einen variierenden Einfallswinkel zurückführen. [Bayer, 1990] selbst erreicht eine Varianzminderung von maximal 6 % im Gesamtausschnitt und bis zu 13% in den Einzelklassen. Eine Anwendung dieses Kriteriums auf die prozessierten Grauwerte zeigt eine schwache, aber in ihrer Tendenz dem Trend der anderen Kriterien

folgende Ab- bzw. Zunahme der Varianz, wie aus den Tabellen 10 und 11 ersichtlich ist.

Klasse : 0 \equiv Alle			Klasse : 1 \equiv Siedlung		
FNR	STD	+/-	FNR	STD	+/-
Orig	27.893	-	Orig	40.760	-
1	27.848	-0.2 %	1	40.703	-0.1 %
2	27.769	-0.4 %	2	40.914	+0.4 %
3	27.783	-0.4 %	3	41.017	+0.6 %
4	28.163	+0.9 %	4	40.641	-0.3 %
5	29.128	+4.4 %	5	40.697	-0.2 %
6	27.745	-0.5 %	6	41.281	+1.3 %
7	-	-	7	*	*
8	27.801	-0.3 %	8	40.936	+0.4 %
9	27.193	-2.5 %	9	41.656	+2.3 %
10	27.484	-1.5 %	10	42.002	+3.1 %
11	27.264	-2.3 %	11	41.790	+2.5 %
12	27.570	-1.2 %	12	48.089	+18.0 %
13	27.031	-3.1 %	13	47.266	+16.0 %

Tabelle 10: Veränderung der Klassen-Varianz durch die Korrektur

Klasse : 2 \equiv Boden			Klasse : 3 \equiv Mischwald		
FNR	STD	+/-	FNR	STD	+/-
Orig.	25.797		Orig.	26.198	-
1	25.692	-0.4 %	1	26.160	-0.1 %
2	25.420	-1.5 %	2	26.160	-0.1 %
3	25.407	-1.5 %	3	26.205	0.0 %
4	25.810	+0.1 %	4	26.654	+1.7 %
5	26.166	+1.4 %	5	28.095	+7.2 %
6	25.484	-1.2 %	6	26.137	-0.2 %
7	*	*	7	*	*
8	25.469	-1.3 %	8	26.189	0.0 %
9	24.691	-4.2 %	9	25.658	-2.1 %
10	25.163	-2.5 %	10	25.470	-2.8 %
11	24.969	-3.2 %	11	25.379	-3.1 %
12	24.770	-4.0 %	12	25.965	-0.9 %
13	23.835	-7.6 %	13	25.993	-0.8 %

Tabelle 11: Veränderung der Klassen-Varianz durch die Korrektur

Die beiden einfachen Kosinusmodelle (4) und (5) haben durchweg einen negativen Korrektoreinfluß. Dies drückt sich sowohl im Wert MVV der Anpassungsgüte, als auch in der prozentualen Zunahme des neigungsabhängigen Grauwertmittels und der Varianz aus. Sie repräsentieren somit die realen Grauwerte recht schlecht. Dieses Ergebnis findet sich in der Literatur bestätigt (siehe [Bayer, 1990]). Ein erster positiver Korrekturerfolg läßt sich schon mit einer einfachen linearen Regression erreichen. Der Übergang zu Polynomen zweiter und dritter Ordnung bringt in der Regel einen Gewinn für die Korrektur, obwohl die Funktion dabei nicht nur den erwarteten Grauwertabfall mit zunehmendem

Einfallswinkel modelliert, sondern sich auch den lokalen Überlagerungen zufälliger Grauwertschwankungen anpaßt. Die etwas komplexeren trigonometrischen Funktionen (6) und (8) weisen ebenfalls einen positiven Korrektoreffekt auf. Sie liegen in ihrer Güte zwischen der linearen Regression und den Polynomen höherer Ordnung. Die mit Abstand besten Ergebnisse erhält man auf den ersten Blick durch Anwendung der Mittelwertmodelle, da die Anpassungs-Funktion hier keinen Zwängen unterliegt, sondern eine diskrete Funktion der Mittelwerte darstellt. Dadurch erfolgt aber eine totale Anpassung an lokale, zufällige Grauwertschwankungen, die nicht mehr als typisch für die parameterabhängige Rückstreuung angesehen werden können. Insbesondere bei Ungenauigkeiten des überlagerten Höhenmodells durch Ungenauigkeiten in der Geokodierung entstehen Ausreißer in der Korrekturfunktion, die eine Anpassung an eine mathematische Funktion dringend erforderlich machen. Da die Qualität des verwendeten Höhenmodells in der Praxis sehr unterschiedlich ist, können die theoretisch guten Ergebnisse der Mittelwertmodelle in einer auf Robustheit ausgelegten Verarbeitungskette keine Verwendung finden. Die Bivariablen Modelle (12) und (13) zeigen neben den Mittelwertmodellen die zweitbesten Korrekturergebnisse. Sie haben sowohl die kleinsten Werte der Anpassungsgüte (MVV) aller funktionalen Modelle, als auch das besten Verhalten bzgl. der Minderung der Grauwertmittelvarianz und der Klassenvarianz (-7.0 %).

Als besonders geeignet für die radiometrische Korrektur gelten somit folgende Modelle:

- Polynom zweiten Grades des lokalen Einfallswinkels
- Polynom dritten Grades des lokalen Einfallswinkels
- Zweidimensionale Funktion zweiten Grades des lokalen Einfallswinkels in Range- und Azimutrichtung
- Zweidimensionale Funktion zweiten Grades der maximalen Hangneigung und der Exposition zum Sensor.

Die Unterschiede bezüglich dieser Verfahren sind am praktischen Beispiel so geringfügig, daß sie durch visuelle Interpretation nicht wahrgenommen werden können. Es bietet sich daher an, das einfachste bzw. schnellste dieser Verfahren für eine Korrektur zu verwenden: dies wäre das Polynom zweiten Grades. Da hier eine einfache Funktion durch die Mittelwerte der Hangneigungsklassen gelegt wird, werden einzelne Ausreißer der Mittelwerte an ihre benachbarten Klassen angepaßt. Durch die Verbindung der Hangneigungsklassen untereinander erreicht man so eine größere Sicherheit bezüglich der berechneten Statistik. Hierzu ist als Parameter lediglich der lokale Einfallswinkel erforderlich. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit der Korrektur mit der von der DLR/D-PAF für einige Szenen zur Verfügung stehenden Maske des lokalen Einfallswinkels (GIM). Insbesondere entfällt dadurch auch die Berechnung der geländeabhängigen Parameter, was eine etwas schnellere Prozessierung der Daten zur Folge hat.

Der empfindlichste Parameter bezüglich der radiometrischen Korrektur ist die pixelgenaue Überlagerung der ERS-1 Daten mit denen des GIM beziehungsweise des DGM. Einzelne Messungen im Bereich steiler Hänge ergaben hierbei Abweichungen von bis zu drei Pixeln bei einem Raster von 25 m x 25 m pro Pixel. Könnten diese Abweichungen, die sowohl im GIM als auch im DGM auftreten, noch reduziert werden, so würde dadurch das Ergebnis der Korrektur deutlich verbessert. Der Effekt der radiometrischen Korrektur ist in Abbildung 5 dargestellt. Links ist der originale ERS-1 Ausschnitt der Größe 350 x 400 Pixel im Bereich südlich von Karlsruhe zu sehen, rechts derselbe Ausschnitt radiometrisch korrigiert. Verwendet wurde ein Polynom zweiten Grades als Korrekturfunktion.

3.3.3 Klassenspezifische Korrektur

Die qualitative Tendenz (Verbesserung/Verschlechterung) des korrigierenden Einflusses aller betrachteten Funktionen ist für die Klassen **Mischwald** und **Boden** etwa gleich. Unterschiede zeigen sich aber in der Größenordnung des Korrektoreffektes. So sind die erzielten Korrekturwerte der Klasse

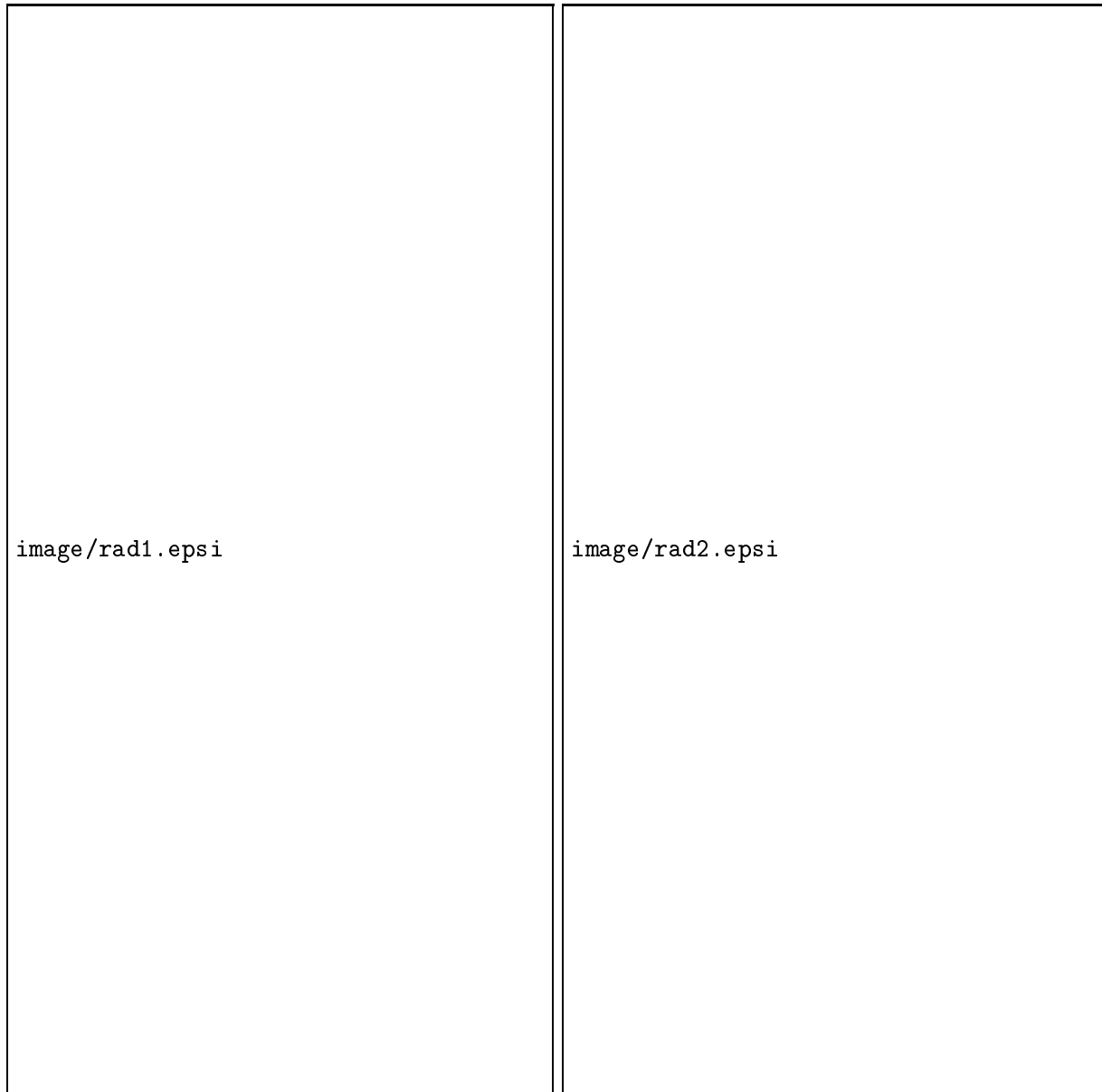


Abbildung 5: Radiometrische Korrektur

Boden immer besser als die vergleichbaren Werte der Klasse **Mischwald**. Dagegen zeigt die Klasse **Siedlung** besonders in der Varianzveränderung fast durchweg eine Zunahme der Werte und für die Verbesserung der Mittelwerte eine kleinere prozentuale Abnahme als die beiden anderen Klassen. Das unterschiedliche Verhalten der einzelnen Klassen läßt sich durchaus mit den theoretischen Ansätzen der neigungsabhängigen Rückstreuung und der daraus abgeleiteten Korrekturfunktionen erklären. Die Klasse **Boden** entspricht am besten dem theoretischen zweidimensionalen Modell eines Geländes mit vielen Facetten in unterschiedlicher Ausrichtung zum Sensor und damit einer direkten Abhängigkeit der wirksamen Radarrückstreufläche und ihrer beschreibenden Parameter (lokaler Einfallswinkel, ...) auf die Grauwerte. Für die Klasse **Mischwald** oder Wald im allgemeinen ist eine solche Erklärung nicht mehr ganz zutreffend. Hier handelt es sich um eine dreidimensionale Struktur, deren Rückstreuung eine Mischung aus neigungsabhängigen und neigungsunabhängigen Komponenten ist. Radarstrahlung, die direkt vom Boden rückgestreut wird, vermischt sich mit Boden/Stammstreuung und der diffusen Kronenstreuung. Die Klasse **Siedlung** weist keine, durch eine Hangneigungskorrektur

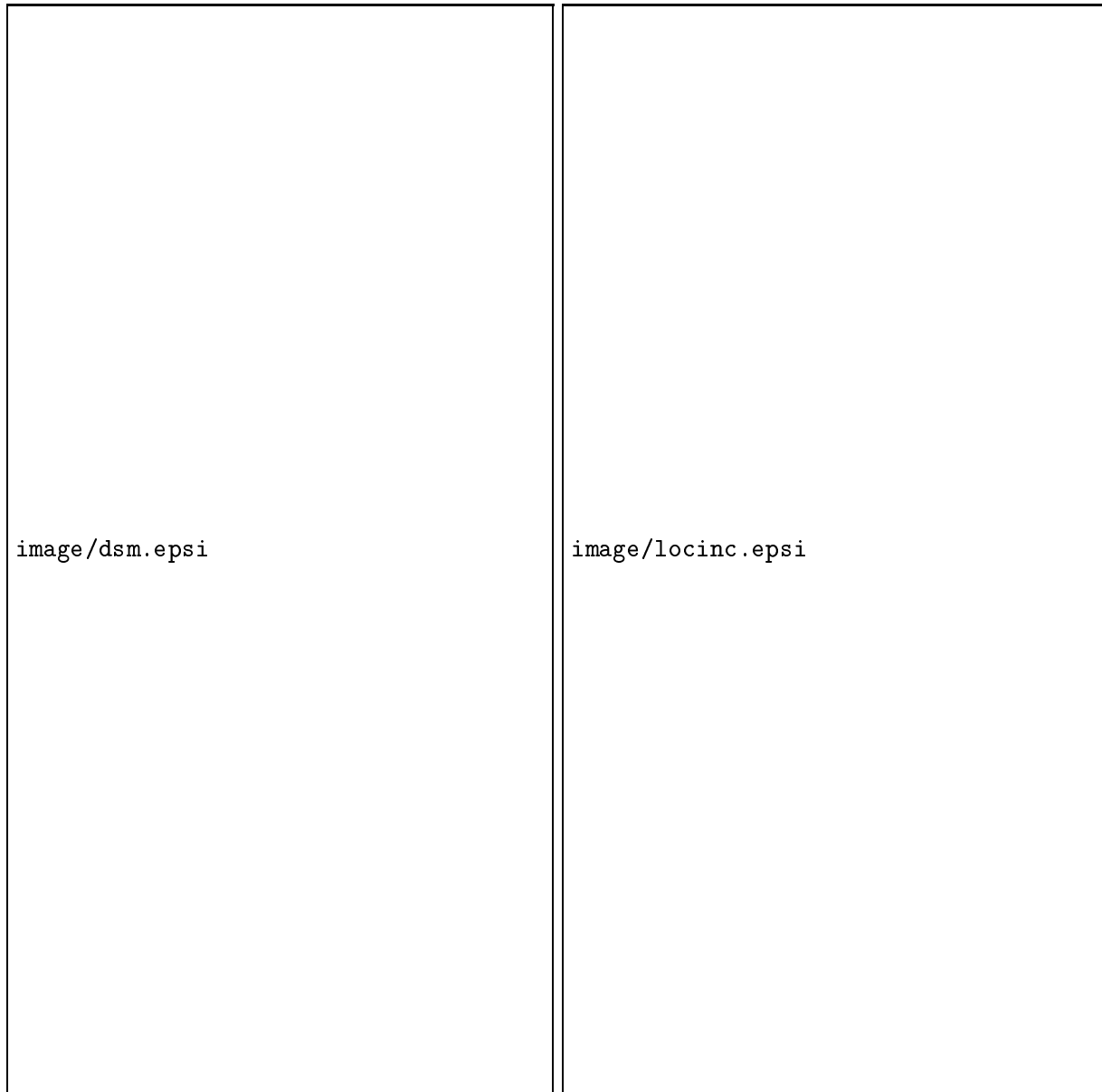


Abbildung 6: DSM und Einfallswinkelmaske (GIM)

hervorgerufene, Verbesserung ihrer Klassenstatistik mehr auf. Das ist auch nicht weiter verwunderlich, da bei ihr störende Effekte wie "Corner Reflexion", eine von der aktuellen Hangneigung unabhängige Dachneigung der Häuser bzw. die orthogonalen Strukturen des menschlichen Wirkens (Wände und Mauern) die gemessenen Signale dominieren, und kein direkter Zusammenhang zwischen natürlicher Geländeneigung und Intensität der Rückstreuung mehr besteht. Aus diesen Gründen bietet sich eine klassenorientierte Korrektur der Grauwerte an, die gegenüber einer pauschalen Gesamtkorrektur folgende wichtige Vorteile hat:

1. Sie ermöglicht, unabhängig von der Wahl der Korrekturfunktion eine optimale Anpassung der Funktionsparameter an den klassenspezifischen Verlauf des Grauwerteniveaus.
2. Grauwerte von Klassen, die keine neigungsabhängigen Grauwerte Verlauf aufweisen (wie z.B. Siedlung und Wasser), können von der Berechnung der statistischen Parameter und einer eventuell falschen Korrektur ausgeschlossen werden.

Das zur Korrektur (Abbildung 5) verwendete DSM und der lokale Einfallswinkel (GIM) sind in Abbildung 6 dargestellt.

3.4 Merkmalsextraktion

Die technische Auslegung des ERS-1 SAR-Sensors (eine Frequenz, eine Polarisation, fixer Inzidenzwinkel) erlaubt prinzipiell nur die Aufnahme von einkanaligen SAR-Abbildungen der Erdoberfläche zu einem Zeitpunkt. Für unsere Auswertungen stehen jedoch multitemporale SAR-Abbildungen zur Verfügung. Diese bieten aber keine Alternative zu multifrequenten Systemen, da sie eine ganz andere Art von Information darstellen. Viele Klassen lassen sich auch durch eine multitemporale Betrachtung nicht unterscheiden, da zu allen Zeitpunkten ähnliche Signaturen vorliegen. Hinzu kommt die Beeinträchtigung der Bildqualität durch den Speckle-Effekt. Aus diesen Gründen ist es nötig, geeignete Merkmale aus den originalen SAR-Daten zu extrahieren, um eine Verbesserung der Klassifizierung zu erreichen. Diese Merkmale können aus dem Grauwert (Speckle-Filterung) und aus der Textur, also der Grauwertvariation, abgeleitet werden.

3.4.1 Speckle-Filterung

Die Verwendung des originalen Grauwertes von SAR-Abbildungen als Merkmal für die Klassenzuordnung ist bei einer auf statistischen Analysen basierenden Klassifikation nur sehr eingeschränkt möglich. Dies ist bedingt durch den in SAR-Bildern stets auftretenden Speckle-Effekt, der in Gebieten mit eigentlich einheitlichen Rückstreuungseigenschaften eine auch visuell wahrnehmbare und statistisch relevante Variation der Intensitätswerte verursacht. Für eine erfolversprechende Klassifikation wird deshalb häufig durch Verwendung von Filtern diese charakteristische Granulation stark reduziert, um möglichst homogene Grauwerte für die Bildpunkte einer Klasse zu erzielen. Aus der Literatur bieten sich eine Reihe von Filtern an. Die ersten Filteralgorithmen wurden von J.S. Lee bereits anfang der achtziger Jahre veröffentlicht:

- Sigma-Filter von Lee [Lee, 1983a]
- Adaptives Sigma-Filter von Lee [Lee, 1983b]
- Statistisches Lee Filter (LEE) [Lee, 1980]
- Verfeinertes Lee Filter (V-LEE) [Lee, 1981]

Daneben gibt es mehrere Algorithmen verschiedener Autoren:

- Geometrischer Filter von Crimmins (GEOM) [Crimmins, 1985]
- Kantenerhaltendes Filter von Nagao [Nagao und Matsuyama, 1980]
- Adaptives Filter von Frost (FRO) [Frost et al., 1982]
- Kuan Filter (KUAN) [Kuan et al., 1985]

und verschiedene Ansätze von Lopes:

- Gamma Map Filter (G-MAP) [Lopes et al., 1990a]
- Erweitertes Lee Filter (E-LEE) [Lopes et al., 1990b]
- Erweitertes Frost Filter (E-FROST) [Lopes et al., 1990b]

Ein Vergleichende Darstellung von Speckle-Filtern findet man z.B. in [Lee et al., 1994] und [Shi und Fung, 1994]. Mit Hilfe dieser Filter lassen sich mehr oder weniger brauchbare Merkmalsebenen zur Klassifikation ableiten. Alle genannten Filter wurden implementiert bzw. sind in einem zur Verfügung stehenden Bildverarbeitungspaket enthalten. Das Problem der genannten Filter ist, daß eine brauchbare Reduzierung der Varianz immer zu einer starken Modifikation der SAR-Bildfunktion und damit zu einem Informationsverlust führt. Kanten zwischen homogenen Flächen werden verwischt, und einzelne Punktstrahler werden gar völlig weggefiltert. Da die Extraktion von Merkmalsebenen aus dem Bildgrauwert als noch sehr unbefriedigend bezeichnet werden kann, wurde ein eigenes Speckle-Filter (EPOS) entworfen, welches sowohl Kanten als auch einzelne Punktstrahler erhält und trotzdem eine effektive Reduzierung der Varianz zuläßt.

3.4.1.1 Das EPOS Speckle Filter Die Wirkung von Speckle-Filtern, wie sie z.B. von [Nagao und Matsuyama, 1980] oder [Lee, 1983a] angegeben wurden, ist bezüglich der Reduzierung des Speckle-Effektes zu schwach für die Ziele der Landnutzungskartierung. Die verbleibende hohe Varianz in homogenen Gebieten führt zu enormen Fehlklassifikationen, insbesondere dort, wo sich die Klassen im Merkmalsraum nur geringfügig unterscheiden. Will man mit diesen Filtern eine effektive Verminderung des Rauschens durch iterative Anwendung oder größere Filtermatrizen erreichen, so verschwimmen die Kanten im Bild, und die geometrische Auflösung wird sehr viel schlechter. Aus diesen Gründen wurde EPOS (Edge Preserving Optimized Specklefilter), ein optimiertes Speckle-Filter, entworfen und implementiert. Dieses optimierte Filter erhält Kanten und einzelne Punktziele im Bild, gleichzeitig wird aber eine erhebliche Verringerung der durch Speckle verursachten Varianz erreicht. Das EPOS-Filter wurde auf der IGARSS'94 in Pasadena, California veröffentlicht [Hagg und Sties, 1994].

Grundsätzliche Überlegungen Beim Speckle-Rauschen handelt es sich um eine multiplikative Störung. In einem homogenen Gebiet, welches weder punktförmige Strahler noch Texturmuster erwarten läßt, ist die Standardabweichung der einzelnen Pixel-Grauwerte linear mit dem Mittelwert des Gebietes verknüpft. In [Ulaby et al., 1982b] wird für ein Amplituden-Bild ein Wert von $0.273/N$ für den Quotienten aus Varianz zu Mittelwert im Quadrat angegeben, wobei N die Anzahl der gemittelten unabhängigen Grauwerte darstellt. Die Quadratwurzel aus diesem Quotienten wird dann als relative Standardabweichung bezeichnet. Beim GTC-Produkt des ERS-1 Satelliten finden 3 "LOOK'S" Verwendung; somit ergibt sich die durch Mittelung reduzierte relative Standardabweichung zu $R = 0.301$. Die Standardabweichung beträgt somit ca. 30 Prozent des mittleren Grauwertes. Nimmt man den Grauwert als normalverteilt an, was für Multi-Look Radarsysteme näherungsweise zutrifft, so erhält man für einen Grauwert von 100 ein 2-sigma-Intervall von 70 bis 130. In diesem Intervall liegen ca. 95 Prozent der Grauwerte, die ohne Speckle-Rauschen den Wert 100 annehmen müßten. Dieses Beispiel macht deutlich, daß ohne effektive Reduzierung des Speckle-Effekts keine verlässliche Auswertung von Radardaten möglich ist.

Durch den Geokodierungs-Prozeß und das bei uns durchgeführte Resampling auf eine Pixelgröße von 25 Meter ergibt sich eine Reduzierung der Varianz gegenüber den Originaldaten, da in beiden Fällen eine Art Mittelung verschiedener Pixel erfolgt. Aus diesem Grund kann der oben angegebene Wert für unsere Daten nicht direkt verwendet werden, sondern muß aus dem Bild geschätzt werden. In der Praxis ergeben sich für die vorverarbeiteten ERS-1 Daten Werte von etwa 0.17 für die relative Standardabweichung. Diese relative Standardabweichung dient nun als Kriterium für die Bestimmung homogener Gebiete. Befindet sich ein Punktstrahler oder eine Kante zwischen zwei Bodenbedeckungsklassen in einem untersuchten Gebiet, so wird der Wert der relativen Standardabweichung sehr groß. Mit diesem Kriterium läßt sich eine Teilmenge der Filtermatrix in der Pixelumgebung bestimmen, die keine Kanten oder Punktstrahler beinhaltet. In dem so bestimmten homogenen Gebiet kann der Mittelwert als neuer Grauwert für das zentrale Pixel eingesetzt werden. Ist die betrachtete Umgebung groß genug - wir arbeiten meist mit einer 11 x 11 Matrix - so ergibt sich eine weitgehende Reduzierung der Varianz in homogenen Gebieten.

Funktionsweise Zur Bestimmung homogener Gebiete in der Pixelumgebung wird die umgebende Matrix durch Geraden in 8 Segmente zerlegt. In jedem dieser Segmente erfolgt die Berechnung der relativen Standardabweichung. Die so berechneten Werte werden nach ihrer Größe sortiert und zunächst vereinigt. Dann werden nacheinander die Segmente mit der größten relativen Standardabweichung eliminiert bis der vorgegebene Grenzwert für ein homogenes Gebiet eingehalten wird. Aus den so erzeugten Segmenten wird der neue Mittelwert für das zentrale Pixel berechnet. Wird kein Segment gefunden, in welchem die relative Standardabweichung kleiner als der geschätzte Wert ist, so befindet sich offensichtlich kein homogenes Teilgebiet in der Umgebung des Pixels. Um trotzdem eine Filterung zu erreichen, ohne einzelne Streuobjekte und Kanten zu unterdrücken, wird die Matrix so lange verkleinert, bis die Bedingung eingehalten werden kann. Die Einteilung der Pixelumgebung ist

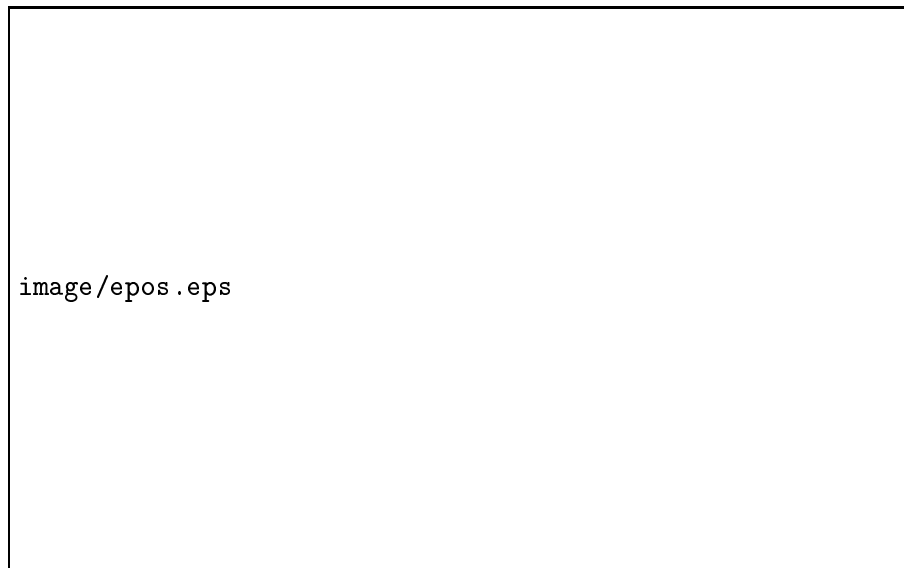


Abbildung 7: Aufteilung der Filtermatrix beim EPOS Filter

in Abbildung 7 schematisch dargestellt. Dort ist auch die Verkleinerung der Filtermatrix in inhomogenen Gebieten angedeutet. Im extremen Fall eines Punktstreuers wird der Mittelwert nur aus dem zentralen Pixel selbst berechnet: das Objekt bleibt vollkommen erhalten. Die Zuverlässigkeit dieses Grauwertes ist nun allerdings nicht verbessert worden; er ist mit derselben Varianz behaftet wie vor der Filterung. Trotzdem stellt das Filterverfahren einen guten Kompromiß zwischen geometrischer und radiometrischer Auflösung dar. Die radiometrische Auflösung wird durch die Reduzierung der Varianz in homogenen Gebieten deutlich verbessert, ohne die geometrische Auflösung zu beeinträchtigen. In Gebieten mit sehr kleinen Strukturen, wo keine homogenen Gebiete entsprechender Größe mehr zu finden sind, wird die radiometrische Auflösung zu Gunsten der geometrischen verringert. Ein multitemporaler ERS-1 Ausschnitt von 300 Pixel Kantlänge ist in Abbildung 8 vor und nach der Filterung mit EPOS dargestellt. Die durch Speckle bedingte Variation in homogenen Gebieten wird durch das Filter drastisch reduziert, während die Kanten im Bild nach wie vor exakt abgebildet werden und keinerlei Verwischungseffekt aufweisen. Ebenso werden Punktstrahler in den abgebildeten Siedlungsbereichen nahezu unverändert wiedergegeben.

3.4.1.2 Vergleich verschiedener Filter Um einen Überblick über die Funktionalität der verschiedenen Filterverfahren zu bekommen, wurden diese anhand eines synthetisch erzeugten Datensatzes miteinander verglichen. Die Verwendung synthetischer Daten ermöglicht einen objektiven Vergleich der Verfahren durch die Berechnung des Fehlers zwischen den nicht gestörten Original-Daten und den gefilterten Daten. Damit kann die Fähigkeit eines Filters, die original Grauwerte zu rekonstruieren, direkt gemessen werden. Da die Filterverfahren adaptiv sind, und somit vom Bildinhalt abhängig,

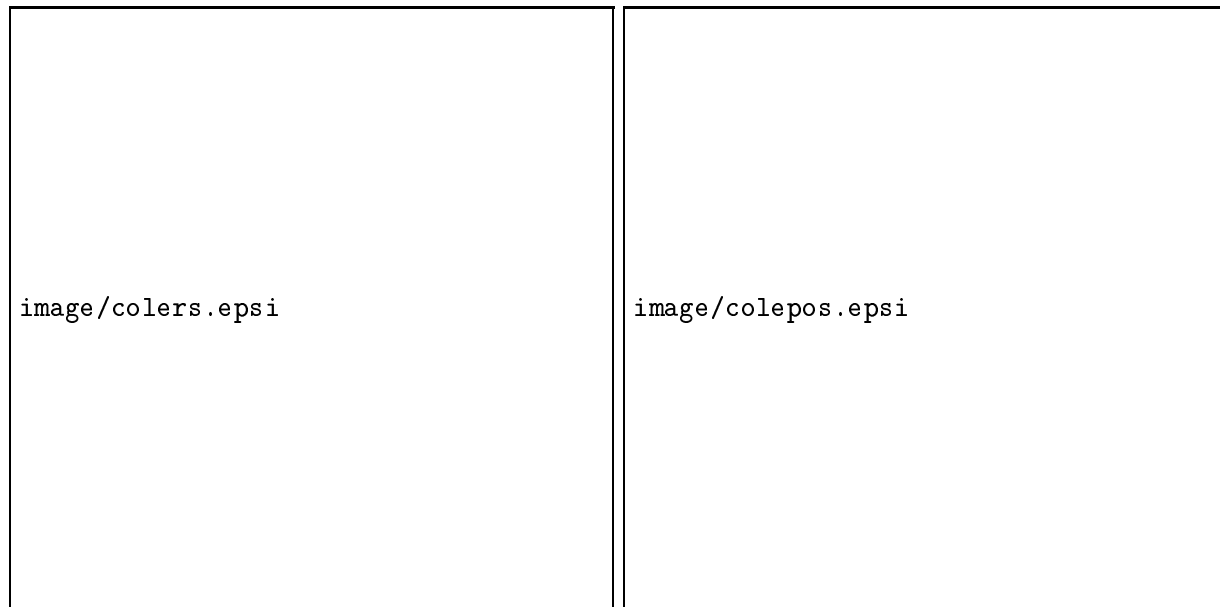


Abbildung 8: Mit EPOS gefilterter ERS-1 Ausschnitt in multitemporaler Darstellung

wurden verschiedene geometrische Objekte getrennt untersucht: Punkte, Linien und Flächen. Ausserdem wurde die Untersuchung bei verschiedenen Kontrast-Werten durchgeführt, die verschiedene Signal- zu Rauschabstände repräsentieren. Die Kontrast-Werte sind durch die Grauwertdifferenzen 100, 80, 60 und 40 bei einer relativen Standardabweichung von $C = \sigma/\mu = 0.17$ repräsentiert. Betrachtet man die Häufigkeits-Verteilung der Grauwerte von Objekt und Hintergrund, so ergibt sich für einen Kontrast von 100 eine fast vollständige Trennung der beiden Verteilungen, bei einem Kontrast von 40 überlagern sie sich bereits sehr stark. Das verwendete Testbild ist in Abbildung 9 dargestellt.



Abbildung 9: Testbild mit Meßbereichen und synthetischem Speckle

Auf der rechten Seite ist das Bild mit synthetisch erzeugtem Speckle, auf der linken Seite das original Bild mit den Meßbereichen dargestellt, in denen der Fehler zwischen original und gefiltertem Bild für die untersuchten Geometrien ermittelt wurde. Die Beschränkung auf die Meßbereiche dient der Beschränkung auf Fehler an den Objekten und verhindert somit die Meßung der Restvarianz im Bild. Da Multi-Look prozessierten SAR-Bilddaten näherungsweise normalverteilt sind, wurde der Einfachheit halber eine Normalverteilung für das synthetisch erzeugte multiplikative Rauschen angenommen, welches den Speckle-Effekt simulieren soll. Ebenfalls wurde die Korrelation benachbarter Bildpixel

nicht berücksichtigt, die nach einem Resampling auf 25 Meter Pixelgröße nur noch minimale Werte aufweist. Die Korrelation ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die Pixelgröße kleiner ist als die geometrische Auflösung des Sensors, die beim ERS-1 bei etwa 25 Meter angesiedelt ist.

Um eine einheitliche Vergleichsbasis zu schaffen, wurden alle getesteten Filterverfahren bezüglich ihrer Filterwirkung justiert. Hierbei wurde die Reduzierung der Standardabweichung um den Faktor 10 angestrebt, da geringere Faktoren bei den enormen Störungen durch Speckle nicht relevant sind. Die Messung der Filterwirkung erfolgte in großen homogenen Gebieten bei verschiedenen Grauwertstufen. Da die Reduzierung der Bildvarianz in der Regel nur über die Größe der Filtermatrix eingestellt werden kann, ist eine genaue Justierung jedoch nicht möglich. Das Ergebnis ist in Tabelle 12 in Spalte 2 dargestellt. Ausserdem ist die Erhaltung des Mittelwertes in den homogenen Bereichen des Bildes

FILTER	REDUZ	MITTELW	MW REL
MITT	0.0963	-0.936	0.000
E-FRO	0.1065	-0.706	0.230
GEOM	0.1096	2.468	3.404
EPOS	0.1122	-0.874	0.062
FRO	0.1126	-0.458	0.478
E-LEE	0.1143	-0.438	0.498
V-LEE	0.1165	-1.460	-0.524
LEE	0.1309	-0.950	-0.014
KUAN	0.1328	-0.440	0.496
G-MAP	0.1363	-0.578	0.358

Tabelle 12: Reduzierung der Standardabweichung und Mittelwerttreue

in den Spalten 3 und 4 dargestellt. Spalte 3 enthält die Abweichung vom Originalbild, in Spalte 4 ist der Wert des Mittelwertfilters (MITT) subtrahiert, dessen Ergebnis in einer begrenzten Umgebung maximal approximiert werden kann. Das LEE und das EPOS Filter zeigen die besten Werte, jedoch bewegen sich die meisten Verfahren in einem tolerierbaren Bereich von 0.5 Grauwerten. Lediglich das GEOM Filter scheint Probleme mit der Erhaltung des Grauwertes in homogenen Gebieten zu haben: Die Abweichung von mehr als 3 Grauwerten wird von uns als unzureichend bewertet.

Die Messungen an den verschiedenen Punkten, Linien und Flächenkanten wurden für die Auswertung jeweils gemittelt, um zufällige Ergebnisse der Messung auszuschließen. Gemessen wurde der mittlere quadratische Fehler nach der Formel

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{x}_i - x_i)^2}$$

wobei N die Anzahl der betrachteten Pixel, x_i der Originalgrauwert und \hat{x}_i der gefilterte Grauwert an der Pixelposition i bedeutet. Die kompletten Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 13 dargestellt. Die erste Spalte enthält den Geometrie-Typ, wobei in den letzten beiden Zeilen der Mittelwert aus allen Geometrien, bzw. ein bewerteter Mittelwert, in dem Kanten aufgrund ihrer zentralen Bedeutung doppelt gewichtet sind, enthalten ist. Nach der letzten Zeile wurden die Filter auch entsprechend ihren Ergebnissen sortiert. Die zweite Spalte enthält die verschiedenen Kontrastwerte, bei denen die Messung durchgeführt wurde. Zusätzlich ist der Durchschnitt bei allen Kontrastwerten für die jeweilige Geometrie angegeben. Um einige Aspekte aus der Tabelle zu verdeutlichen, sind einige Zeilen in den folgenden Diagrammen dargestellt. In Abbildung 10 sind die Ergebnisse für die untersuchten Geometrien bei einem Kontrast von 100 Grauwerten sowie die gewichtete Summe aus der letzten Zeile von Tabelle 13 dargestellt. Das EPOS Filter ist für diesen hohen Kontrast-Wert den anderen Verfahren deutlich überlegen. In Abbildung 11 sind die Ergebnisse für Kanten bei verschiedenen Kontrastwerten

TYP	KONT	EPOS	GEOM	V-LEE	E-FRO	FRO	KUAN	LEE	E-LEE	G-MAP	MITT
PUNKT	100	0.29	4.60	3.54	6.78	6.78	3.30	3.23	3.25	3.74	16.02
PUNKT	80	0.26	4.62	6.80	7.57	7.57	3.78	3.81	4.26	4.96	10.48
PUNKT	60	4.44	4.63	5.86	5.31	5.31	3.82	3.85	4.25	4.48	6.11
PUNKT	40	2.81	3.06	2.85	2.68	2.68	2.88	2.89	2.77	2.89	2.89
PUNKT	MITT	1.95	4.23	4.76	5.59	5.59	3.45	3.45	3.63	4.02	8.88
LINIE	100	2.49	13.70	10.58	10.40	10.40	11.44	11.46	12.80	12.95	150.00
LINIE	80	2.61	14.03	12.23	12.52	12.52	12.48	12.55	12.98	14.99	96.47
LINIE	60	21.75	14.81	17.48	20.11	20.11	12.81	12.84	13.01	17.21	54.87
LINIE	40	23.87	14.72	22.84	15.96	15.96	11.46	11.35	12.66	16.80	25.01
LINIE	MITT	12.68	14.31	15.78	14.75	14.75	12.05	12.05	12.86	15.49	81.59
KANTE	100	1.18	2.97	4.63	6.11	6.12	11.50	11.76	11.48	15.89	56.42
KANTE	80	1.18	2.93	4.20	6.28	6.29	9.95	10.25	9.57	14.65	37.05
KANTE	60	3.26	2.76	4.46	6.90	6.90	8.18	8.30	7.74	12.39	21.45
KANTE	40	4.43	2.32	3.52	5.68	5.68	5.84	5.86	5.95	7.75	10.42
KANTE	MITT	2.51	2.74	4.20	6.24	6.25	8.87	9.04	8.68	12.67	31.34
ALLE	MITT	5.71	7.10	8.25	8.86	8.86	8.12	8.18	8.39	10.73	40.60
ALLE	BEW	4.91	6.01	7.24	8.20	8.21	8.31	8.39	8.47	11.21	38.28

Tabelle 13: RMS-Fehler für verschiedene Geometrien und Kontrastwerte.

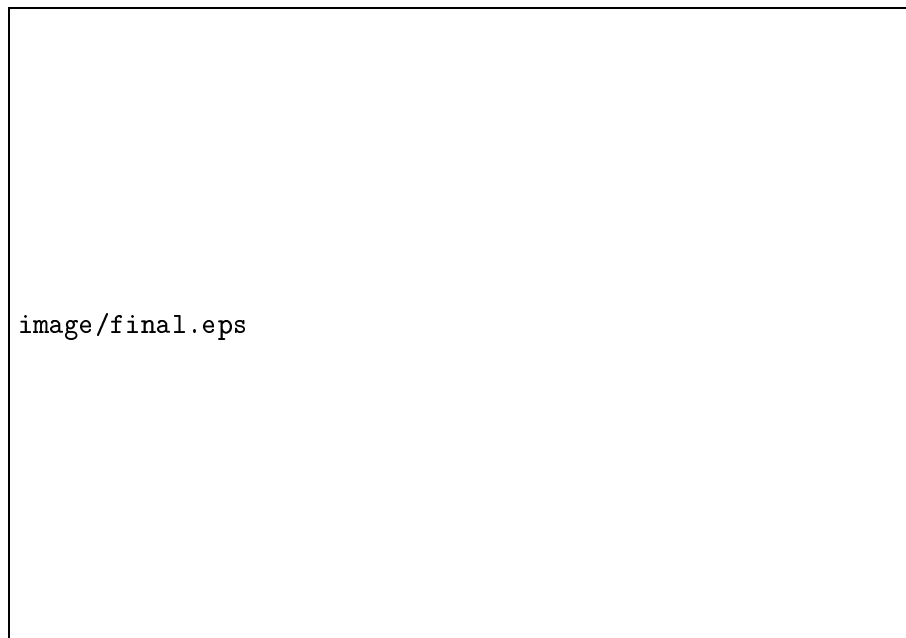


Abbildung 10: Fehler verschiedener Geometrien (KONTRAST = 100)

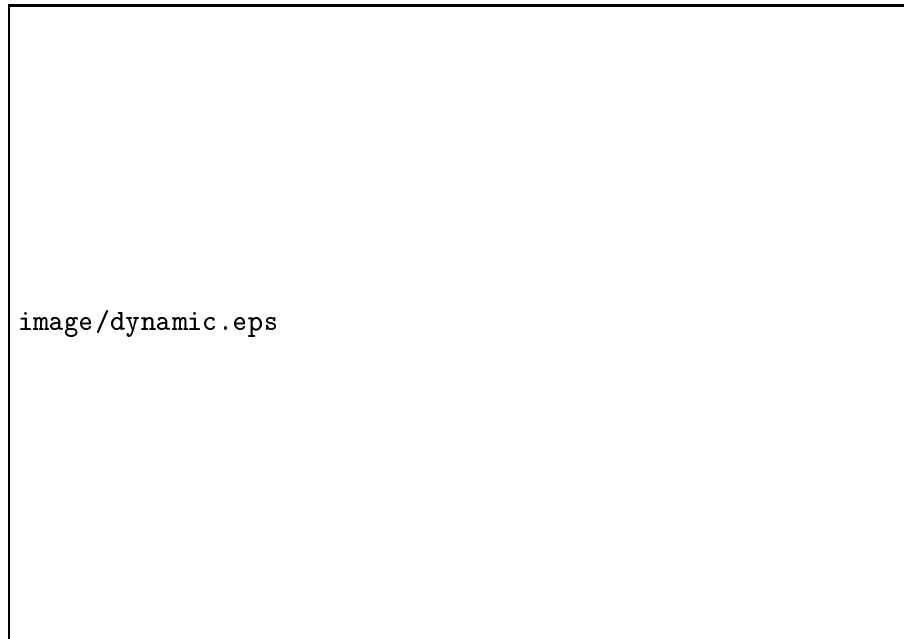


Abbildung 11: Fehler bei verschiedenen Kontrast-Werten (Kanten)

dargestellt. Bei geringen Kontrastwerten ist hier insbesondere das GEOM-Filter überlegen, was sich auch bei einer visuellen Betrachtung der Bilder bestätigt. Für Anwendungen, bei denen der Erhalt des Mittelwertes keine Rolle spielt und nur geringe Kontraste zwischen benachbarten Bildbereichen vorhanden sind, könnte somit das GEOM Filter eingesetzt werden. Allerdings sind die Werte bezüglich der Geometrien Linie und Punkt deutlich schlechter. Interessant ist, daß mit zunehmendem Kontrast—und dieser erleichtert ja das Auffinden der zu erhaltenden Kante—lediglich das EPOS Filter eine verbesserte Filterwirkung aufweist. Die Ergebnisse dieses Vergleichs von Filterverfahren werden auch auf der ISPRS' 96 [Hagg und Sties, 1996] veröffentlicht.

3.4.2 Extraktion von Texturmerkmalen

Zur Texturanalyse optischer Sensordaten finden häufig die sog. Haralick-Parameter [Haralick, 1978] bzw. Modifikationen davon Verwendung. Diese Haralick-Texturparameter werden aus der Co-occurrence Matrix abgeleitet, die bestimmt ist durch die Häufigkeit aller im Bildausschnitt auftretenden Grauwertkombinationen bei vorgegebener Abstandsrelation zwischen den Bildpunkten. Da aber neben dem unvermeidlichen Rauschanteil die Grauwerte von SAR-Bilddaten im Gegensatz zu den optischen Abbildungen durch das o.g. Speckle-Phänomen beeinflusst sind, liefern die Haralick-Parameter bei SAR-Abbildungen relativ unzuverlässige Merkmale für eine Klassifikation. Diese Situation läßt sich durch Anwendung geeigneter Filterfunktionen etwas verbessern.

Die von [Argenti et al., 1990] und [Peckinpough, 1991] angegebenen Verfahren zur effizienten Berechnung von Haralick-Texturparametern aus der Co-occurrence Matrix wurden von uns implementiert und getestet. Die berechneten Parameter sind offensichtlich sehr stark von der Bildstruktur abhängig; ungefilterte Bilder ergeben wesentliche Unterschiede zu Speckle-gefilterten Bildern. Die besten Ergebnisse bezüglich der Haralick-Parameter wurden mit dem aus der Co-occurrence Matrix berechneten Kontrast erzielt. Dieser Parameter enthält einiges an klassenspezifischer Information, die für eine Klassifikation verwendet werden kann. Da die bisher existierenden Verfahren zur Texturextraktion auf SAR-Bilder nur bedingt angewendet werden können, wurden zwei neue Verfahren entwickelt, die an die speziellen Eigenschaften des Radarsignals angepaßt sind. Die Verfahren werden im folgenden dargestellt und miteinander verglichen.

3.4.2.1 Merkmalsextraktion durch Specklemodellierung Dem in diesem Projekt entwickelt Texturbeschreibungsverfahren liegt die Idee aus [Ebert und Mauer, 1987] zugrunde. Die in örtlich begrenzter Umgebung berechnete Varianz der Intensitätswerte von SAR-Abbildungen ist nicht alleine durch Rauschen und Speckle verursacht, sondern spiegelt auch die Feinstruktur der rückstreuenden Erdoberfläche bzw. der Bodenbedeckung wieder. Ausgehend von diesen Überlegungen wurde das folgende 3-stufiges Verfahren zur Modellierung der lokalen Veränderungen des Radarsignals entwickelt:

Modul MINMAX Eine in der Größe variabel dimensionierbare $n \times n$ Bildpunkte große Maske wird auf das Grauwertgebirge angewendet, wobei für das Zentralpixel des Umgebungsfensters geprüft wird, ob es sich - bezogen auf die 4 Symmetrieachsen - um ein (streng) lokales Extremum handelt. Der MINMAX-Operator produziert somit eine erste grobe Menge von (streng) lokalen Maxima bzw. Minima, also eine vorläufige Auswahl an Speckle-Kandidaten.

Modul MODELL Dieses Modul scheidet aus der Menge von Speckle-Kandidaten jene aus, die durch Rauschen oder Punktziele verursacht sind. Die übrig gebliebene Menge von Speckles wird bezüglich der Formmerkmale "mittlerer Durchmesser" und "mittlerer Dynamikbereich" charakterisiert. Der MODELL-Operator arbeitet in 4 Schritten: Zunächst wird ein 8×8 (alternativ 16×16) Pixel großer Ausschnitt um den aktuell zu untersuchenden Speckle-Kandidaten gebildet. Damit die anschließende Charakterisierung der lokalen Extrema genauer erfolgen kann, wird auf diesen Bildausschnitt eine Bildfunktionsinterpolation angewendet. Im zweiten Schritt erfolgt in diesem vergrößerten Bildausschnitt für jeden lokalen Extremwert eine Modellierung durch Bestimmung der oben genannten Formmerkmale. Das Ergebnis dieser Vermessungen wird im dritten Teilschritt kritisch überprüft, da die auf der Fourier-Transformation basierende Bildfunktionsinterpolation eine periodische Fortsetzbarkeit an den vier Rändern voraussetzt. Aufgrund des mittleren Durchmessers erfolgt im letzten Schritt des MODELL-Operators eine Eliminierung der zu kleinen (potentielles Rauschen) bzw. zu großen Kandidaten (potentielle Targets).

Modul RADTEX Die Berechnung der örtlichen Verteilung der durch den MODELL-Operator gelieferten Speckle-Menge wird vom Modul RADTEX durchgeführt. Nach einer für die Maxima- bzw. Minima-Speckles getrennt durchgeführten Vermaschung gemäß der Vorschrift nach Delaunay [Lee und Schachter, 1980] werden die Abstände zwischen den durch das Dreiecksnetz bestimmten Nachbarn berechnet. Der mittlere Abstand eines jeden Extremwertes zu seinen Nachbarn ergibt dann ein weiteres Merkmal. Zusammen mit den vorgenannten Formmerkmalen wird also jedes lokale Extrema durch einen Satz von drei Parametern beschrieben, die in einem letzten Schritt gemäß der durch die Triangulation bestimmten Voronoi-Zerlegung des Eingabebildes als entsprechend kodierte Rastermatrizen flächenhaft abgespeichert werden.

Das Resultat der hier entwickelten Speckle-Modellierung zur SAR-spezifischen Texturanalyse sind also 6 Rastermatrizen, kodiert mit den oben genannten drei Beschreibungsmerkmalen. Dieser sechsdimensionale Merkmalsvektor kann für jedes radiometrisch korrigierte, Naturraum-angepaßte, monotonale ERS-1 Bild abgeleitet und in Verbindung mit den anderen beschriebenen Merkmalsebenen zur Klassifikation und Relaxation verwendet werden.

Die extrahierten Merkmale weisen stark unterschiedlichen Informationsgehalt auf. Der Radius der Speckles scheint eher zufällig verteilt zu sein, ein Zusammenhang zwischen den Bodenklassen und dem Radius ist nur schwer herzustellen. Auch Versuche mit verschiedenen Parametereinstellungen bei der Speckle-Modellierung führten zu keinem besseren Ergebnis. Die Dynamik der Speckles hingegen ist ein sehr aussagekräftiges Kriterium, das sich deutlich in den verschiedenen Klassen unterscheidet. Die dritte Eigenschaft, der Abstand zwischen benachbarten Kandidaten, eignet sich wiederum weniger für eine Klassifizierung. Der Abstand ist zwar deutlich von der Bodenklasse abhängig, weist aber innerhalb der einzelnen Klassen eine hohe Variation auf. Denkbar wäre lediglich eine Mittelwertbildung über mehrere benachbarte Speckles, was sich wiederum negativ auf die örtliche Genauigkeit einer Klassifizierung auswirkt. Ein weiteres Problem bleibt vorerst die Effizienz der Programme. Insbesondere

die Vermessung der Speckle-Kandidaten erfordert einen erheblichen Aufwand an Rechenzeit, die im Wesentlichen durch die erforderliche Bildfunktionsinterpolation bedingt ist.

3.4.2.2 Texturbeschreibung durch Strukturanalyse Ein großen Problem von Texturmerkmalen ist die Sensibilität der Maße bezüglich nicht textueller Bildinformation wie Kanten oder einzelnen Punktstrahlern, die häufig in SAR-Bilddaten aufgrund von Doppel-Reflektionen auf der Erdoberfläche vorhanden sind. Dies führt in den entsprechenden Regionen zu einer Fehlklassifikation, die eine Verbesserung der Ergebnisse durch Texturinformation wieder kompensiert. Aus diesem Grund wurde versucht, ein Verfahren zu entwickeln, welches es erlaubt, Bild- und Texturinformation getrennt zu erfassen. Außerdem wurden die extrahierten Merkmale speziell auf die in SAR-Bildern vorkommenden Phänomene abgestimmt, so daß eine SAR-spezifische Auswertung der Daten stattfinden kann. Um die Trennung von Textur- und Bildinformation zu ermöglichen, wurden zwei verschiedene Ansätze miteinander kombiniert: (1) Die Berechnung der Texturmerkmale aus dem homogensten von vier quadratischen Teilsegmenten der Berechnungsmatrix und (2) die Beschreibung des Phänomens sehr kleiner Flächen durch einen eigenen Strukturparameter. Der erste Ansatz ermöglicht den Ausschluß von Kanten zwischen großen homogenen Flächen. Der zweite Ansatz verhindert die Interpretation von kleinen Feldstrukturen als Textur.

Die in SAR-Bilddaten des ERS-1 zu findenden Textur- und Strukturelemente sind in Abbildung 12 vereinfacht dargestellt, wobei der Signalverlauf ohne die durch Speckle verursachten Störungen dargestellt ist. Im ersten Fall liegt somit eine homogene Fläche vor, die lediglich durch Speckle-Rauschen



Abbildung 12: Textur- und Strukturelemente in SAR-Abbildungen

gestört ist. Im zweiten Fall handelt es sich um mehrere kleine homogene Gebiete, wie sie z.B. in der Landwirtschaft, insbesondere im süddeutschen Raum, vorkommen. Diese beiden Elemente verfügen über keinerlei Texturinformation, trotzdem reagieren Texturverfahren auf beide: Auf den ersten wegen des Speckle-Rauschens, auf den zweiten zusätzlich durch die Feldstrukturen. Im dritten Fall ist eine einfache Texturinformation vorhanden, die sich lediglich durch eine höhere Varianz als der durch Speckle verursachten auszeichnet. Diese ist zum Beispiel in Waldgebieten zu finden, wo sich die Elementstruktur der Bäume in der Größenordnung der Sensorauflösung bewegt. Im vierten Fall ist Texturinformation mit kleinen Feldstrukturen gemischt und stellt somit die Verbindung der Fälle zwei und drei dar. Der letzte dargestellte Verlauf ist typisch für Siedlungsbereiche in SAR-Abbildungen. Das Signal ist durch zufällig verteilte Peaks charakterisiert, die aufgrund von Doppel-Reflektionen an Wänden und der Erdoberfläche entstehen.

Zur genaueren Differenzierung der verschiedenen Strukturelemente wurden vier Maße abgeleitet. Das erste ist schlicht die relative Standardabweichung, die eine Identifizierung des ersten Elementes erlaubt. Das fünfte Element (Siedlung) wird durch die Form des Histogramms charakterisiert, welches Ausreißer bei hohen Grauwerten aufweist, die von den Peaks verursacht werden. Die Elemente zwei und vier sind durch den hohen Anteil niedriger Frequenzen im Spektrum charakterisiert; Die Messung

erfolgt auf vereinfachte Art und Weise über eine Varianzbestimmung bei verschiedenen Auflösungsstufen, so daß eine rechnerisch aufwendige Fouriertransformation nicht erforderlich ist. Durch die Identifizierung der Elemente zwei und vier ist auch das dritte Element eindeutig von den anderen zu separieren. Der zweite Fall wird schlicht durch die Größe des homogenen Gebietes bei der Speckle-Filterung mit EPOS charakterisiert. Für das Vorliegen der zweiten Geometrie muß das gefundene Gebiet wenigstens mehrere Pixel umfassen.

Da die berechneten Merkmale nicht der Normalverteilungs-Bedingung für eine Maximum-Likelihood Klassifikation genügen, mußte eine alternative Klassifikationsmethode verwendet werden. Hierzu bieten sich Neuronale Netze an, die in letzter Zeit immer häufiger zur Klassifikation von Fernerkundungsdaten eingesetzt werden. Um beliebige Häufigkeits-Verteilungen zu approximieren, werden z.B. sogenannte Multilayer-Perceptron (MLP) [Hornik, 1991] und Radial-Basis-Funktionen (RBF) [Hartman et al., 1990] Netzwerke eingesetzt. In dieser Anwendung wurden RBF Netzwerke verwendet, da sie ein etwas robusteres Verhalten aufweisen. Das Netzwerk wird dabei mittels eines am IPF neu entwickelter Cluster-Algorithmus automatisch generiert. Für Einzelheiten zu dem Verfahren sei auf die Dissertation [Segl, 1996] verwiesen.

3.4.2.3 Vergleich der Texturmerkmale Der Vergleich von Texturmerkmalen gestaltet sich schwierig, da es kein objektives, allgemeingültiges Kriterium für die Qualität einer Texturgröße gibt. Meist werden synthetische erzeugte Bildbeispiele verwendet, um die Fähigkeit der Trennung verschiedener Muster zu demonstrieren. Die komplexen Muster, die hierbei betrachtet werden, sind in SAR-Bilddaten des ERS-1 aufgrund seiner Auflösung jedoch nicht zu finden. Texturen wirken sich nur in den Bereichen aus, wo die texturauslösenden Elemente größer als die Sensorauflösung sind. Dies ist in erster Linie in Siedlungsbereichen gegeben, wo durch lokal begrenzte Doppel-Reflexionen unregelmäßige Texturmuster erzeugt werden. Aus diesem Grund wurde versucht, die Verfahren durch visuelle Interpretation der Merkmalsebenen bzw. der durchgeführten Klassifikation miteinander zu vergleichen.

Bei der Speckle-Modellierung hat sich gezeigt, daß lediglich der "Dynamikbereich" der Speckle-Kandidaten sinnvolle Ergebnisse erzeugt, die Parameter "Durchmesser" und "Abstand" sind stark verrauscht, so daß eine Auswertung dieser Informationen nicht in Betracht kommt. Die Ursache hierfür liegt in der Vermessung einzelner Speckle-Kandidaten, die als solche keine zuverlässigen Ergebnisse liefern. Eine Mittelung benachbarter Messungen würde zu einem unvermeidbaren Verlust an geometrischer Auflösung führen, da die Messungen ohnehin bereits mehrere Pixel auseinander liegen. Auch der Dynamikbereich weist noch einen hohen Anteil an zufälliger Störinformation auf. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Abbildung zeigt eine Segmentierung durch einfache Schwellwertbildung,



Abbildung 13: Schwellwertbildung der Speckle-Dynamik und des Haralick-Kontrastes

wobei die Eliminierung der störenden Merkmalsanteile in einem homogenen Gebiet in der Mitte des

Ausschnittes angestrebt wurde. Auf der linken Seite ist der Dynamik-Kanal der Speckle-Modellierung, auf der rechten Seite der Haralick-Kontrast dargestellt, der sich von allen Haralick-Parametern mit Abstand am besten zur Texturbeschreibung eignet. Obwohl beim Kontrast fast keine Rauschanteile in den homogenen Gebieten mehr zu finden sind, wird der im Bild vorhandene Siedlungsbereich sehr kompakt dargestellt. Die Dynamik der Specklemodellierung zeigt hingegen noch einige Störungen wo keine Texturinformation vorhanden ist und bildet die Siedlungen weit schlechter ab als der Haralick-Kontrast.

Das größte Problem bei den von Haralick vorgeschlagenen Merkmalen ist die Sensibilität gegenüber Kanten und einzelnen Punktstrahlern. Diese Problematik wurde mit der oben beschriebenen Strukturanalyse aufgegriffen. Das Resultat einer Klassifizierung unter Verwendung des Haralick-Kontrastes und der Strukturmerkmale unter sonst gleichen Bedingungen ist in Abbildung 14 dargestellt. Auf der



Abbildung 14: Multitemporaler SAR-Ausschnitt und Klassifikation mit Haralick und Strukturparametern

linken Seite ist der multitemporale ERS-1 Ausschnitt zu sehen, in der Mitte die Klassifikation unter Verwendung des Haralick-Kontrastes und rechts die Klassifikation mit den Strukturparametern. Im oberen Bereich des Ausschnittes sind bei der Haralick-Klassifizierung deutlich die offensichtlich falsch (als Siedlung, rot) klassifizierten Ränder zwischen den homogenen Feldstrukturen zu sehen. Diese Fehler wurden mit den Strukturparametern weitestgehend vermieden. Außerdem wurde eine wesentlich kompaktere Darstellung der Siedlungsflächen erreicht.

Jeder dieser Ansätze hat seine Berechtigung bezüglich der Merkmalsextraktion aus SAR-Bilddaten. Die damit erzielten Verbesserungen sind aber sehr kritisch zu bewerten, da die zusätzliche Information an manchen Stellen auch zusätzliche Fehler erzeugt. Der Nutzen der Methoden ist letztlich vom Bildinhalt abhängig. Wenn sich Klassen durch multitemporale Auswertung nicht trennen lassen, ist

der Einsatz von Texturmerkmalen sicherlich hilfreich. Enthalten Ausschnitte viele kleine homogene Flächen, wie dies in der Landwirtschaft im südlichen Teil Deutschlands häufig der Fall ist, so wird das Gesamtergebnis durch die an den Kanten auftretenden Störung durch die Verwendung eines Texturmerkmals sicherlich schlechter. Der hier vorgestellte Ansatz der Strukturanalyse bietet dazu eine erste Lösungsmöglichkeit an, die aber weiter verfeinert oder durch gänzlich neue Methoden ergänzt oder ersetzt werden muß. Das Verfahren wurde auf der IGARSS'95 vorgestellt und ist unter [Hagg et al., 1995] veröffentlicht.

3.5 Klassifikation

Die Klassifizierung großer Gebiete erfordert eine Reihe von besonderen Maßnahmen, auf die hier näher eingegangen werden soll.

3.5.1 Definition von Trainingsgebieten

Für jeden zu bearbeitenden Ausschnitt mußte ein Satz von Trainingsgebieten für die zu klassifizierenden Landnutzungstypen bestimmt werden. Da aus praktischen Gründen eine Ortsbegehung der gesamten Bundesrepublik offensichtlich ausscheidet, mußten diese für die jeweiligen Landnutzungstypen repräsentativen Bildbereiche neben der visuellen Interpretation der ERS-1 Bildausschnitte aus den anderen zur Verfügung stehenden Kontextdaten ermittelt werden: aus Luftbildern (soweit verfügbar und aktuell), aus topographischen Karten (soweit verfügbar) sowie insbesondere mit Hilfe der DSM-Informationen. Es werden folgende Grobklassen unterschieden:

- Wasser
- Lockere Siedlung
- Dichte Siedlung
- Industrie
- Wald
- Wein/Obst
- Wiese
- Landwirtschaft
- Moor
- Reject
- Layover/Shadow

Eine weitere Differenzierung dieser Grobklassen ist bei Vorliegen multitemporaler Datensätze geeigneter Aufnahmezeitpunkte erreichbar. Unterscheidbar wären insbesondere

- Stehendes und fließendes Wasser
- Nadel- und Laubwald und
- verschiedene Klassen innerhalb der Landwirtschaft.

Die hierzu benötigten Aufnahmezeitpunkte waren zum Zeitpunkt der Verarbeitung nicht bundesweit zur Verfügung, weshalb wir uns auf die Grobklassen beschränken mußten.

3.5.2 Überwachte Klassifizierung

Die eigentliche Klassifizierung der mit den verschiedenen naturräumlichen Arealen korrespondierenden multitemporalen ERS-1 Bilddaten wird mittels eines am IPF neu entwickelten Klassifikators durchgeführt. Der Hauptvorteil dieses neuen Klassifikators gegenüber dem üblicherweise verwendeten Maximum-Likelihood-Klassifikator liegt darin, daß dieser auch eine Aussage über die Güte bzw. Enge einer Klassenzuordnungsentscheidung sowie über die Wahrscheinlichkeit der Entscheidung liefert. Für jedes zu klassifizierende Bildelement wird nicht nur die Klassennummer der wahrscheinlichsten Klasse, sondern auch eine dazugehörige Vertrauensgröße mit angegeben und dies - falls vom Benutzer gewünscht - auch für die k nächstwahrscheinlichsten Klassen. So ist die primäre Aufgabe des Klassifikators also nicht eine Klassifikation im herkömmlichen Sinne, sondern die Bereitstellung von Vertrauensinformation für eine nachfolgende Relaxation. Dieser Relaxationsprozeß zur Generalisierung ist im Abschnitt 3.6 im Detail beschrieben.

Ein weiterer Ansatz war die Verwendung eines Mahalanobis-Distanz Klassifikators, der von einem statistischen Hypothesentest abgeleitet wurde ([Segl, 1996], [Segl, 1990]). Bedingt durch die teilweise hohe Varianz in verschiedenen Landnutzungskategorien und der daraus resultierenden Überlagerung der Merkmale im Merkmalsraum, hat sich der Maximum-Likelihood Klassifikator- im Vergleich mit dem am IPF entwickelten Mahalanobis-Distanz Klassifikator- als "stabiler" und somit für den permanenten Einsatz als vorteilhaft erwiesen.

3.5.3 Verifikation der Klassifizierungsergebnisse

Jede klassifizierte Teilszene wird in diesem Verarbeitungsschritt kontrolliert. Dies erfolgt einerseits visuell unter Zuhilfenahme von verfügbaren topographischen Karten und Luftbildern, andererseits kann eine automatische Kontrolle der Klassifizierungsergebnisse mittels des zugehörigen DSM-Ausschnittes durchgeführt werden. Sollte die Verifikation nicht annehmbare Fehler ergeben, so wird der geschilderte Klassifikationsdurchlauf mit neuen bzw. optimierten Trainingsgebieten wiederholt. Diese Iteration ist insbesondere deswegen erforderlich, weil die Signaturen einzelner Landnutzungsklassen sehr ähnlich sind, und sie deswegen im Merkmalsraum nicht eindeutig getrennt werden können. Dies führt zu erheblichen Fehlklassifikationen, die in einem iterativen Prozeß wesentlich vermindert werden können.

3.6 Generalisierung (Relaxation)

Bei Verwendung des Hypothesentest-Klassifikators entstehen n Ergebnismatrizen mit Klassenzuordnungen und ebenso viele Ergebnismatrizen mit den entsprechenden Vertrauensmaßen in diese jeweiligen Entscheidungen. Relaxation der Entscheidungen heißt, den Vertrauenswert in eine Entscheidung in einem beliebigen Zentralpixel in Abhängigkeit von den Verhältnissen in seiner Umgebung (z.B. 3 x 3 Pixel) zu erhöhen oder zu vermindern:

1. wenn die Summe der Vertrauenswerte in alle Entscheidungen in der Umgebung, die mit der Entscheidung im Zentralpixel der jeweils zu prüfenden Ebene übereinstimmen, größer oder kleiner ist als ein bestimmter Anteil (z.B. die Hälfte) der Summe aller Vertrauenswerte in der Umgebung, so wird der Vertrauenswert in die Entscheidung im Zentralpixel um einen einstellbaren Anteil erhöht oder erniedrigt (Unterstützung oder Widerspruch der Umgebung für die betreffende Entscheidung im Zentralpixel);
2. wenn die Summe der Vertrauenswerte in eine bestimmten Entscheidung, die der Entscheidung im Zentralpixel widerspricht, in der Umgebung größer ist als ein bestimmter Anteil (z.B. die Hälfte) der Summe aller Vertrauenswerte, so wird der Vertrauenswert in die Entscheidung im Zentralpixel um einen einstellbaren Anteil erniedrigt und die (Mehrheits-)Entscheidung mit einem einstellbaren Vertrauenswert in die niedrigst verfügbare Ebene zusätzlich eingetragen, soweit diese (Mehrheits-)Entscheidung in anderen Ebenen des Ergebnisses nicht schon vorhanden ist;

3. keine Aktion dieser Art für die Rejekt-Entscheidung;
4. dieser Prozeß kann iterativ durchgeführt werden, so daß Entscheidungen aus wachsender Entfernung vom Zentralpixel das Vertrauen in die betreffende Entscheidung im Zentralpixels mit fallender Wirksamkeit beeinflussen.

In einem abschließenden Durchgang durch alle Ergebnismatrizen wird dann für jedes Pixel die Entscheidung mit dem zuletzt höchsten Vertrauen selektiert. Die Programme für diesen Arbeitspunkt wurden am IPF implementiert. Das Resultat der Generalisierung ist in Abbildung 15 dargestellt. Einzelne Streupixel werden durch den Prozeß der Klasse ihrer Umgebung zugeordnet, wodurch eine

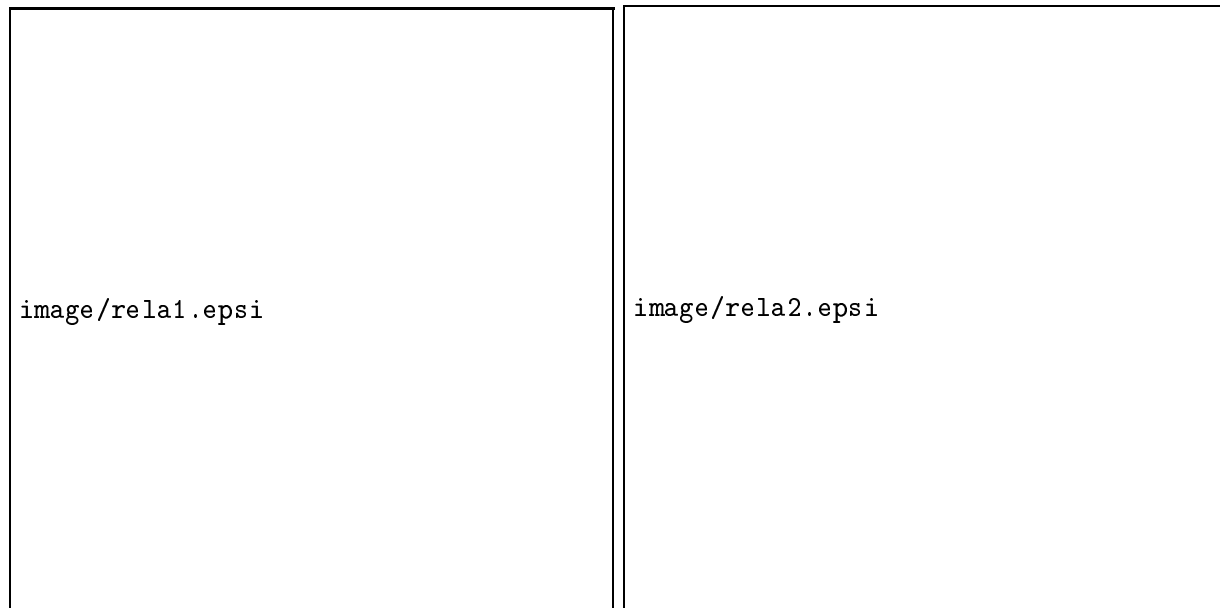


Abbildung 15: Generalisierung durch Relaxation

generalisierte, homogene Darstellung erreicht wird. Da der Prozeß nicht auf einer Mehrheitsentscheidung, sondern auf den Vertrauenswerten der Klassenzuordnung basiert, wird ein genereller Verlust von Details verhindert. Nur Einzelpixel mit einem schwachen Vertrauen in die Klassenzuordnung werden angepaßt, da diese mit hoher Wahrscheinlichkeit der Klasse in ihrer Umgebung angehören.

4 Durchgeführte Untersuchungen

Im Rahmen des Projektes wurden einige allgemeine Untersuchungen zur Auswertung von SAR-Bilddaten vorgenommen. Dabei wurden sowohl optische Bilddaten des LANDSAT TM, als auch L-Band Radardaten des japanischen JERS-1 auf ihre Eignung zur Kartierung der Landnutzung in Kombination mit den ERS-1 Daten untersucht. Weitere Untersuchungen bezogen sich auf die Eliminierung von Layover- und Shadowgebieten, die multitemporale Auswertung von SAR-Daten und die Probleme bei der Abbildung von Siedlungsbereichen in SAR-Bilddaten. Ziel dieser Untersuchungen war es, eine Basis für eine weitere Verbesserung der Kartierung zu schaffen.

4.1 Untersuchung von JERS-1 Daten für die Landnutzungskartierung

Im Rahmen des "JERS-1 Verification Programme" wurden einige Untersuchungen bezüglich der Eignung von JERS-Daten zur Landnutzungskartierung durchgeführt. Der Japanische JERS-1 unterscheidet sich bezüglich der SAR-Daten in erster Linie durch eine andere Aufnahme Frequenz: Es handelt

sich um ein L-Band Radar. Dadurch verändern sich auch die Abbildungseigenschaften der verschiedenen Landnutzungsklassen, was bei einer Kombination mit den ERS-1 Abbildungen im C-Band zu einer Verbesserung führen kann. Ergebnisse dieser Untersuchungen sind auch in [Sties et al., 1994] veröffentlicht.

4.1.1 Verwendetes Datenmaterial

Wir hatten je 3 Szenen des optisch/infraroten und des SAR - Sensors vom Gebiet des Oberrheingraben bestellt und bekamen die folgenden Datensätze geliefert:

JERS-1 OPS	JERS-1 SAR
1. Path 312 / Row 218; Kanäle 1 2 3 5 6 7 8 Datum 15.05.1993 Bildmitte N 49 : 06 / E 08 : 33 Bewölkung 7 5 5 3	1. 313 / 218 Datum 02.07.1992 Bildmitte N 49 : 07 / E 07 : 49
2. 312 / 219; Kanäle 1 2 3 5 6 7 8 Datum 15.05.1993 Bildmitte N 48 : 30 / E 08 : 19 Bewölkung 3 6 7 8	2. 312 / 218 Datum 04.05.1993 Bildmitte N 49 : 07 / E 08 : 41
3. 313 / 218; Kanäle 1 2 3 5 6 7 8 Datum 16.05.1993 Bildmitte N 49 : 06 / E 08 : 00 Bewölkung 7 5 5 3	
4. 313 / 218; Kanäle 1 2 3 Datum 03.05.1994 Bildmitte N 49 : 06 / E 07 : 59 Bewölkung 0 0 0 0	

Die Auswertung der Bilddaten des optisch/infraroten Sensors ist durch Bewölkung und durch Sensorfehler in den infraroten Kanälen stark erschwert; es gibt dazu noch keine Ergebnisse. Die Szene Nr. 2 des SAR - Sensors haben wir gemeinsam mit einem Tripel von ERS-1 Bilddaten, die in den Zeitpunkten 07. Juni, 16. Aug. und 20. Sept. 1992 aufgenommen wurden, den entsprechenden Prozeßschritten unterworfen und daraus eine Kartierung der Landnutzung erstellt.

Abbildung 16 zeigt eine Farbüberlagerung des JERS-1 Ausschnitts (in ROT) mit den entsprechenden Ausschnitten der beiden ersten ERS-1 Zeitpunkte (in GRUEN bzw. BLAU) im Maßstab 1 : 200.000. Die Stadt Karlsruhe in Bildmitte und der Rhein sind deutliche Orientierungsmerkmale in diesem Testgebiet.

4.1.2 Diskussion der Ergebnisse

Abbildung 17 zeigt das Endergebnis der Klassifizierung nach der Generalisierung durch Relaxation. Der Maßstab dieser Abbildung beträgt ebenfalls 1 : 200.000. Die Farbzuoordnung ist aus Abb. 18 zu ersehen.

Die Klasse 'Kleingarten' war nicht zuverlässig trennbar und wurde nicht ausgegeben. Das Ergebnisbild zeigt, daß die Trennung der Klassen 'Wasser' (dabei insbesondere bewegtes Wasser) und 'Wiese' bzw. 'lockere Siedlung' und 'Wald' unvollständig und stellenweise unzuverlässig ist. Die Trennung der ganzen Waldfläche in 3 Unterklassen ist an vielen Stellen unzuverlässig, insbesondere den Mischwald betreffend. Im Vergleich mit einer Klassifizierung der 3 ERS-1 Radarbilddatensätze ist die Hinzunahme eines weiteren Datensatzes des JERS-1 SAR-Sensors, der eine vom ERS-1 abweichende Frequenz und Polarisation hat, vorteilhaft; insbesondere die Siedlungen sind in dieser Kombination deutlicher

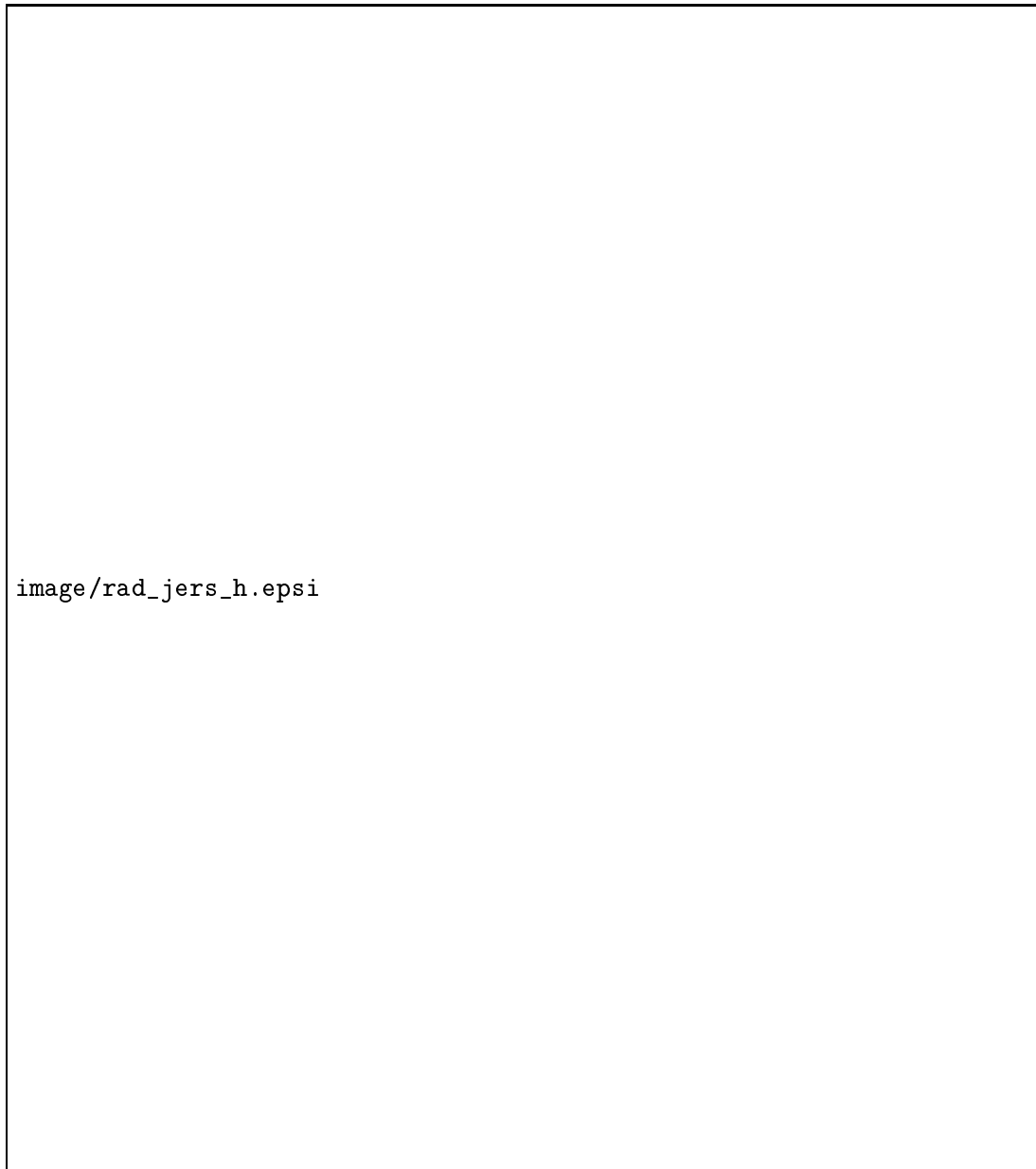


Abbildung 16: Geglättete Radarbilddaten mit JERS-1 in ROT und zweimal ERS-1 in GRUEN bzw. BLAU

charakterisiert, jedoch sind die Schwierigkeiten der Trennung einzelner Klassen grundsätzlich die gleichen.

Die Frage der absoluten Korrektheit dieses Klassifizierungsergebnisses ist nicht zu beantworten, solange wir keine aktuelle, flächendeckende Landnutzungskartierung als Vergleichsbasis besitzen. Wir haben die Klassifizierungsergebnisse mit dem Inhalt einer digitalisierten TK 50 vom Stand etwa Mitte der 80er Jahre (DSM des Militärgeographischen Amtes) verglichen; die Zahlen dieses Vergleichs sind in Tabelle 14 enthalten. Die Unterschiede der Flächenanteile zwischen DSM und dem Klassifizierungsergebnis von JERS-1 + ERS-1 bzw. DSM und ERS-1 sind sowohl der Veränderung der aktuellen Landnutzung innerhalb von etwa 8 Jahren als auch der Ungenauigkeit der Klassifizierung zuzurechnen.

Die Trennung zwischen 'Wiese' und 'Landwirtschaft' ist im DSM nicht enthalten. Die Aufteilung der gesamten Waldfläche im DSM in 'Nadel-' bzw. 'Laubwald' ist eher willkürlich und als Vergleichsbasis nicht brauchbar. Die Übereinstimmung zwischen der topographischen Karte und dem Ergebnis

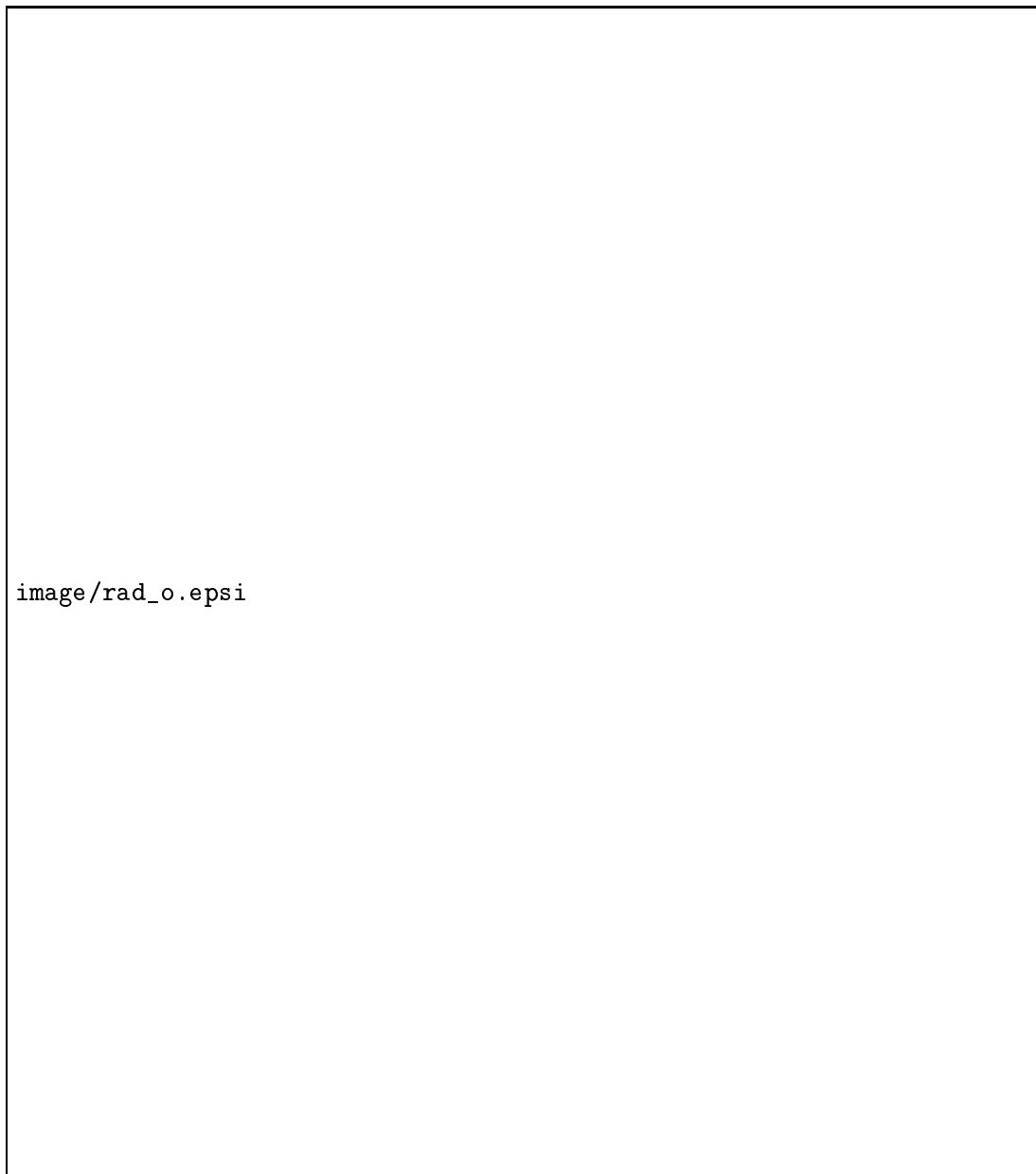


Abbildung 17: Ergebnis der Klassifizierung nach Generalisierung

Flächenanteile in Prozent	DSM	Klassifizierung JERS + ERS	Übereinst.	Klassifizierung ERS	Übereinst.
Wasser	3.1 %	2.9 %	1.9 %	2.6 %	1.9 %
Siedlung	12.4 %	8.4 %	6.0 %	5.2 %	3.5 %
Wiese	51.5 %	2.9 %	41.0 %	3.5 %	40.1 %
Landwirtschaft		42.6 %		48.6 %	
Wald	32.9 %	43.2 %	30.0 %	40.1 %	28.0 %

Tabelle 14: Vergleich der Klassifizierung mit dem DSM

image/legend/vers.epsi	Rückweisung
	Wasser
	lockere Siedlung
	Industrie
	Nadelwald
	Laubwald
	Wiese
	landwirtschaftliche Flächen
	Mischwald
	Kleingarten
	dichte Siedlung
	sonstiges
	Layover, Shadow

Abbildung 18: Farbzuoordnung und Klassenliste

der Klassifizierung der 4 Bilddatensätze von JERS-1 + ERS-1 ist insgesamt, insbesondere aber für die Klasse 'Siedlung', etwas größer als bei Verwendung der 3 Bilddatensätze des ERS-1 alleine.

4.2 Kombination der Abbildungen verschiedener operationeller Satellitensensoren zur Optimierung der Landnutzungsklassifikation

Die Verfügbarkeit verschiedener operationeller Satellitensensoren ermöglicht eine kombinierte Auswertung dieser verschiedenen Datenquellen. Da eine Kartierung basierend auf multitemporaler Radarbildauswertung zwar zeitlich gesehen sehr aktuell, in ihrer Qualität jedoch den Ergebnissen aus Kartierungen optischer Sensoren nachsteht, bietet sich eine Kombination der Daten mit dem Ziel an, die Aktualität der Radardaten mit der Präzision optischer Daten zu verbinden. In diesem Zusammenhang wurde untersucht, wie sich verschiedene Datenquellen kombinieren lassen, welche Resultate man daraus erhält und wo die Probleme bei solch einer Kombination sehr verschiedenartiger Datenquellen liegen. Ergebnisse dieser Untersuchungen sind auch in [Föller, 1994] detailliert dargestellt.

Für die Untersuchung standen Bilddaten von drei operationellen Satellitensensoren zur Verfügung: ERS-1 und JERS-1 als RADAR-Sensoren, sowie LANDSAT-TM als optischem Sensor. Diese Daten wurden so ausgewählt, daß sie alle aus der Vegetationsperiode des Jahres 1993 stammen. Zusätzlich erweiterten ein Klassifikationsergebnis von LANDSAT-TM 1991, topographische Karten, ein digitales Situationsmodell (DSM), eine digitalisierte Nutzungskartierung und das Poster "Satellitenblick auf Karlsruhe" die Datenbasis. Bearbeitet wurde ein Gebiet in der Rheinebene mit der Stadt Karlsruhe im Zentrum und einer Ausdehnung von 33,125 x 37,250 Kilometern. Dies entspricht, bei einer Rasterung von 25 x 25 Metern, einer Bildmatrix von 1325 x 1490 Pixeln. Die Koordinaten der oberen linken Ecke lauten:

	Rechtswert	Hochwert
UTM:	32434262.5	5449887.5
GK:	3434312.0	5451734.0

In den Abbildungen wurde der Übersicht halber nur ein Ausschnitt von 530 x 740 Pixeln der Bildmatrix dargestellt. Dies entspricht in etwa einem Maßstab von 1: 160 000. Sämtliche Berechnungen beziehen sich jedoch auf die ganze Bildmatrix. Teile der Bildmatrix waren in einer vorangegangenen Arbeit mit Hilfe einer Maske ausgeblendet worden. Die Maske war im Westen begrenzt durch das Ende der JERS-1 Szene und im Osten durch den Beginn des Schwarzwaldes: Es waren die Gebiete ausmaskiert, die aufgrund ihrer Topographie einer radiometrischen Korrektur bedurft hätten. Die Anzahl der Pixel im gesamten Bild betrug 1974250, davon waren 427760 Pixel, also 21.7 Prozent ausmaskiert.

4.2.1 Datenmaterial

Ein JERS-1 Bild vom 4. Mai 1993 lag bereits geocodiert für diesen Ausschnitt vor. Aufnahmeband, Polarisation, Inklination und Blickrichtungen des Sensors, wie auch für die im folgenden aufgeführten Sensoren, können zum Beispiel [Bähr und Vögtle, 1991] und [Kramer, 1994] entnommen werden. Vom 18. April 1993 und 1. August 1993 lagen jeweils eine Vollszene des Erderkundungssatelliten ERS-1 vor. Die Überlagerung der drei SAR-Kanäle ist in Abbildung 20 auf der rechten Seite dargestellt. Aus einem anderen Projekt lagen für die Jahre 1991 und 1993 LANDSAT- TM Ausschnitte in einem 30 Meter-Raster vor. Mit Hilfe einer Affintransformation nach Lagrange wurden sie in eine 25 Meter-Rasterung resampelt. Die Ausschnitte aus dem Jahre 1991 vom 11. Juli und vom 28. August waren beide wolkenfrei. Hingegen war im Jahr 1993 nur der Ausschnitt vom 30. Juni frei von Wolken. Das Bild vom 27. April war von Schleierwolken und das vom 1. August von Schäfchenwolken und deren Schatten gestört, was in Abbildung 19 dargestellt ist. Von den sieben verfügbaren Kanälen wurden



Abbildung 19: Wolken in einem Landsat-TM Bild

nur sechs verwendet, da der siebte, der thermale Kanal, eine schlechtere Rasterung von nur 120 x 120 Metern hat. In Abbildung 20 ist der LANDSAT-TM Ausschnitt vom 30. Juni 1993 auf der linken Seite dargestellt (die Kanäle 4/5/7 sind in in rot, grün und blau abgebildet).

4.2.2 Definition der Trainingsgebiete

Vor Beginn der Definition der Trainingsgebieten mußte eine Klassenliste aufgestellt werden. Der Umfang einer Klassenliste ist davon abhängig, wieviele Klassen man im n-dimensionalen Merkmalsraum noch mit vernünftigem Aufwand trennen kann. Somit war es sinnvoll, die Klassenliste anhand des Datensatzes mit der geringeren spektralen Auflösung aufzustellen, und sie sowohl für die Klassifizierung getrennt nach Sensoren als auch für die durchgeführte Kombination zu verwenden. Das Ziel war, einheitliche und damit leicht vergleichbare Ergebnisse zu erzeugen. Ein Zeitpunkt von LANDSAT-TM mit seinen sechs Kanälen hat eine wesentlich höhere spektrale Auflösung als die Kombination von zwei ERS-1 Zeitpunkten mit einem JERS-1 Zeitpunkt. Somit orientierte sich die Klassenliste an den Radar-Daten. Mit folgenden Klassen wurde eine erste Klassifizierung erstellt:



Abbildung 20: Landsat-TM (Kanäle 4, 5 und 7) und Radardaten (ERS-1, JERS-1, ERS-1)

- | | |
|--------------|-------------|
| 1. Reject | 6. Acker |
| 2. Wasser | 7. Obst |
| 3. Siedlung | 8. Wiese |
| 4. Industrie | 9. Sonstige |
| 5. Wald | |

Im nächsten Schritt wurden die Klassen Wasser, Siedlung, Wald und Acker weiter in Unterklassen zerlegt.

Ein Ziel dieser Untersuchung war, auch die landwirtschaftlichen Flächen aus den Kombinationen der Sensordaten in Unterklassen zu zerlegen. Feldbegehungen entfielen hier, da die Daten aus zurückliegenden Zeitpunkten stammen, zu denen keine Begehungen stattgefunden hatten. Um aber trotzdem Informationen über die Art der landwirtschaftlichen Bebauung im Zeitraum von April bis August 1993 zu erhalten, wurden Befragungen bei ortsansässigen Landwirten durchgeführt. Geeignet waren nur landwirtschaftliche Betriebe, die großflächig (mehr als einen Hektar) dieselbe Feldfrucht anbauten, um eine sichere Identifikation im Satellitenbild garantieren zu können. Außerdem mußte darauf geachtet werden, daß die Landwirte mit möglichst hoher Sicherheit wußten, was in diesem Zeitraum angebaut wurde. Im Prinzip war somit die Auswahl auf die Landwirte beschränkt, die hauptberuflich einen großen Betrieb führten. Günstigerweise lagen die Flächen der staatlichen Forschungsanstalten für Landwirtschaft und Viehzucht, die sehr große Flächen einheitlich bebauen, innerhalb des Testgebietes. Es wurden zehn Landwirte (die Forschungsanstalten mit einbezogen) befragt. Bei der Befragung trugen die Landwirte die entsprechenden Felder selbst in die entsprechenden topographischen Karten im Maßstab 1: 25 000 ein. Mit Hilfe dieser Karten wurden dann die Trainingsgebiete am Bildschirm digitalisiert, und zwar mit dem LANDSAT-TM Bild vom 30. Juni im Hintergrund. In diesem Bild waren

Feldstrukturen und Wege sehr gut zu erkennen, und somit konnten die Flächen der Trainingsgebiete leicht identifiziert werden. Der Versuch, die Trainingsgebiete mit einem RADAR-Bild im Hintergrund zu digitalisieren, war nicht sehr erfolgreich, da die Orientierung im SAR-Bild fast gar nicht möglich war. Letztendlich spielte es aber keine Rolle, mit Hilfe welchen Bildes die Trainingsgebiete digitalisiert wurden, da alle Bilder entzerrt und geocodiert waren. Das Ergebnis waren 70 potentielle Trainingsgebiete, also Flächen, die eindeutig lokalisiert werden konnten, und deren spektrale Signatur den Aussagen der Landwirte entsprach. Trainingsgebiete, innerhalb derer z.B. zwei Feldfrüchte identifiziert wurden oder deren Statistiken mit denen anderer Unterklassen markant kollidierten, wurden wegen der geringen Zuverlässigkeit gestrichen. Das Ergebnis der Befragung sah folgendermaßen aus (die Zahl in Klammern gibt jeweils die Häufigkeit an):

- Hafer (1)
- Weizen (11)
- Roggen (11)
- Gerste (6)
- Mais (25)
- Sonnenblumen (1)
- Hackfrüchte (3) (Zuckerrüben und Kartoffeln)
- Zwischenfrüchte (7) (Klee gras, Ölrettich, Gras und Wiese)
- Sonderkulturen (5) (Erdbeeren, Tabak, Landsberger Gemenge und Raps)

4.2.3 Klassifizierung getrennt nach Sensoren

Um in der Landwirtschaft die Feldfrüchte trennen zu können, ist es günstig, wenn man mehrere Aufnahmezeitpunkte hat, die in einer Vegetationsperiode liegen. Daher wurden die Bilder der beiden einkanaligen RADAR-Sensoren, zwei ERS-1 Zeitpunkte und ein JERS-1 Zeitpunkt, zu einem dreikanaligen Bild zusammengesetzt. Dies hatte den weiteren Vorteil, daß sich der spektrale Informationsgehalt erhöhte. Das Bild hatte somit je zwei Polarisationen, Frequenzen, Inklinationen und Blickrichtungen. Demgegenüber stand der spektral hochauflösende Sensor LANDSAT-TM nur monotemporal mit dem Bild vom 30. Juni 1993 "TM93-6" zur Verfügung. Die anderen beiden LANDSAT-TM Zeitpunkte dieser Vegetationsperiode wiesen das klassische Problem optischer Sensoren auf: sie waren von Wolken gestört. Das Resultat der LANDSAT-TM Klassifikation ist in Abbildung 21 auf der linken Seite dargestellt, die Zuordnung der Klassen kann der Legende in Abbildung 22 entnommen werden, die für alle dargestellten Ergebnisse gleich ist. Die Einteilung der Feldfrüchte in die Unterklassen und der prozentuale Anteil im Gesamtbild der TM-Klassifizierung war wie folgt:

Getreide_1 (Roggen, Gerste):	8,4%
Getreide_2 (Hafer, Weizen):	6,1%
Mais:	13,5%
Sonnenblumen:	0,3%
Hackfrüchte:	0,0%
Zwischenfrüchte:	0,4%
Sonderkulturen:	4,3%

Roggen und Gerste wurden zu Getreide_1 zusammengefaßt da sie im Merkmalsraum praktisch nicht trennbar waren. Es zeigte sich, daß es nicht möglich war auf die Feldfrüchte zu verzichten, die nur durch



Abbildung 21: Klassifikation mit LANDSAT-TM und ERS-1/JERS-1

wenige Trainingsgebiete vertreten waren. Sie repräsentierten jeweils einen nicht zu vernachlässigenden Teil des Merkmalsraumes. Das einzige Trainingsgebiet der Unterklasse Hafer wurde aufgrund seiner spektralen Ähnlichkeit mit den Trainingsgebieten von Weizen zu der Unterklasse Getreide_2 zusammengefaßt. Das Trainingsgebiet der Feldfrucht Sonnenblume hatte eine charakteristische Signatur und mußte somit als eigene Unterklasse aufgeführt werden. Somit war nahezu der ganze Merkmalsraum ausgefüllt. Die Klasse Hackfrüchte war trotz der drei Trainingsgebiete nicht im Ergebnis vertreten. Sie kollidiert im Merkmalsraum stark mit der Klasse Mais und wurde deshalb bei der Klassifikation vollständig als Mais klassifiziert. Die Klasse Sonnenblumen war in der Befragung nur einmal erschienen und im Bild mit 0,3 Prozent vertreten.

Die Klassifizierung der Radardaten erwies sich als wesentlich aufwendiger als dies bei den optischen Daten der Fall war. In den lockeren Siedlungen waren extrem hohe Varianzen und fast keine homogenen Flächen zu finden. In Waldgebieten konnte man zwar visuell Unterklassen erkennen, sie waren aber eher zufällig verteilt. Die Klasse Acker wies, wie zu vermuten war, aufgrund der drei Zeitpunkte eine hohe Dynamik auf. Allerdings konnte man nicht wie bei LANDSAT-TM die einzelnen Parzellen innerhalb der landwirtschaftlichen Flächen erkennen. Die größten Probleme liegen in der Verwechslung der Klassen lockere Siedlung und Wald bzw. Wasser und Wiese aufgrund ihrer ähnlichen spektralen Rückstreuung. Hier stellt sich die grundsätzliche Frage, welche Klasse von welcher verdrängt werden soll. Legt man den Schwerpunkt auf Siedlung, so wächst der Wald mit Siedlung zu und umgekehrt verschwinden die Siedlungen, wenn der Schwerpunkt auf den Wald gelegt wird. Entsprechend natürlich bei Wasser und Wiese. Ist nun der prozentuale Anteil der beiden Klassen am Gesamtbild stark unterschiedlich, so ist es sinnvoll, die Klasse mit dem größeren Anteil in die andere wachsen zu lassen, um den Fehler gering zu halten. Im umgekehrten Fall wäre sonst die schwach vertretene Klasse unverhältnismäßig häufig im Ergebnisbild aufgetreten. Natürlich darf dabei die prozentual schwächere

Klasse nicht verdrängt werden. Das Ergebnis der Klassifizierung der Radardaten ist in Abbildung 21 auf der rechten Seite dargestellt. Für die Klasse Acker wurden vorläufige Trainingsgebiete eingeführt, die zunächst nur die Aufgabe hatten, den Merkmalsraum dieser Klasse zu füllen. Schon dies erwies sich als schwierig wegen der hohen Dynamik und somit einer großen Vielfalt an Farbnuancen in den Äckern. Um den ganzen Merkmalsraum zu füllen, wurden 157 Trainingsgebiete benötigt, davon alleine 55 für die Landwirtschaft. Im zweiten Schritt wurden die Unterklassen eingeführt. Nun zeigte sich für Wasser, daß die Unterklasse stehendes Wasser von der Klasse Wiese gut trennbar war, im Gegensatz zu fließendem Wasser. Diese standen in starkem Konflikt mit der Wiese. Im Wald waren nur zwei Unterklassen, Laubwald und Nadelwald, deutlich trennbar. Nur ein Trainingsgebiet wurde als Mischwald eingeführt. Entgegen der Erwartungen, die bei dem ersten Eindruck entstanden waren, entsprach die Lage der Unterklassen in etwa der in dem Klassifikationsergebnis der LANDSAT-Daten. Innerhalb der Siedlung war die Aufteilung in Unterklassen ebenfalls gut, abgesehen davon, daß die Siedlung allgemein stark vom Wald verdrängt wurde. Manche Dörfer sind nur noch schwer erkennbar. Außerdem wurde vereinzelt Wald als Siedlung klassifiziert.

4.2.4 Kombination der Sensoren

Datengrundlage der Kombinationen unterschiedlicher, operationeller Sensoren war das LANDSAT-TM Bild 1993 sowie zwei ERS-1 Datensätze und ein Kanal des JERS-1. Somit waren alle neun verwendeten Kanäle aus der Vegetationsperiode des Jahres 1993. Um dem stark vergrößerten Merkmalsraum bei der Kombination Rechnung zu tragen und die Entstehung großer Reject-Bereiche zu verhindern, wurden die beiden Trainingsgebietsdateien der separaten Klassifikationen der Sensoren einfach zu einer zusammengefaßt. Die neue Datei enthielt 315 Trainingsgebiete, davon 158 aus der LANDSAT-TM und 157 aus der RADAR-Klassifizierung. Diese Basis wurde, wie auch bei den vorangegangenen Klassifikationen, durch Iteration weiter verbessert. Die Siedlung, die im LANDSAT-TM allgemein zu häufig klassifiziert wurde und im RADAR nur sehr schlecht identifiziert wurde, nahm ein sehr gutes Mittelmaß an. Besonders gut ist dies sichtbar in einigen landwirtschaftlichen Gebieten, die in der LANDSAT-Klassifizierung als Siedlung eingestuft wurden. Generell war die Klasse Siedlung mit ihren Unterklassen homogener geworden. Die Industrie, die in den bisherigen Ergebnissen recht verstreut vorkam, war nun mehr auf die tatsächlichen Industriegebiete, einen im Bau befindlichen Golfplatz und einige Kiesflächen an den Baggerseen konzentriert und somit realistischer geworden. Die Klasse Wiese wurde auf die Flächen reduziert, die auch in den Feldbegehungen als Wiese eingestuft worden waren. Die Klasse Obst nahm ähnlich der Siedlung ein Mittelmaß an, was ebenfalls durch die Feldbegehungen weitgehend bestätigt werden konnte. Rein visuell betrachtet hatte sich bei der Klasse Wasser praktisch nichts verändert. Eine Verschlechterung hatte offenbar der Wald erfahren, zumindest was seine Unterklassen betraf. Die Unterklassen, die in der LANDSAT-TM-Klassifizierung realistisch erschienen, wurden offensichtlich durch die RADAR-Sensoren verschlechtert, was sich in einer Art Verwischung der Grenzen äußerte. Letztendlich war eine Trennung der Unterklassen auch in der Landwirtschaft nicht zuverlässig möglich. Die Zusatzinformation des RADAR hatte in diesem Fall den LANDSAT-TM verschlechtert. Somit war das zweite Ziel der Verbesserung der Landwirtschaft durch die RADAR-Sensoren nicht erreicht worden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Trennung der Hauptklassen in der Kombination schärfer vollzogen worden war, und die Lage der einzelnen klassifizierten Flächen visuell betrachtet realistischer erschien. Demgegenüber hatten sich die Unterklassen innerhalb des Waldes verschlechtert, und die Unterklassen der Landwirtschaft waren nicht mehr zuzuordnen. Linienhafte Elemente wie Straßen, die im LANDSAT-TM relativ gut erkennbar waren, waren in der Kombination unterdrückt worden. Aus diesem Grund wurden diejenigen Klassen, die eine Verschlechterung erfahren hatten, für die Kombination ausmaskiert und stattdessen das Ergebnis aus der LANDSAT-TM Klassifikation eingeblendet. Das Ergebnis der Kombination ist in Abbildung 22 dargestellt.

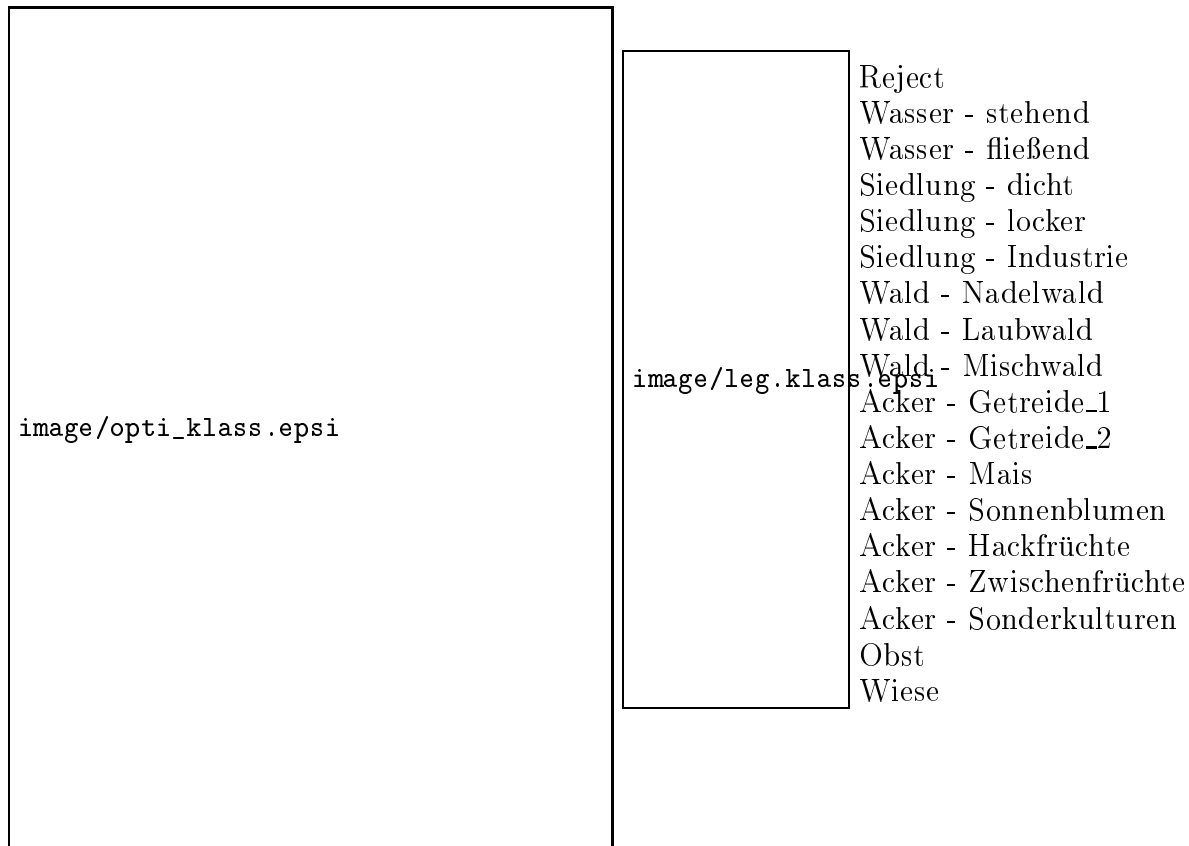


Abbildung 22: Klassifikation mit allen Sensordaten und Farbzuordnung zur Klassenliste

4.2.5 Beurteilung und Vergleich

Um einen Überblick über die Größenordnungen der Fehler zu erhalten, wurden mit logischen Vergleichen Differenzbilder erstellt und der prozentuale Anteil der voneinander differierenden Flächen bestimmt. Tabelle 15 gibt einen Überblick über die Ergebnisse: In den ersten beiden Spalten stehen die Bilder die verglichen wurden und in den weiteren sechs Spalten, in Abhängigkeit der Klassen, die entsprechenden Differenzen in Prozent. Beispielsweise ergab ein logischer Vergleich zwischen der Kombination und der LANDSAT-TM Klassifikation bezüglich der Klasse Wasser, daß die beiden Ergebnisbilder um 0,8 Prozent differieren, bezogen auf die TM-Klassifikation.

Bild 1	Bild 2	Wasser	Siedlung	Wald	Acker	Obst	Wiese
Kombination	LANDSAT-TM	0,8	4,5	4,2	10,8	1,0	3,9
Kombination	RADAR	2,3	8,9	11,3	14,6	1,9	8,5
Kombination	DSM	1,8	6,1	5,9	12,0	0,8	1,2
LANDSAT-TM	RADAR	2,4	10,8	13,8	17,9	2,3	9,9
LANDSAT-TM	DSM	2,0	7,5	6,6	15,7	0,4	4,0
RADAR	DSM	2,0	8,1	13,1	19,3	1,9	9,3

Tabelle 15: Prozentuale Abweichungen aus den Differenzbildern

Die Radar-Klassifikation weist gegenüber allen anderen Bildern hohe Differenzen auf. In Kombination mit dem visuellen Eindruck ist die geringe Zuverlässigkeit, die auch alle anderen Beurteilungen bisher bestätigen, ersichtlich. Beim Vergleich mit dem DSM spielen die erheblichen Fehler durch Digitalisierung sowie mangelnde Aktualität des DSM eine entscheidende Rolle, so daß hier keine endgültige

Aussage gemacht werden kann. Es ist jedoch ersichtlich, daß in den hier betrachteten Hauptklassen eine Kombination von optischen mit Radar- Daten in der Regel eine Verbesserung der Genauigkeit bewirkt. Geht es aber darum, einzelne Hauptklassen weiter zu separieren, so bewirkt die Hinzunahme der Informationen der Radarsensoren eine Verschlechterung der Trennung, was insbesondere in den Klassen Acker und Wald zur Geltung kommt.

4.3 Kombination von ERS-1 Daten aus sich kreuzenden Orbits zur Reduzierung von Layover- und Shadowgebieten

Der Einsatz von RADAR-Sensoren in der Fernerkundung ermöglicht es, die Erdoberfläche nahezu wetterunabhängig aufzunehmen. Die Aufnahmen werden weder von Regen, Nebel noch von Wolken beeinträchtigt. Dafür treten andere Probleme auf, wie das *Speckle*-Rauschen und die *Layover*, *Shadow*- und *Foreshortening*-Effekte. Beim *Shadow*- Effekt kommt es, wie der Name schon sagt, zu Abschattungen, d. h. der RADAR-Sensor kann bestimmte Gebiete nicht erfassen. Dieser Effekt tritt an Berghängen auf, die dem RADAR-Sensor abgeneigt sind. Der *Shadow*- Effekt hängt vom Einfallswinkel des RADAR-Strahls in Aufnahme richtung (*range*) und der Neigung der Erdoberfläche zum Sensor ab. Beim *Foreshortening*-Effekt kommt es, durch die Neigung der Erdoberfläche zum Sensor, zu einer Komprimierung der Information. So wird z. B. die Information eines Hanges bei der Projektion in die Ebene auf wenige Pixel verkürzt, obwohl diesem Hang, aufgrund seiner Ausmaße, wesentlich mehr Pixel zugeordnet werden müßten. Der *Layover*- Effekt tritt dann auf, wenn die Erdoberfläche so stark zum Sensor hin geneigt ist, daß die Information nicht mehr pixelbezogen zugeordnet werden kann.

Durch Verwendung von Szenen aus dem Ascending und dem Descending Orbit ergibt sich, bedingt durch einen völlig anderen Blickwinkel auf das Gelände, eine sehr verschiedene Ausdehnung der Layover- und Shadowgebiete. Diese Tatsache kann verwendet werden, um die nicht abbildbaren Bereiche zu eliminieren oder zumindest zu reduzieren. Hierzu müssen die Bilddaten aus den verschiedenen Orbits einander überlagert, beziehungsweise miteinander kombiniert werden. Um den Aufwand bei der interaktiven Klassifikation so gering wie möglich zu halten, ist es erstrebenswert, die Bilder miteinander zu verschneiden, so daß sich eine einheitliche Datenbasis von 3 Kanälen ergibt. Alternativ dazu wäre eine Kombination der Daten, durch Hinzufügen weiterer Dimensionen des betrachteten Merkmalsraumes, und der anschließenden Klassifikation mit Masken, welche die nicht abbildbaren Gebiete eines jeden Bildkanales identifizieren, denkbar. Durch die Variation der zur Verfügung stehenden Kanäle innerhalb eines Bildes gestaltet sich jedoch die Trainingsgebiets-Definiton etwas aufwendiger, weswegen dieser Ansatz nicht weiter verfolgt wurde. An vier ERS-1 Szenen wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, die nicht abbildbaren Gebiete zu eliminieren. Der Anteil von Layover und Shadow in den einzelnen Szenen ist in den Tabellen 16 und 17 dargestellt. Eine Darstellung der Ergebnisse der Kombination von Szenen zur Verminderung von Layover und Shadow ist auch in [Joos, 1995] zu finden.

Ausschnitt (je 1000 · 1000 Pixel)	von <i>Layover</i> betroffen	entsprechende Fläche
Karlsruhe_5678_2619	2.3%	14.375km ²
Stuttgart-Nord_9915_2619	1.3%	8.125km ²
Sulzbach_9106_981	3.8%	23.750km ²
Bretten_9378_981	2.6%	16.250km ²

Tabelle 16: *Layover* in den einzelnen Szenen

Der „Karlsruhe-Ausschnitt“ wurde aus dem *descending* Orbit aufgenommen, ebenso der „Stuttgart-Nord-Ausschnitt“, nur stammt diese Aufnahme aus einem parallelen Orbit. Im Überlappungsbereich beider Aufnahmen befindet sich das zu untersuchende Gebiet. Analog verhält es sich

Ausschnitt (je 1000 · 1000 Pixel)	von <i>Shadow</i> betroffen	Fläche
Karlsruhe_5678_2619	0%	0km ²
Stuttgart-Nord_9915_2619	0%	0km ²
Sulzbach_9106_981	0.0006%	0.369km ²
Bretten9378_981	0.0004%	0.228km ²

Tabelle 17: *Shadow* in den einzelnen Szenen

mit den anderen beiden Aufnahmen aus dem *ascending* Orbit. Auch hier stammen beide Aufnahmen aus zueinander parallelen Orbits. Es liegen also vier Ausschnitte vor, die sich durch verschiedene Aufnahmerrichtungen des Radarstrahls voneinander unterscheiden.

Die Szenen wurden einander so überlagert, daß Bildinformation eines Ausschnitts in *Layover/Shadow*-Gebiete eines anderen Ausschnitts eingeblendet werden konnten, um so die *Layover/Shadow*-Gebiete insgesamt zu minimieren. Die vier Ausschnitte wurden einander so zugeordnet, daß jeweils Bildinformation einer Szene aus dem *ascending* Orbit in die *Layover/Shadow*-Gebiete einer Aufnahme aus dem *descending* Orbit eingeblendet wurde. Um Bilddaten eines Ausschnitts, z. B. aus dem *ascending* Orbit, in die *Layover/Shadow*-Gebiete des entsprechenden Ausschnitts aus dem *descending* Orbit einblenden zu können, ist es daher unbedingt notwendig, die Radiometrie der einzelnen Szenen aneinander anzupassen. Wird dies nicht durchgeführt, so kommt es zu Grauwertsprüngen an den Rändern der *Layover/Shadow*-Gebiete, die das Ergebnis einer Klassifizierung verfälschen. Aus diesem Grund mußten die vier Ausschnitte sowohl geometrisch als auch radiometrisch untersucht und gegebenenfalls aneinander angepaßt werden.

Bei der geometrischen Untersuchung wird die Lagegenauigkeit der verschiedenen Ausschnitte überprüft. Dies wurde anhand des Grauwertverlaufs an verschiedenen Kanten im Radarbild durchgeführt. Um eine radiometrische Anpassung zu erreichen, wurden geeignete Gebiete ausgewählt, die über die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte und Aufnahmepositionen hinweg gleichbleibende Grauwerte aufweisen, alle anderen Gebiete wurden ausmaskiert. Anschließend wurde eine Statistik über diese verbleibenden Gebiete errechnet, die Auskunft gibt über deren Grauwertverteilung. Anhand dieser Statistik wurden die für die radiometrische Anpassung benötigten Größen bestimmt.

4.3.1 Geometrieuntersuchung

Um den Zeitaufwand für die aufwendige Paßpunktsuche zu verringern, wurde nicht die absolute Lagegenauigkeit einer einzelnen Szene, sondern die relative Lagegenauigkeit der vier Szenen zueinander untersucht. Legt man die vier Ausschnitte in allen Kombinationen als RGB-Bild übereinander und sucht sich dann entsprechende Kanten im Bild (z. B. Waldränder, Flüsse oder Straßen), so kann man anhand der Grauwertsprünge in den einzelnen Kanälen feststellen, ob sich die gewählte Kante in jedem Kanal an der gleichen Stelle befindet. Hierbei ist es sinnvoll, Kanten zu suchen, die in verschiedene Himmelsrichtungen verlaufen, um die relative Lagegenauigkeit erschöpfend zu untersuchen. Diese Methode der geometrischen Rektifizierung ist wesentlich schneller zu bewerkstelligen als die Paßpunktsuche, da Kanten im Bild einfacher zu finden sind. Da die Geocodierung auf ± 1 Pixel genau ist, darf die Abweichung der Grauwertsprünge an den Kanten in den einzelnen Radarbildern auch nicht größer als 1 Pixel sein. In Abbildung 23 ist der Grauwertverlauf an einer Kante in drei Kanälen dargestellt. Tabelle 18 zeigt eine Zusammenstellung der Ausrichtung der Kanten und die Abweichung der Grauwertsprünge in den einzelnen Kanälen in Pixeln. Der Grauwertverlauf an den Kanten einer Szene diente als Bezug, die Grauwertverläufe an Kanten der drei anderen Szenen wurden damit verglichen. Das Ergebnis dieser Art der geometrischen Untersuchung ist, daß die vier Ausschnitte geometrisch gut zusammenpassen. Alle Grauwertsprünge an den untersuchten Kanten weichen nicht mehr als 1 Pixel voneinander ab.

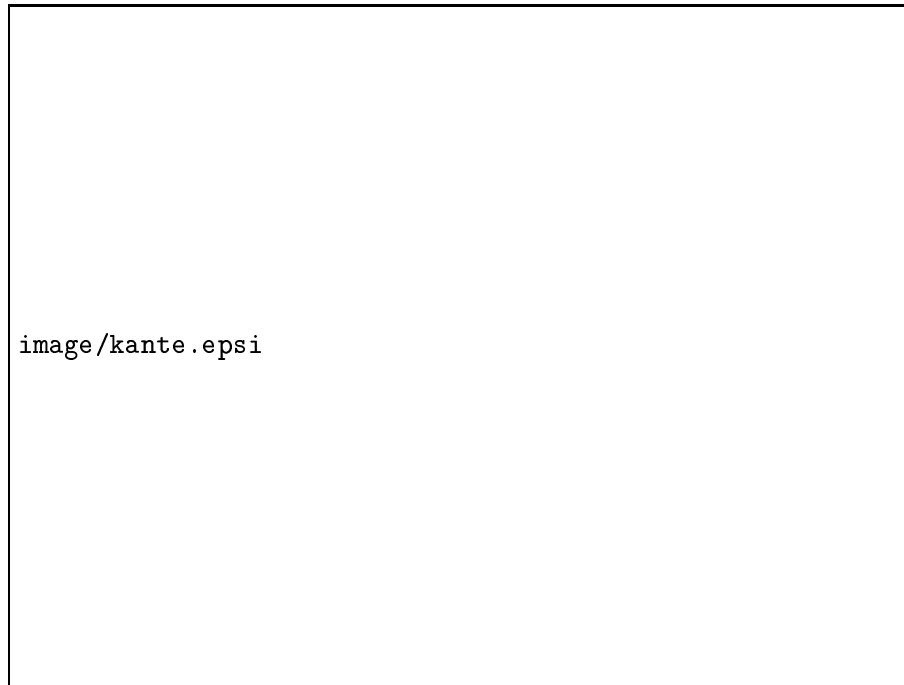


Abbildung 23: Grauwertverlauf zwischen zwei markierten Pixeln in drei Kanälen

Ausrichtung der Kanten	Abweichung der Grauwertsprünge (in Pixel)			Abweichung insgesamt (in Pixel)
N - S	1	0	1	1
N - S	0	0	0	0
N - S	1	1	0	1
O - W	0	1	0	1
O - W	1	1	1	1
O - W	0	0	0	0
NO - SW	0	1	1	1
NO - SW	0	0	0	0
NO - SW	1	1	1	1
NW - SO	1	0	0	1
NW - SO	0	0	0	0
NW - SO	1	1	0	1

Tabelle 18: Grauwertsprünge an Kanten

4.3.2 Radiometrieuntersuchung

Als weiteres Kriterium für die Einblendung von Bilddaten eines Ausschnitts in *Layover/Shadow*-Gebiete eines anderen muß die Homogenität der Radiometrie überprüft werden. Dies bedeutet insbesondere die Untersuchung der Grauwerte der Pixel im Randbereich der *Layover/Shadow*-Gebiete. Eine erste Überprüfung der Grauwertverteilung in den vier Ausschnitten ergab große Unterschiede im Grauwertverlauf. Diese Unterschiede können mehrere Ursachen haben. So spielen die verschiedenen Aufnahmepositionen des Satelliten, aber auch die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte eine Rolle. Weitere Ursachen für die unterschiedlichen Grauwerte sind die Bodenbedeckung und der Feuchtigkeitsgrad der Geländeoberfläche. Eine Anpassung der Radiometrie ist somit unumgänglich.

4.3.3 Radiometrische Anpassung

Für die radiometrische Anpassung ist es sinnvoll, Gebiete zu wählen, die über die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte gleichbleibende Rückstreuwerte liefern. Landwirtschaftlich genutzte Flächen wie Äcker scheiden daher aus, da sich hier über längere Zeiträume der Bewuchs ändert und dadurch die Grauwerte dieser Gebiete eine hohe temporale Dynamik aufweisen. Auch Gewässer eignen sich wenig für eine Anpassung, da die Remission stark mit der Wellenbewegung, und somit mit der Windstärke korreliert ist. Siedlungsflächen sind geeigneter, da in diesen Gebieten, selbst zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten, relativ gleichbleibend hohe Rückstreuwerte meßbar sind. Die Remission ist hier aber stark vom Einfallswinkel, und somit vom Satellitenorbit abhängig, was durch die zufällige Konstellation von Doppelreflexionen zustandekommt, wie sie für Siedlungen typisch sind. Somit sind auch Siedlungsgebiete für eine Anpassung wenig geeignet. Wiesen sind prinzipiell gut geeignete Gebiete für eine radiometrische Anpassung, da hier die Grauwerte über die verschiedenen Zeitpunkte keine hohe Dynamik aufweisen. Wiesen scheiden jedoch aus einem anderen Grund aus: Sie sind im *DSM*, das zur automatischen Ausmaskierung verwendet werden kann, nicht als separate Klasse ausgewiesen. Es hat sich gezeigt, daß Waldflächen zu unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten und bei unterschiedlichen Aufnahmepositionen relativ gleichbleibende Rückstreuwerte aufweisen. Dies zeigte sich auch bei der Untersuchung der Grauwertverteilung in den Waldgebieten der verschiedenen Ausschnitte. Somit eignen sich lediglich die Waldgebiete als homogene Gebiete zur Anpassung der Radiometrie.

Mit Hilfe des Digitalen Situationsmodells (*DSM*) konnten sämtliche Gebiete, die nicht zur Klasse „Wald“ gehören, aus den vier Ausschnitten ausgeblendet werden. Eine einfache Möglichkeit der radiometrischen Anpassung besteht in der Verwendung eines linearen Ansatzes der Form

$$y = a \cdot x + b,$$

wobei x den ursprünglichen, y den korrigierten Grauwert und a, b die Parameter der Anpassungsfunktion darstellen. Für die Bestimmung der Parameter zur radiometrischen Anpassung der Szenen aneinander wird eine Statistik über die Grauwertverteilung in den vier Waldausschnitten berechnet. Die Untersuchung der Statistiken verschiedener Bodenbedeckungsklassen zeigte, daß das additive Korrektur-Glied vernachlässigbar ist. Die multiplikativen Korrekturglieder sind in Tabelle 19 aufgeführt. Abbildung 24 zeigt die Verteilung der Grauwerte nach der Anpassung. Mit diesen Korrek-

Ausschnitt	häufigster Grauwert	Quotient	multiplikatives Korrekturglied
Karlsruhe_5678_2619	95	$\frac{95}{95}$	1
Stuttgart-Nord_9915_2619	104	$\frac{95}{104}$	0.9135
Sulzbach_9106_981	77	$\frac{95}{77}$	1.2338
Bretten_9378_981	87	$\frac{95}{87}$	1.0920

Tabelle 19: Multiplikative Korrekturglieder

turgliedern wurde anschließend eine radiometrische Anpassung des jeweiligen gesamten Ausschnitts durchgeführt. Eine erneute Überprüfung der Ausschnitte ergab, daß beim Einblenden keine Grauwertsprünge mehr auftreten, die eine Fehlklassifizierung zur Folge hätten.



Abbildung 24: Grauwertverteilung der Waldgebiete nach Anpassung

4.3.4 Minimierung der Layover/Shadow-Gebiete

Durch diese Methode des Ineinandereinblendens von Bildinformation ließen sich die *Layover/Shadow*-Gebiete in den Ausschnitten „Karlsruhe“ und „Stuttgart“ stark verringern. Im Karlsruhe-Ausschnitt beträgt die Verringerung der *Layover/Shadow*-Gebiete 77.7%. Im Stuttgart-Ausschnitt sind es sogar 79.5%.

Tabelle 20 zeigt die Verringerung der *Layover/Shadow*-Gebiete, die durch unterschiedliche Kombinationen von Szenen aus sich kreuzenden und parallelen Orbits erreicht werden kann. Da im Karlsruhe-

Ausschnitt	Karlsruhe_5678_2619	Stuttgart-Nord_9915_2619
von Layover/ Shadow betroffene Pixel	23189	13326
Einblendung paralleler Orbit	12875	12875
Verringerung	44.5%	3.4%
Kombination asc. und desc. Orbit	5172	2732
Verringerung	77.7%	79.5%

Tabelle 20: Verringerung von *Layover/Shadow* durch verschiedene Kombinationen

Ausschnitt vor der Einblendung wesentlich mehr Pixel betroffen waren, ist dort die Verringerung auch größer als im Stuttgart-Ausschnitt (44.5% im Gegensatz zu 3.4%). Das Resultat der Klassifikation ohne und mit Verwendung der komplementären Orbits ist in Abbildung 25 dargestellt. Das Ausmaß der Verminderung der nicht abbildbaren Gebiete wird hier sehr deutlich, eine Eliminierung aller Gebiete ist jedoch nicht möglich.



Abbildung 25: Klassifikation ohne und mit Verwendung der Komplementären Orbits

4.3.5 Beurteilung

Mit Hilfe der beschriebenen Methode der Dateneinblendung lassen sich die in Radarbildern auftretenden geometrisch bedingten Effekte minimieren. Durch die Kombination von Szenen verschiedener Orbits konnten die *Layover/Shadow*-Gebiete der untersuchten Szenen um knapp 80% verringert werden. Voraussetzung für diese Verringerung ist, daß die ausgewählten Szenen geometrisch und radiometrisch einander angepaßt sind. Die größte Reduzierung von *Layover/Shadow*-Gebieten wird erreicht, wenn Szenen aus dem *ascending* Orbit mit Szenen, die aus dem *descending* Orbit aufgenommen wurden, kombiniert werden.

Mit dem hier verwendeten einfachen Ansatz der radiometrischen Anpassung lassen sich die verschiedenen Szenen so gut einander anpassen, daß bei der Einblendung von Bildinformation keine zu Fehlklassifizierung führenden Grauwertsprünge mehr auftreten. Ein Problem besteht in der Auswahl von Gebieten zur Bestimmung der Parameter für die radiometrische Anpassung. Es wurden die Waldgebiete herangezogen, da hier über die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte hinweg mit relativ gleichbleibendem Rückstreuverhalten zu rechnen ist. Wiesen würden sich ebenfalls eignen, da sie ein ähnliches Rückstreuverhalten aufweisen, allerdings konnten Wiesen nicht zur automatischen Bestimmung der Anpassungsparameter herangezogen werden, da diese Klasse nicht im DSM vorhanden ist und somit nicht ausmaskiert werden konnte.

Ein weiterer Aspekt für die Einblendung von Bildinformation ist der Einfluß der Aufnahmerichtung auf das Auflösungsvermögen. Durch unterschiedliche Aufnahmerichtungen des Radarsensors, z. B. durch Aufnahmen aus *ascending* und *descending* Orbit, ändert sich der Winkel, unter dem der Radarstrahl auf die Oberfläche trifft. Je nach Neigung der Oberfläche kann so in einer Aufnahme ein besseres lokales geometrisches Auflösungsvermögen erreicht werden als in der anderen. Somit könnte an Stellen, wo mehrere Aufnahmen zur Verfügung stehen, die Information eingeblendet werden, die über die örtlich größte geometrische Auflösung verfügt.

4.4 Analyse nicht differenzierbarer ERS-1 SAR-Signaturen in Siedlungsbereichen

Die Signaturen in ERS-1 SAR-Abbildungen weisen insbesondere im Bereich von Siedlungen sehr große Variationen auf. Die hohen Rückstreuwerte, die man häufig in Siedlungen beobachten kann, sind durch Doppelreflexionen (sogenannte double-bounds reflections) oder "Corner Reflexionen" — gebildet durch senkrechte Gebäudeteile und waagrechte Bodenbereiche — oder durch Direktreflexionen an Dachschrägen verursacht. Es gibt jedoch Beispiele von Siedlungsbereichen, in denen solche starken Rückstreuungen nicht auftreten, wodurch die Erkennung durch Klassifizierung unmöglich wird. Diese Siedlungsbereiche werden — unabhängig von deren Ausdehnung — mit einer der Klasse Wald vergleichbaren Signatur abgebildet. Als Ursache dieses Phänomens sind die Orientierung der Gebäude im Bezug auf die Einstrahlrichtung des Sensors, oder die Neigung der Dachflächen sowie die Art der Bepflanzung in unmittelbarer Umgebung der Gebäude denkbar. Das Verschwinden des siedlungstypischen Radarechos wurde an Einzelbeispielen analysiert. Dazu wurde eine ausreichend große Zahl von Siedlungsbereichen mit unterschiedlichen Signaturen anhand von Karten und durch Besichtigung vor Ort untersucht, um mögliche Zusammenhänge aufzuzeigen die in Vorschlägen zur Verbesserung der Klassifizierungsprobleme resultieren. Die vollständigen Ergebnisse sind in [Czech, 1995] zusammengefaßt.

4.4.1 Methodik der Untersuchung

Da das Phänomen "verschwindende Siedlung" in den meisten Radarbildern auftritt, wurden mehrere unterschiedliche Untersuchungsbereiche ausgewählt, um von zufälligen Ergebnissen aus nur einem Testgebiet unabhängig zu werden. So wurden die Schwerpunkte auf drei Gebiete verteilt: die Regionen Karlsruhe, Stuttgart und Heilbronn. Diese Bereiche liefern ausreichend Informationen über Siedlungen, die in ihrer ganzen Ausdehnung erfaßt wurden, Siedlungen, die dieselbe Signatur wie die Klasse Wald aufweisen (obwohl diese oft inmitten erfaßter Siedlungen liegen), Siedlungen in allen Dichte-Variationen: locker und dicht bebaut, von Hoch- oder Einfamilienhäusern geprägt. Wichtig für die Auswahl der Gebiete war nicht nur das Vorhandensein von Satellitenbildern, sondern zusätzlich von Luftbildern, die eine sehr gute Hilfe bei der Interpretation der auftretenden Erscheinungen waren. Die folgenden Siedlungsbereiche wurden zur Untersuchung des Problems bearbeitet:

- Region Karlsruhe:
 - Karlsruhe-Neureut, Karlsruhe-Rüppurr, Karlsruhe-Mühlburg
 - Wörth am Rhein, Maximiliansau
 - Forchheim, Mörsch, Durmersheim
 - Blankenloch, Friedrichstal
- Region Stuttgart:
 - Grafenau, Döffingen (mit Luftbild)
 - Großbettlingen (mit Luftbild)
 - Stuttgart-Heumaden (nur als Luftbild)
- Region Heilbronn:
 - Frankenbach
 - Böckingen
 - Sontheim
 - Horkheim
 - Schwäbisch-Hall

Siedlungen, die vom Radarsensor vollständig erfaßt werden, zeigen ein reflektiertes Signal sehr hoher Intensität, das sich im Radarbild als mehr oder weniger heller Bereich niederschlägt. Dieses Signal sehr hoher Intensität entsteht entweder durch Dachreflexionen (z.B. an Hausdächern) oder über sogenannte Corner Reflektoren, bei denen der Radarstrahl mehrere Male an ebenen Flächen (z.B. Hauswand, Rasen, ...) gebrochen wird, bevor er zum Sensor zurückgelangt. Um nun geeignete Parameter zur Untersuchung des Phänomens nicht differenzierbarer Signaturen in Siedlungsbereichen abzuleiten, wurden die Dächer der Häuser sowie der zurückgelegte Weg des Radarstrahls betrachtet. Hieraus wurden folgende Kriterien, die in jedem Testgebiet untersucht wurden, festgelegt:

Dachneigung Diese wurde mit Hilfe einer Dachneigungsschablone ermittelt.

Ausrichtung der Gebäude zum Sensor Die Stellung der Häuser in Bezug auf die Himmelsrichtungen wurde mit einem Kompaß auf wenige Grad genau ermittelt.

Bodenversiegelungsgrad Dieser enthält das geschätzte Verhältnis von versiegeltem Flächenanteil zu freier Grünfläche eines Grundstücks. Ebenso wurde hier die Art und das Maß der Bebauung erfaßt.

Art und Anordnung der Bepflanzung um die Häuser Dieser Parameter wurde weiter aufgliedert in: Abstand der Begrünung vom Gebäude (geschätzte Werte), Art und Höhe der Bepflanzung (geschätzte Werte), Straßenbegleitgrün.

Diese Parameter wurden in jedem Testgebiet durch Ortsbegehung untersucht und die gewonnenen Daten in einem Erhebungsblatt dokumentiert.

4.4.2 Ergebnisse

Im folgenden sind die Ergebnisse der Untersuchung für die einzelnen im Abschnitt 4.4.1 beschriebenen Parameter dargestellt.

4.4.2.1 Ausrichtung der Gebäude zum Sensor Denkbar für ein Verschwinden der Information Siedlung wäre eine ungünstige Ausrichtung des Aufnahmeobjektes zum einfallenden Radarstrahl. Wird der Radarstrahl nicht annähernd in dieselbe Richtung reflektiert, aus der er zum Objekt gelangt, so folgt aus dem Brechungsgesetz nach Snellius (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) eine Ablenkung des Radarechos weg vom Sensor der Satelliten-Plattform. Somit geht ein großer Teil der Energie, die der Radarstrahl enthält, verloren. In den untersuchten Gebieten wurde die Ausrichtung der Gebäude mit Hilfe eines Kompaß ermittelt. Hierbei hat sich gezeigt, daß die Häuser gemäß städtebaulichen Gesichtspunkten vorwiegend in den Orientierungen Nord - Süd, Ost - West, Nordost - Südwest sowie Nordwest - Südost stehen. Dies betrifft zwar die Mehrzahl der Bauten, jedoch enthält jede Siedlung—ob nun historisch gewachsen oder nicht— meist alle nur denkbaren Orientierungen, da Gebäude entsprechend den örtlichen Gegebenheiten gebaut werden, d.h. sie folgen Höhenlinien, Straßenfluchten oder Waldgrenzen und fügen sich so in das vorhandene Gelände ein. Die Anzahl erfaßter und nicht erfaßter

Orientierung	N - S	NO - SW	O - W	NW - SO
Erfasste Siedlung	129	178	139	176
Nicht erfasste Siedlung	152	122	158	143

Tabelle 21: Erfasste und nicht erfasste Häuser verschiedener Orientierungen

Siedlungen bei verschiedenen Orientierungen ist in Tabelle 21 dargestellt. Man kann sehr deutlich erkennen, daß die Ausrichtungen der Häuser in erfaßten bzw. nicht erfaßten Siedlungsbereichen keiner großen Streuung unterworfen sind. Bei einer Orientierung der Gebäude in Nord - Süd bzw. Ost - West

Richtung werden Siedlungen etwas schlechter vom Sensor erfaßt. Bei einer Ausrichtung der Häuser in Nordost - Südwest bzw. Nordwest - Südost Richtung ist ein größerer Unterschied zwischen erfaßter und nichterfaßter Siedlung festzustellen. Die bessere Erfassung von Siedlungsbereichen ist hier vermutlich auf die eher orthogonale Orientierung bezüglich des Sensors zurückzuführen, wodurch die Bedingung einer Doppelreflektion an Hauswand und Erdoberfläche gegeben ist. Insgesamt ist der Einfluß der Orientierung jedoch eher von untergeordneter Bedeutung.

4.4.2.2 Dachneigung Das erste Objekt, auf das ein einfallender Radarstrahl in einer Siedlung trifft, ist das Dach eines Hauses. Da hier ein Radarecho meist ungehindert reflektiert werden kann, drängt sich die Frage nach dem Rückstrahlverhalten in Abhängigkeit von der Dachneigung geradezu auf. Bei der Untersuchung dieses Parameters wurde festgestellt, daß die Dachneigungen in Siedlungsgebieten allgemein zwischen 25 und 50 Grad liegen, wobei sich die Mehrzahl zwischen 35 und 45 Grad bewegt und alle niederen bzw. höheren Werte mehr oder weniger selten zu finden sind. Da jedoch der Radarstrahl des ERS-1 mit einem Einfallswinkel von 23 Grad auf die Erdoberfläche und somit auch auf die Hausdächer trifft, folgt aus den physikalischen Reflektionsgesetzen eine optimale Rückstrahlung des Radarechos bei einer Dachneigung von 23 Grad.

Liegen in Siedlungsgebieten Häuser mit Flachdächern vor, so wird an ihnen der Radarstrahl hauptsächlich in eine Richtung reflektiert, die vom Sensor weit entfernt ist. (Dieses Phänomen tritt ebenso bei asphaltierten Straßenzügen auf). Betrachtet man nun den am häufigsten auftretenden Fall einer Dachneigung zwischen 35 und 45 , so ist leicht einzusehen, daß auch hier der einfallende Radarstrahl nach unten abgelenkt wird und nicht direkt zum Sensor zurückgestreut wird. Also auch hier ein starker Verlust der abgestrahlten Energie. Der optimale Dachneigungsgrad für eine Rückstreuung des Radarechos, bei dem Siedlungsbereiche vollständig erfaßt werden, liegt bei 23 Grad. Dieser Fall tritt in der Realität jedoch äußerst selten auf. Dies spiegelte sich auch in der Auswertung wieder, es konnte kein Einfluß der Dachneigung auf die Erfassung von Siedlungen durch den Sensor nachgewiesen werden.

4.4.2.3 Bodenversiegelungsgrad Eine entscheidende Bedeutung bei der Erfassung der Signatur Siedlung fällt dem Verhältnis von versiegelter Bodenfläche zu freier Grünfläche zu, denn letztendlich sind es die versiegelten Flächen, die im Radarbild die typische Signatur einer Siedlung erzeugen. Betrachtet man die in Deutschland übliche Siedlungsstruktur, so sind in den ländlichen Regionen kaum andere Wohnformen als Einfamilienhäuser vorhanden. Auch die verdichteten Stadtregionen haben meist schon den dritten oder vierten "Wohlstandsring" an neuen Wohnflächen, überwiegend in Form von Ein- und Zweifamilienhäusern, angesetzt. Diese flächenfressenden Bauformen machen beispielsweise am Rande der Region Stuttgart bis zu 90 Prozent der neuen Wohngebäude aus. Dieser Anteil wird allerdings zum Regionskern hin geringer, beträgt dort aber immerhin noch über 50 Prozent. Am stärksten aber ist der Boden in den Gewerbegebieten mit durchschnittlich 84 Prozent versiegelt. Wohngebiete haben, je nach Bebauungsdichte, eine Versiegelung zwischen 30 und 70 Prozent, wobei öffentliche Grünanlagen, Sportgebiete und Friedhöfe immerhin noch 25 Prozent versiegelte Fläche aufweisen. Diese Werte können ohne weiteres mit kleinen Zu- und Abschlägen auf die untersuchten Regionen Karlsruhe und Heilbronn übertragen werden. Diese Werte von versiegelten Flächen, wurden in den untersuchten Gebieten—mit wenigen Ausnahmen—weitgehend bestätigt. Hierbei kristallisierte sich ein Grenzwert von etwa 50 Prozent als Bodenversiegelungsgrad heraus; d.h. alle Siedlungsbereiche, in denen der Boden bis zu 50 Prozent versiegelt ist, wurden vom Radar nicht als Signatur Siedlung erfaßt, jeder Mehranteil an Bodenversiegelung führte in der Mehrzahl der Testgebiete zu einer Registrierung als Siedlung im Radarbild. Dieser Sachverhalt ist sehr deutlich in Abbildung 26 zu sehen.

Der Parameter Bodenversiegelungsgrad kann nur in direkter Beziehung zu Art und Anordnung der Bepflanzung um die Häuser richtig interpretiert werden. Ein geringer Versiegelungsgrad implementiert eben auch eine ausgiebige Bepflanzung, die im nächsten Abschnitt diskutiert wird. Diese



Abbildung 26: Häufigkeit erfaßter und nicht erfaßter Häuser bei verschiedenen Versiegelungsgraden

stellt wiederum ein Hindernis für einen Radarstrahl dar, da er an jedem höheren Gewächs diffus gestreut wird und somit nur ein kleiner Anteil des Radarsignals zum Sensor zurückgelangt. Gar keine Probleme bieten in dieser Hinsicht Industriegebiete, die mit einer Versiegelung von nahezu 90 Prozent optimale Reflektionsbedingungen bieten, ohne daß das Radarecho an Hindernissen wie Koniferen oder Ziergehölzen gestreut wird. So sind Industriegebiete in Radarbildern auch in ihrer vollen Ausprägung wiederzufinden.

Das Ergebnis der Untersuchung des Parameters Bodenversiegelungsgrad führt zu der Erkenntnis, daß die Erfassung von Siedlungsbereichen sehr stark von dem Grad der Versiegelung abhängig ist. Jedoch führt uns die Problematik von hier weiter zum nächsten Abschnitt “Art und Anordnung der Bepflanzung” um die Häuser, was in Verbindung mit dem Bodenversiegelungsgrad einen entscheidenden Einfluß auf die Registrierung von Siedlungsbereichen hat.

4.4.2.4 Art und Anordnung der Bepflanzung um die Häuser Nicht nur städtebauliches Prinzip, sondern auch persönliche Mentalität führen zur sinnvollen Ausgestaltung aller Freiräume in Siedlungsgebieten. Dies betrifft insbesondere Ein- oder Mehrfamilienhäuser, wo hohe Bäumen und Sträucher in unmittelbarer Umgebung der Gebäude angepflanzt werden um die Wohnqualität zu erhöhen. Doch gerade dieser Grüngürtel um die Häuser stellt ein großes Problem für die Erkennung von Siedlungen mittels Radarsystemen dar.

Zunächst wurde die Art und Höhe des Grüns in der Umgebung von Häusern untersucht. Die in den untersuchten Gebieten vorgefundenen Grünanlagen bestehen aus den unterschiedlichsten Bepflanzungen. Aus diesem Grund wurde eine Unterteilung in folgende Kategorien vorgenommen:

- Rasenfläche, Wiese
- Buschwerk von 0.2 m bis 0.5 m Höhe
- Sträucher von 0.5 m bis 3 m Höhe
- Bäume von 2 m bis 10 m Höhe (und größer).

Dabei war die Anordnung der Bepflanzung in den meisten Fällen dahingehend ausgerichtet, daß das Buschwerk einen mehr oder weniger dichten Teppich am Boden ausbildet und die Bäume, durch die sich meist berührenden Kronen, für den Radarstrahl ein undurchdringliches Dach darstellen. Da die Grundstücksgröße von Bauflächen in der Regel zwischen 4 a bis 7 a liegt, bleibt neben dem Gebäude nicht mehr viel Spielraum für eine Begrünung auf dem Grundstück. Aus diesem Grund werden Bäume und Sträucher in unmittelbarer Umgebung der Gebäude (Abstand: 0 m bis 5 m von der Hauswand), meist sogar in direkter Berührung zu der Hauswand gepflanzt. Betrachtet man nun einen einfallenden Radarstrahl, so erkennt man leicht, daß dieser nach einer Reflektion an einer Hauswand und dem Boden keine Möglichkeit hat, ungehindert durch ein Gestrüpp von Blättern und Ästen der nachfolgenden Bepflanzung zum Sensor zurückreflektiert zu werden. Diese für eine Siedlungs-Signatur typische Doppelreflektion wird somit durch die Bepflanzung verhindert. Der Bereich, in dem der Radarstrahl vom Boden zum Sensor zurückreflektiert wird, ist abhängig von der Höhe h , in der er an eine Hauswand trifft. Dieser Bereich x kann mit folgender Formel für einen Einfallswinkel von 23 Grad (ERS-1) berechnet werden:

$$x = h \frac{\sin(23)}{\sin(67)}.$$

Der sich daraus ergebende Abstands-Bereich der direkten Reflektion zum Sensor in Abhängigkeit von der Höhe der Häuser ist in Tabelle 22 dargestellt.

Höhe h (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Abstand x (m)	0.4	0.9	1.3	1.7	2.1	2.6	3.0	3.4	3.8	4.2	4.7	5.1

Tabelle 22: Abstandsbereich x für direkte Reflektion zum Sensor

Wie die Untersuchungen in den Testgebieten ergaben, wird auf Grundstücken mit Einfamilienhäusern die Bepflanzung in einem ca. 5 Meter breiten Gürtel um die Gebäude angeordnet. Dieser Grüngürtel wird im Regelfall entsprechend größer, je höher die Gebäude sind. Das aber bedeutet im Vergleich mit Tabelle 22, daß der Radarstrahl in der Mehrzahl aller Fälle auf Boden trifft, der mit hohen Bäumen, Sträuchern oder dichtem Buschwerk bewachsen ist. Dadurch wird der Radarstrahl weitgehend diffus gestreut und es gelangt nur ein sehr schwaches Echo—entsprechend dem von der Bepflanzung reflektierten Signal—zum Sensor zurück.

Fast in allen Siedlungsgebieten ist eine ausgeprägte straßenbegleitende Bepflanzung vorhanden. Trifft nun ein Radarstrahl auf eine asphaltierte Straßenfläche, so liegt in erster Näherung eine Totalreflektion vor, d.h. es gelangt kein Signal zum Sensor zurück. Ist aber der Einfallswinkel des Radarechos derart gerichtet, daß er nach dem Auftreffen auf die Straße in das begleitende Grün reflektiert wird, so wird die Signatur von Wald im Radarbild erscheinen. Aus diesem Grund tragen Radarechos von Straßenzügen in den seltensten Fällen dazu bei, daß Siedlungsbereiche vom ERS-1 Sensor besser erfaßt werden.

Bei der Untersuchung des Parameters Art und Anordnung der Begrünung um die Häuser konnte folgendes Ergebnis festgestellt werden: Das Erfassen von Siedlungsbereichen, bzw. das Verschwinden der Signatur Siedlung in einem Radarbild, steht in direkter Abhängigkeit zur Anordnung der Begrünung in den Siedlungsgebieten. So war in allen untersuchten Fällen zu beobachten, daß Siedlungsbereiche genau dann nicht abgebildet werden, wenn Häuser direkt von Bäumen und Sträuchern umgeben sind. Dies ist auch schon bei einer Höhe der Begrünung von etwa 0.5 Meter der Fall. Umgekehrt konnte man feststellen, daß Siedlungsgebiete in all den Fällen erfaßt wurden, wo mehr oder weniger ausge dehnte Rasenflächen um die Häuser zu finden sind, bzw. größere Freiflächen zwischen den Häusern vorliegen. Hier ist eine ungehinderte Reflektion des Radarstrahls von einer Hauswand über eine glatte Rasenfläche/Gartenfläche zurück zum Sensor (und umgekehrt) gewährleistet. Diese Erkenntnisse sind unabhängig von der Höhe des Gebäudes, ganz gleich ob es sich um ein Einfamilienhaus oder ein Hochhaus handelt.

Konkret ergab die Untersuchung, daß alle Siedlungen mit einer Begrünungshöhe von 0.0 bis 0.2 Meter vom Sensor erfaßt wurden, während alle Siedlungen mit einer Begrünung höher als 0.6 Meter nicht erfaßt wurden. Wuchshöhen zwischen 0.3 und 0.5 Meter wurden in etwa zur Hälfte vom Sensor erfaßt. So ist der Parameter Art und Anordnung der Bepflanzung um und zwischen den Häusern von entscheidender Bedeutung für eine differenzierte Erfassung von Siedlungsbereichen.

4.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei der Analyse nicht differenzierbarer ERS-1 SAR-Signaturen von Siedlungsbereichen wurden verschiedene Parameter auf das Erfassen bzw. nicht Erfassen von Siedlungen durch den ERS-1 Radarsensor untersucht. Die Auswertung der erhobenen Daten ergab, daß der Parameter "Ausrichtung der Gebäude zum Sensor" keinen großen Einfluß darauf hat, ob Siedlungsbereiche vom Radarstrahl erfaßt werden oder nicht. So zeigten Siedlungen, die im Radarbild in der Signatur der Klasse Wald zu finden waren, dieselben Orientierungen der Gebäude wie Siedlungsbereiche, die auch im Radarbild die Signatur Siedlung aufweisen. Ebenso fällt dem Parameter "Dachneigung" eine untergeordnete Bedeutung zu. Wie sich aus den Untersuchungen ergab, werden Siedlungsbereiche vom Sensor genau dann (optimal) erfaßt, wenn die Dachneigung der Häuser in einem Bereich von 23 Grad (+/- 7 Grad) liegt. Alle steiler angelegten Hausdächer reflektieren den Radarstrahl tendenziell vom Sensor weg, wodurch kein siedlungstypisches Signal mehr gemessen werden kann. Siedlungsbereiche werden unter diesen Voraussetzungen nicht mehr durch direktreflektion an Hausdächern erfaßt.

Entscheidend ist der Parameter "Bodenversiegelungsgrad". Hier kristallisierte sich ein Grenzwert von etwa 50 Prozent heraus; d.h. alle Siedlungsbereiche, in denen der Boden mit bis zu 50 Prozent versiegelt ist, wurden vom Radar nicht als Signatur Siedlung erfaßt. Jeder Mehranteil an Bodenversiegelung (50 Prozent und mehr) führte in der Mehrzahl der Testgebiete zu einer Registrierung als Signatur Siedlung im Radarbild. Der Parameter mit dem größten Einfluß auf erfaßte, bzw. nichterfaßte Siedlung, ist die Art und Anordnung der Bepflanzung um die Häuser. Hier war in sämtlichen Testgebieten eindeutig zu erkennen, daß alle Siedlungsbereiche in denen die Häuser von Buschwerk, Bäumen und hohen Sträuchern umgeben sind, vom Sensor nicht erfaßt wurden. Alle Freiflächen um und zwischen den Gebäuden hingegen gewährleisteten eine optimale Reflektion des Radarstrahls. Das Signal wird durch Doppelreflektion verstärkt und führt im Radarbild zu einer eindeutigen Siedlungs-Signatur.

4.4.4 Lösungsansätze zur differenzierteren Erfassung von Siedlungen

Um das Problem des Verschwindens von Siedlungsbereichen in ERS-1 Radarbildern zu vermindern, sind verschiedene Ansätze denkbar:

- **Hinzufügen von Radarinformation anderer Frequenzen**

Möglich wäre hier eine Überlagerung von ERS-1 Satellitenbildern mit JERS-1 Daten. Der Vorteil dieser Überlagerung liegt hauptsächlich darin, daß der JERS-1 in einem anderen Frequenzbereich, dem L-Band arbeitet, welches mit einer Wellenlänge von etwa 25 cm arbeitet und somit erfahrungsgemäß gerade Siedlungsbereiche weit besser erfaßt, als dies bei ERS-1 Aufnahmen im C-Band der Fall ist. Durch eine Kombination beider Aufnahmen wäre eine deutlich bessere Erfassung aller Siedlungen, ohne Verlust der sonst detaillierteren Registrierung durch ERS-1 denkbar.

- **Hinzunehmen von zusätzlicher Information aus einem Geoinformationssystem (GIS)**

Das momentan zur Verfügung stehende Digitale Situationsmodell (DSM) ist leider mit einigen Fehlern behaftet und nicht auf dem neuesten Stand. (Das DSM wurde vor etwa 10 Jahren durch manuelles Digitalisieren von Karten erstellt). Denkbar wäre es, das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem ATKIS zu nutzen, in dem topographische Karten in digitaler Form in den für diese Arbeit wichtigen Maßstäben 1:10.000 bis 1:100.000 vorliegen. Doch

auch hier muß auf das Problem der Aktualität hingewiesen werden, da zum einen die Einführung von ATKIS noch nicht in allen Bundesländern erfolgt ist, zum anderen werden die Daten selbst bei voller Verfügbarkeit von ATKIS nur in einem 4-Jahres-Rhythmus aktualisiert.

- **Optimierung der multitemporalen ERS-1 Auswertung durch bessere Koordinierung der Aufnahmezeitpunkte**

Da die in dieser Arbeit verwendeten ERS-1 Satellitenbilder drei Aufnahmezeitpunkte enthalten (Multispektrale Klassifizierung), sollten die Schwerpunkte dann gesetzt werden, wenn Bäume und Sträucher keine oder nur wenig Blätter tragen. Dies würde bedeuten, daß die im cm-Bereich liegenden ERS-1 Radarwellen des C-Band weit weniger durch den Bewuchs um die Häuser gestreut werden.

- **Verwendung von Satellitenaufnahmen aus einem anderen Orbit**

Eine Kombination von descending und ascending Orbit des ERS-1 würde eine detailliertere Erfassung von Siedlungsbereichen zur Folge haben, da verschiedene Beobachtungswinkel für die Erkennung von Siedlungsbereichen zur Verfügung stehen.

4.5 Analyse der Multitemporalen Auswertung von SAR-Bilddaten des ERS-1

Ein wesentlicher Vorteil von Radarsensoren ist die hohe Verfügbarkeit von Abbildungen, da keine Störungen durch Bewölkung und andere Witterungseinflüsse wie bei optischen Sensoren auftreten. Das SAR-Instrument des ERS-1 liefert alle 35 Tage eine Abbildung der Erdoberfläche, so daß über das Jahr verteilt 10 Abbildungen eines Gebietes zur Verfügung stehen. Diese Informationen ermöglichen vielfältige Anwendungen im Bereich des Monitoring und der Überwachung. Andererseits können sie dazu dienen, die Unterscheidbarkeit von Klassen im Merkmalsraum zu erhöhen, was zu einer zuverlässigeren Klassifizierung der Daten beitragen kann. Dies ist insbesondere im Hinblick auf fehlende multispektrale Informationen bei den derzeit operationellen Radarsensoren ein wichtiger Aspekt.

In dieser Untersuchung wurde der Nutzen von mehreren multitemporalen Abbildungen für die Trennbarkeit der Hauptklassen untersucht. Hierzu wurde eine Region aus der Gegend von Günzburg an der Donau in Baden-Württemberg als Testgebiet gewählt, da hier relative viele Aufnahmen aus einem Jahr zur Verfügung standen. Die qualitative Verbesserung der Klassifizierung wurde in Abhängigkeit von der Anzahl der verwendeten Abbildungen und des Aufnahmezeitpunktes untersucht. Die folgenden ERS-1 Aufnahmen waren verfügbar:

- 4. Juni 1992
- 13. August 1992
- 17. September 1992
- 11. März 1993
- 20. Mai 1993
- 24. Juni 1993
- 29. Juli 1993
- 2. September 1993
- 7. Oktober 1993

Aufgrund von Erfahrungswerten bezüglich der Signaturen wurden die folgenden Klassen auf ihre Trennbarkeit hin untersucht:

- lockere Siedlung
- Siedlung
- Industrie
- Wasser
- Nadelwald
- Laubwald
- Wiese
- Acker

Einige weitere Klassen, die aufgrund der Signatur trennbar sein müßten, waren in dem vorliegenden Ausschnitt nur sporadisch vertreten, so daß eine Untersuchung keine zuverlässigen Ergebnisse erwarten ließe. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse ist auch in [Kleinknecht, 1996] zu finden.

4.5.1 Vorgehensweise

In diesem Abschnitt soll kurz die Vorgehensweise von der Auswahl der Trainingsgebiete über die Klassifizierung bis hin zum rechnerischen Vergleich derselbigen mit dem DSM oder der LANDSAT-TM-Klassifizierung erläutert werden. Zu Beginn wurde zunächst eine Klassifizierung aller Bilddaten vorgenommen. Hierzu wurden in verschiedenen Kanalkombinationen Trainingsgebiete markiert, um eine einheitliche Basis der vertretenen Musterklassen zu erhalten. Insgesamt wurden 128 Trainingsgebiete teilweise durch visuelle Bildinterpretation und a-priori-Wissen, teilweise auch unter Zuhilfenahme von Karten und dem Digitalen Situations Modell markiert. In Tabelle 23 ist die Anzahl der Trainingsgebiete pro Klasse dargestellt. Das erste Klassifikationsergebnis ist oftmals noch nicht sehr

Siedlocker	Siedlung	Industrie	Wasser	Nadelwald	Laubwald	Wiese	Acker
6	8	2	21	5	10	25	51

Tabelle 23: Anzahl der Trainingsgebiete in den einzelnen Klassen

zufriedenstellend. Daher müssen in weiteren Iterationen meist noch zusätzliche Trainingsgebiete definiert werden. Dieser Prozeß wird so lange fortgesetzt, bis das Ergebnis akzeptabel ist. Dieselben Trainingsgebiete wurden für alle nachfolgenden Klassifizierungen verwendet.

Um die Güte der jeweiligen Klassifikationsergebnisse beurteilen zu können, wurden die klassifizierten Bilder rechnerisch mit dem DSM und mit einer LANDSAT-TM-Klassifizierung verglichen. Dabei wurde das Referenzbild (DSM, TM) als inhaltlich richtig angesehen, so daß eine entsprechende Konfusionsmatrix berechnet werden konnte. In Tabelle 24 ist die „Konfusionsmatrix“ der neunkanaligen Klassifizierung aller vorhandenen Bilddaten im Vergleich mit der LANDSAT-TM-Klassifizierung dargestellt. Die Gesamtgenauigkeit betrug hier 58.08 Prozent. Die Klasse „Acker“ wurde hier beispielsweise zu 61.89 % richtig klassifiziert, 24.42 % der Acker-Pixel der LANDSAT-TM-Klassifizierung wurden fälschlicherweise als „Wiese“ klassifiziert, 12.88 % als „Wald“, usw..

Die Gesamtanzahl der korrekt klassifizierten Pixel ist im Vergleich mit dem DSM durchweg höher als im Vergleich mit der LANDSAT-TM-Klassifizierung. Das liegt zum einen daran, daß die jeweils ausgewählten Klassen der drei verschiedenen Bilder nicht übereinstimmen, zum anderen an der Schwierigkeit der Zuordnung der vielfältigen Klassen der LANDSAT-TM-Klassifizierung zu den wenigen hier verwendeten Klassen. Tabelle 25 zeigt die Zuordnung der Klassen des DSM, Tabelle 26 die Zuordnung der Klassen der LANDSAT-TM-Klassifizierung. Im Vergleich mit dem DSM kann weder zwischen

Referenzbild		Klassifikation							
Klasse	Summe	Siedlung	Siedlocker	Industrie	Acker	Wiese	Wald	Wasser	Reject
Siedlung	4.32	3.64	2.22	0.29	44.99	8.84	37.95	1.65	0.41
Siedlocker	4.82	4.99	3.44	0.44	29.08	5.56	55.41	0.50	0.59
Industrie	2.00	5.64	3.31	0.50	45.92	7.96	31.66	4.05	0.96
Acker	49.99	0.20	0.16	0.01	61.89	24.42	12.88	0.27	0.17
Wiese	10.90	0.08	0.04	0.00	20.06	65.60	13.35	0.70	0.18
Wald	25.21	0.14	0.12	0.00	21.02	7.36	70.37	0.87	0.11
Wasser	2.77	0.19	0.05	0.00	7.04	8.77	13.25	69.43	1.28

Tabelle 24: Konfusionsmatrix: Vergleich mit LANDSAT-TM-Klassifizierung

DSM	Siedlung	Boden	Wasser	Wald
Industrie	x			
Siedlung	x			
Boden		x		
Laubwald				x
Mischwald				x
Wasser			x	
Klassifiz.	Siedlung	Boden	Wasser	Wald
Siedlocker	x			
Siedlung	x			
Industrie	x			
Wasser			x	
Nadelwald				x
Laubwald				x
Wiese		x		
Acker		x		

Tabelle 25: Zuordnung zu den Klassen des DSM

den drei Siedlungsklassen noch zwischen Acker und Wiese unterschieden werden, was das Ergebnis gegenüber dem Vergleich mit der LANDSAT-TM-Klassifizierung positiv beeinflusst.

Bei der Klasse „Wald“ hat sich herausgestellt, daß sich die Klassen Laub- und Nadelwald, für welche jeweils Trainingsgebiete bestimmt wurden, auch nicht bei der Verwendung aller 9 Kanäle trennen ließen. Abbildung 27 zeigt ein typisches Laubwaldgebiet, in dem viele Pixel als „Nadelwald“ klassifiziert wurden. Deshalb wurde im Folgenden auf die Trennung der Waldgebiete verzichtet.

In einem zweiten Schritt wurde jeder Kanal einzeln für sich klassifiziert, um festzustellen, wie gut sich die unterschiedlichen Zeitpunkte für die Klassifizierung eignen. Mit Hilfe des weiter unten beschriebenen Verfahrens wurde eine „Rangfolge“ der 9 Kanäle ermittelt und zunächst 9 Klassifizierungen beginnend mit dem „besten“ Kanal, jeweils unter Hinzunahme des nächstschlechteren berechnet. Danach wurde dasselbe in umgekehrter Reihenfolge durchgeführt, das heißt, es wurde mit dem „schlechtesten“ Kanal begonnen und jeweils der nächstbessere hinzugefügt. Aus den Ergebnissen konnten dann Aussagen über die nützliche Anzahl von multitemporalen Abbildungen getroffen werden.

LANDSAT-TM	Siedlo.	Siedl.	Ind.	Acker	Wiese	Wasser	Wald
Sieddicht		x					
Siedlocker	x						
Industrie			x				
Acker				x			
Wein				x			
Obstbau				x			
Streuobst					x		
Kleingarten				x			
Brachland				x			
Windbruch				x			
Kies			x				
Fels			x				
Schiene			x				
Grünland					x		
Golf					x		
Schilf					x		
Wald							x
Wasser						x	
Klassifiz.	Siedlo.	Siedl.	Ind.	Acker	Wiese	Wasser	Wald
Siedlocker	x						
Siedlung		x					
Industrie			x				
Wasser						x	
Nadelwald							x
Laubwald							x
Wiese					x		
Acker				x			

Tabelle 26: Zuordnung zu den Klassen der LANDSAT-TM-Klassifizierung

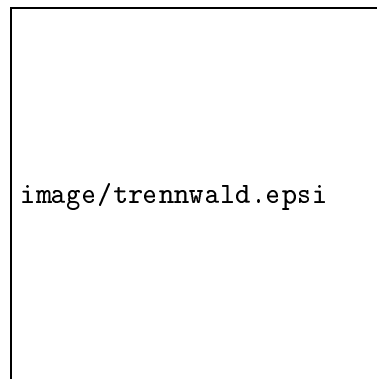


Abbildung 27: Klassifizierung eines homogenen Laubwaldgebietes

4.5.2 Einfluß der Aufnahmezeitpunkte

Um den Beitrag zur qualitativen Verbesserung der Klassifizierung eines einzelnen Aufnahmezeitpunktes zu ermitteln, wurde jeder Kanal getrennt für sich klassifiziert und analysiert. Für jede berechnete Klassifizierung wurden Konfusionsmatrizen zum Vergleich mit dem DSM und der LANDSAT-TM-Klassifizierung berechnet. In Abbildung 28 sind die Gesamtergebnisse aus den einzelnen Aufnahmezeitpunkten im Vergleich mit beiden Kontrollbildern graphisch veranschaulicht. Der qualitative Verlauf

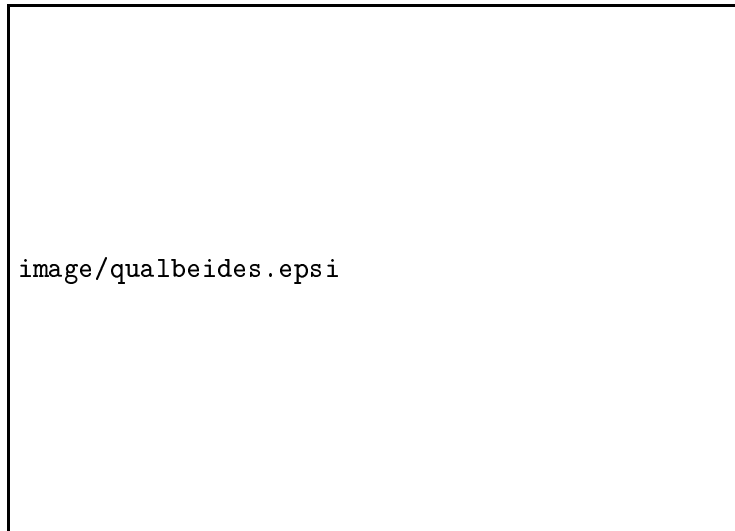


Abbildung 28: Gesamtergebnisse der einkanaligen Klassifizierungen

der beiden Kurven ist sehr ähnlich; Wenn man die beiden Ergebnisse hinsichtlich der Klassifizierung geeigneter Monate untersucht, erhält man etwa die gleichen Ergebnisse. Tendenziell scheinen eher die Frühjahrs- und Herbstmonate bessere Klassifikationsergebnisse zu erzielen. Bei der Klassifizierung mit den Nicht-Sommer-Monaten wurden in fast allen Klassen jeweils bessere Ergebnisse erreicht als bei der Klassifizierung mit den Sommermonaten. Besonders die Monate Juni '92 und Juni '93 liefern im Vergleich mit beiden Kontrollbildern sehr schlechte Ergebnisse.

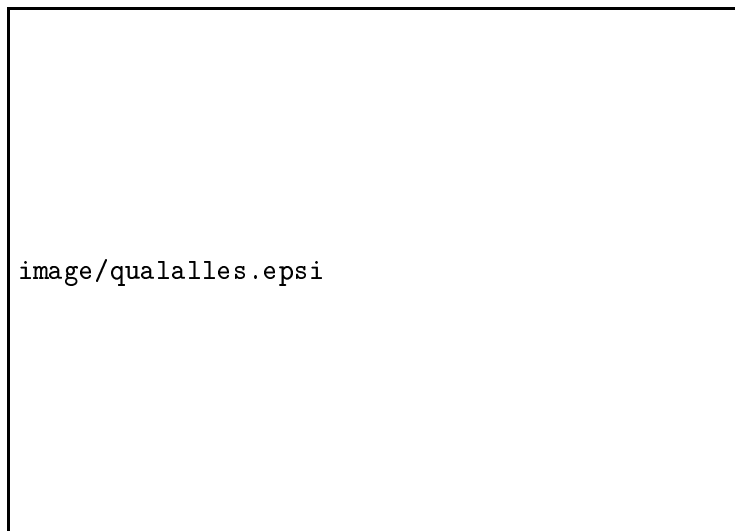


Abbildung 29: Ergebnisse der einkanaligen Klassifizierungen für alle Klassen

In Abbildung 29 sind die Klassifikationsergebnisse für alle Klassen graphisch dargestellt. Insbesondere wenn man die doppelt vorhandenen Monate Juni und September durch alle Klassen hinweg betrachtet, stellt man fest, daß die Ergebnisse bezüglich der Aufnahmezeitpunkte recht unsicher sind. Ohne weitere Untersuchungen über mehrere Jahre ist eine konkrete Aussage über die Eignung von Aufnahmen aus verschiedenen Jahreszeiten nicht möglich. Das Gesamtergebnis jeder Klassifizierung setzt sich aus den Teilergebnissen in den einzelnen Klassen zusammen. Es ist deutlich zu sehen, daß die einzelnen Klassen völlig unterschiedliche „Spitzenmonate“ aufweisen, was die oben erwähnte scheinbare Tendenz, die Nicht-Sommer-Monate seien für eine Klassifikation besser geeignet, als fragwürdig erschei-

nen läßt. Offensichtlich existieren dennoch große Unterschiede zwischen den Ergebnissen der einzelnen Kanäle. Es leisten also nicht alle Kanäle gleich große Beiträge zur Verbesserung der Klassifizierung. Der Beitrag, den eine Aufnahme zu einem bestimmten Zeitpunkt zur qualitativen Verbesserung der Klassifizierung leistet, hängt offensichtlich wesentlich von anderen Faktoren wie Witterung, Bodenfeuchte e.t.c. ab und weniger von der Jahreszeit. Die Auswahl von Aufnahmezeitpunkten ist damit für eine Unterscheidung der untersuchten Hauptklassen nicht zwingend an eine bestimmte Jahreszeit gebunden.

4.5.3 Einfluß der Anzahl der Abbildungen

Um eine Aussage über die Abhängigkeit des Klassifikationsergebnisses von der Anzahl der Abbildungen und deren Qualität machen zu können, wurden insgesamt 3 Folgen von Klassifizierungen mit jeweils 1,2,...,9 Kanälen berechnet. In Folge 1, in den Schaubildern mit „auf“ abgekürzt, wurde mit demjenigen Kanal begonnen, der bei den Einzelklassifizierungen im Vergleich mit dem DSM das schlechteste Ergebnis lieferte, dann in aufsteigender Reihenfolge jeweils immer der nächstbessere Kanal hinzugenommen. In Folge 2, in den Schaubildern mit „ab“ bezeichnet, wurde alles genau in umgekehrter Reihenfolge durchgeführt. Es wurde also mit dem besten Kanal begonnen und in absteigender Reihenfolge jeweils der nächstschlechtere hinzugefügt bis hin zu einer Klassifizierung mit allen 9 Kanälen. In Folge 3, in den Schaubildern mit „z“ für „zwischen“ bezeichnet, wurde eine zufällige Reihenfolge der hinzugefügten Kanäle gewählt. Die Sortierung nach der Qualität der einzelnen Kanäle für Folge 1 und 2 wurde von den Endergebnissen aus dem Vergleich mit dem DSM abgeleitet. Die Rangfolge der Endergebnisse aus dem Vergleich mit der LANDSAT-TM-Klassifizierung ist jedoch fast die gleiche. In Tabelle 27 ist eine Übersicht über die Reihenfolge der jeweils hinzugefügten Kanäle für die 3 Folgen „auf“, „ab“ und „z“ dargestellt. In der Abbildung 30 sind der prozentuale Anteil der

auf	6/93	10/93	7/93	6/92	8/92	9/93	3/93	5/93	9/92
ab	9/92	5/93	3/93	9/93	8/92	6/92	7/93	10/93	6/93
z	10/93	3/93	9/93	5/93	6/93	7/93	8/92	9/92	6/92

Tabelle 27: Reihenfolge der in den Folgen „auf“, „ab“ und „z“ hinzugefügten Kanäle

richtig klassifizierten Pixel für die drei Folgen dargestellt. Es fällt auf, daß die Kurve „ab“ schneller

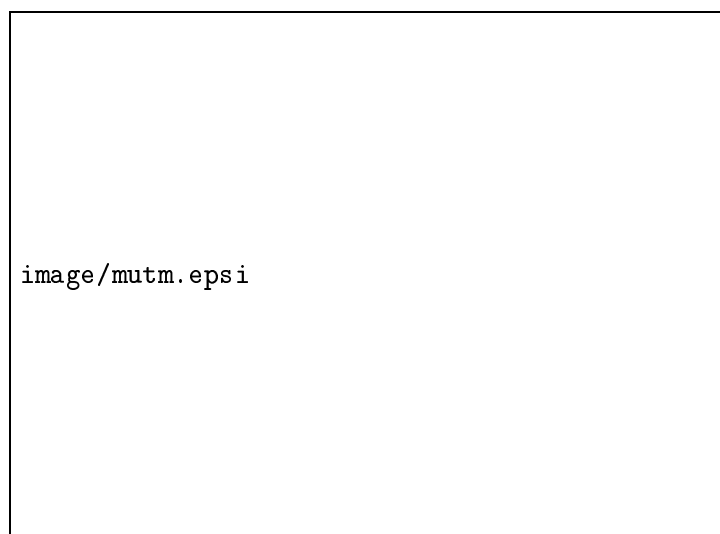


Abbildung 30: Gesamtergebnisse der 3 Folgen 'auf', 'ab' und 'z' im Vergleich mit LANDSAT; Angaben in %

abflacht als die Kurve „auf“, das heißt, qualitativ schlechte Kanäle, die einer Reihe von qualitativ guten Kanälen noch hinzugefügt werden, verbessern das Klassifikationsergebnis kaum noch. Es kann sogar sein, daß das Ergebnis eher noch verschlechtert wird, wie dies in den absteigenden Kurven ab einer gewissen Anzahl von Kanälen der Fall ist. Das beste Gesamtergebnis im Vergleich mit LANDSAT in absteigender Reihenfolge wurde bereits mit 6 Kanälen erreicht: 60.5 %. Danach verschlechtert sich das Ergebnis wieder geringfügig. Mit 9 Kanälen wurden nur noch 58.1 % erreicht. In der aufsteigenden Reihenfolge wurde das beste Ergebnis von 58.2 % erst mit 8 Kanälen erzielt. Im Vergleich mit dem DSM ergibt sich ein vergleichbares Bild. Es ist offensichtlich, daß—selbst wenn immer *bessere* Kanäle hinzugefügt werden—das Ergebnis ab einer gewissen Anzahl von Kanälen konstant bleibt, beziehungsweise wieder schlechter wird. Die Verschlechterung resultiert dabei aus der Tatsache, daß die Trainingsgebiete unterschiedlich auf die verschiedenen Kanäle abgestimmt sind. In Abbildung 31 sind die prozentualen Differenzen jeweils zwischen den Kurven „auf“ und „ab“ dargestellt. Mit steigender Anzahl an Kanälen werden die Differenzen immer kleiner und gehen schließlich gegen Null. Da der

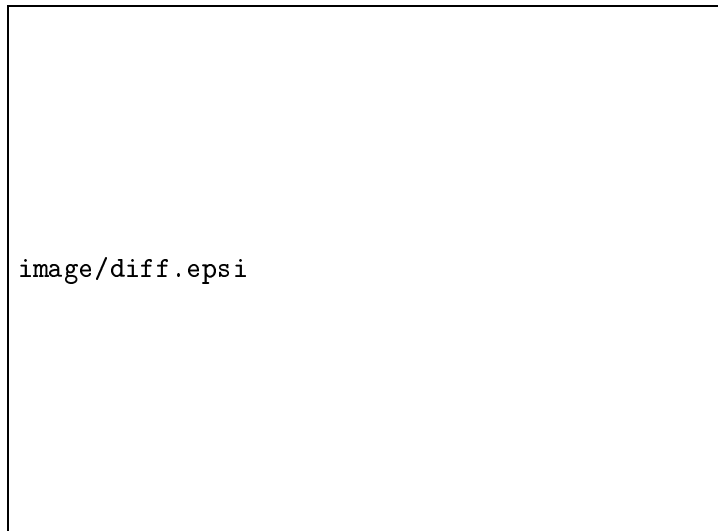


Abbildung 31: Differenzen in % zwischen den Kurven 'auf' und 'ab'

Wert Null bezüglich der Verbesserung der Klassifizierung hier recht gut approximiert wurde, kann man davon ausgehen, daß die Verwendung von mehr als neun Kanälen keine weitere Verbesserung mit sich bringt.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die Anzahl der Kanäle, ab der das Ergebnis der Klassifizierung stagniert, von der Qualität der bereits verwendeten Kanäle abhängt. Wählt man Kanäle aus, die in der einkanalen Klassifizierung ein gutes Ergebnis lieferten, reichen bereits 4-6 Kanäle aus. Eine größere Anzahl an Kanälen bringt dann keine besseren Ergebnisse. Wie aus dem Diagramm ersichtlich, verbessert sich das Ergebnis jedoch auch bei Verwendung von Kanälen schlechter Qualität ab ungefähr 8 Kanälen nicht mehr.

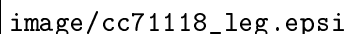
Das Hauptproblem bei der praktischen Durchführung einer multitemporalen Klassifizierung mit mehr als drei Kanälen ist das Markieren der Trainingsgebiete. Es können jeweils nur maximal drei einander überlagerte Abbildungen visuell betrachtet werden, das heißt, bei der Markierung der Trainingsgebiete können immer nur jeweils drei Kanäle gleichzeitig herangezogen werden. Danach können drei weitere Abbildungen betrachtet werden, um dort eventuell noch weitere Trainingsgebiete zu markieren, beziehungsweise die bereits markierten zu überprüfen.

5 Ergebnisse

5.1 Beispiele

Um das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland vollständig mit ERS-1 Szenen zu erfassen waren 74 Abdeckungen erforderlich. Für die multitemporale Auswertung werden diese Abdeckungen drei mal benötigt, so daß insgesamt 222 Szenen Prozessiert werden mußten. In den Tabellen 28 und 29 sind die Abdeckungen mit der internen Bezeichnung (eine Stadt im Zentrum der Szene) und dem ERS-1 Frame, zu dem die Abdeckung gehört, aufgelistet. Ferner sind die drei Orbits aus denen die multitemporale Abbildung zusammengesetzt ist, sowie die entsprechenden Aufnahmedaten der jeweiligen Szenen angegeben. Insgesamt bewegen sich die Aufnahmezeitpunkte zwischen dem 17.04.1992 und dem 23.10.1993, was einer Zeitspanne von etwas mehr als 1 1/2 Jahren entspricht. Die Jahreszeiten zu denen die Aufnahmen gemacht wurden variieren ebenfalls recht stark. Dies erwies sich für die Auswertung als ungünstig, da die Statistiken benachbarter Szenen nicht übertragbar waren. Alle Szenen wurden zunächst der Vorprozessierung unterzogen. Diese besteht im Wesentlichen aus der Reduzierung der Datenmenge, der radiometrischen Korrektur und der Speckle-Filterung der Daten. Jede Multitemporale Szene wurde dann in Teile der naturräumlichen Gliederung zerlegt, die dann einzeln klassifiziert wurden. Anschließend wurde aus den Einzelteilen wieder ein Mosaik zusammengefügt, welches nun in Kacheln, die dem Blattschnitt der TÜK 200 entsprechen, vorliegt. Nach dem Zusammensetzen der Einzelteile erfolgte noch die Generalisierung der Ergebnisse durch Relaxation.

Das stark verkleinerte Ergebnis der Kartierung ist in den Abbildungen 33, 34, 35 und 36 exemplarisch für die TÜK 200 Blätter *CC 7118 Stuttgart-Nord*, *CC 8710 Freiburg-Süd*, *CC 3918 Hannover* und *CC 6310 Frankfurt a.M.-West* dargestellt, die Legende mit der Farbzuordnung ist in Abbildung 32 zu sehen. Der Maßstab der Darstellung beträgt etwa 1:600000, die Abbildung ist also etwa um den Faktor drei kleiner als beim angestrebten Zielmaßstab von 1:200000. Jedes der TÜK Blätter ist aus mehreren ERS-1 Szenen zusammengesetzt. Dies äußert sich in verschiedenen Randerscheinungen. Vereinzelt entstehen weiße Streifen zwischen den Abdeckungen der ERS-1 Szenen entlang eines Orbits. Diese entstehen dadurch, daß die Frames entlang eines Orbits fast gar nicht überlappen. Liegen die Aufnahmezeitpunkte weit auseinander, so kommt es insbesondere bei Daten aus der frühen Missionsphase zu Verschiebungen der Frames. Durch die multitemporale Überlagerung und Ausblendung der Gebiete, die nicht in allen Kanälen Informationen tragen, kommt es dann zu Lücken in der Darstellung. Dieser Effekt ist z.B. in den Abbildungen 35 und 36 zu sehen. Sind die Zeitpunkte ungünstig gewählt, so können insbesondere Klassen wie die Landwirtschaft nur unzureichend identifiziert werden. Liegen die Zeitpunkte benachbarter Ausschnitte günstiger, so ist die Grenze der Abbildung der entsprechenden Klasse im Mosaik deutlich zu sehen. Im unteren Bildbereich, etwa in der Mitte der Abbildung 36 wurden die Äcker nur in einem der Ausschnitte identifiziert, was sich deutlich in einer entsprechenden Kante im Mosaik abzeichnet.



image/cc71118_leg.eps

Abbildung 32: Legende zu den TÜK 200 Blättern

Bezeichnung	Frame	Orbit 1	Datum	Orbit 2	Datum	Orbit 3	Datum
Aalen	2619	8641	11.03.1993	10144	24.06.1993	11647	07.10.1993
Abenra	2493	4719	10.06.1992	5220	15.07.1992	6222	23.09.1992
Almelo	2547	4762	13.06.1992	5263	18.07.1992	6265	26.09.1992
Alsfeld	2583	4676	07.06.1992	5678	16.08.1992	6179	20.09.1992
Arlberg	2655	4862	20.06.1992	5363	25.07.1992	6365	03.10.1992
Bamberg	2601	4862	20.06.1992	5363	25.07.1992	6365	03.10.1992
Betzdorf	2583	4719	10.06.1992	5220	15.07.1992	6222	23.09.1992
Bitterfeld	2565	4089	27.04.1992	4590	01.06.1992	5091	06.07.1992
Bonn	2583	4490	25.05.1992	5492	03.08.1992	6494	12.10.1992
Brake	2529	4719	10.06.1992	5220	15.07.1992	5220	15.07.1992
Brandenburg	2547	4089	27.04.1992	4590	01.06.1992	5091	06.07.1992
Breisach	2637	5449	31.07.1992	6451	09.10.1992	8956	02.04.1993
Brenner	2655	4819	17.06.1992	6322	30.09.1992	9328	28.04.1993
Chemnitz	2583	4318	13.05.1992	4819	17.06.1992	5821	26.08.1992
Cottbus	2565	4046	24.04.1992	5048	03.07.1992	6551	16.10.1992
Darmstadt-Ost	2601	4175	03.05.1992	4676	07.06.1992	6179	20.09.1992
Emden	2529	4762	13.06.1992	5263	18.07.1992	6265	26.09.1992
Freren	2547	4490	25.05.1992	6494	12.10.1992	7997	25.01.1993
Fuerstenfeldbr	2637	5091	06.07.1992	8097	01.02.1993	10602	26.07.1993
Fulda	2583	4905	23.06.1992	5406	28.07.1992	6408	06.10.1992
Furtwangen	2637	4175	03.05.1992	6179	20.09.1992	9185	18.04.1993
Gifhorn	2547	4905	23.06.1992	5406	28.07.1992	6408	06.10.1992
Gladenbach	2583	3946	17.04.1992	4447	22.05.1992	6451	09.10.1992
Grafenau	2619	4776	14.06.1992	6279	27.09.1992	9285	25.04.1993
Grafring	2637	4819	17.06.1992	5821	26.08.1992	11833	20.10.1993
Groningen	2529	4533	28.05.1992	5535	06.08.1992	11046	26.08.1993
Hagenau	2619	4447	22.05.1992	5449	31.07.1992	6451	09.10.1992
Hannover	2547	4676	07.06.1992	5678	16.08.1992	6179	20.09.1992
Heerlen	2583	4762	13.06.1992	5263	18.07.1992	6265	26.09.1992
Heide	2511	7725	06.01.1993	8226	10.02.1993	9729	26.05.1993
Karlsruhe	2619	4676	07.06.1992	5678	16.08.1992	6179	20.09.1992
Kemnath	2601	4590	01.06.1992	5091	06.07.1992	8598	08.03.1993
Koesching	2619	4590	01.06.1992	5091	06.07.1992	10602	26.07.1993
Kuestrin	2547	5048	03.07.1992	5549	07.08.1992	6551	16.10.1992
Lachen	2655	4905	23.06.1992	5406	28.07.1992	9414	04.05.1993
Loegumkloster	2493	4490	25.05.1992	5993	07.09.1992	11003	23.08.1993
Lohr	2601	4905	23.06.1992	5406	28.07.1992	6408	06.10.1992

Tabelle 28: Prozessierte ERS-1 Szenen (Teil 1)

Bezeichnung	Frame	Orbit 1	Datum	Orbit 2	Datum	Orbit 3	Datum
Luetjenburg	2511	4676	07.06.1992	5678	16.08.1992	6179	20.09.1992
Mainz	2601	4447	22.05.1992	6451	09.10.1992	8956	02.04.1993
Marsberg	2565	3946	17.04.1992	4447	22.05.1992	6451	09.10.1992
Matrei	2655	5048	03.07.1992	5549	07.08.1992	6551	16.10.1992
Mattighofen	2637	4776	14.06.1992	6279	27.09.1992	9285	25.04.1993
Metz	2619	4490	25.05.1992	6494	12.10.1992	6995	16.11.1992
Mindelheim	2637	4862	20.06.1992	5363	25.07.1992	11876	23.10.1993
Moers	2565	4762	13.06.1992	5263	18.07.1992	6265	26.09.1992
Muenden	2565	4676	07.06.1992	5678	16.08.1992	6179	20.09.1992
Neustrelitz	2529	4089	27.04.1992	4590	01.06.1992	5091	06.07.1992
Nordsee	2511	4490	25.05.1992	6494	12.10.1992	11003	23.08.1993
Rahden	2547	4719	10.06.1992	5220	15.07.1992	6222	23.09.1992
Rauris	2655	4275	10.05.1992	6279	27.09.1992	8784	21.03.1993
Recklinghausen	2565	3989	20.04.1992	4490	25.05.1992	6494	12.10.1992
Rehburg	2547	4447	22.05.1992	6451	09.10.1992	7954	22.01.1993
Rendsburg	2511	3946	17.04.1992	4447	22.05.1992	6451	09.10.1992
Rostock	2511	4132	30.04.1992	4633	04.06.1992	5635	13.08.1992
Sarre-Union	2619	4719	10.06.1992	5220	15.07.1992	6222	23.09.1992
Saulgau	2637	4633	04.06.1992	5635	13.08.1992	6136	17.09.1992
Schwerin	2529	4132	30.04.1992	4633	04.06.1992	5635	13.08.1992
Simmern	2601	4719	10.06.1992	5220	15.07.1992	6222	23.09.1992
Sittensen	2529	4447	22.05.1992	5449	31.07.1992	6451	09.10.1992
Soest	2565	4719	10.06.1992	5220	15.07.1992	6222	23.09.1992
Speichingen	2637	4905	23.06.1992	5404	28.07.1992	6408	06.10.1992
Sterpenich	2601	4261	09.05.1992	4762	13.06.1992	5263	18.07.1992
Stettin	2529	5048	03.07.1992	5549	07.08.1992	6551	16.10.1992
Strassnitz	2511	4089	27.04.1992	4590	01.06.1992	5091	06.07.1992
Stuttgart	2619	4905	23.06.1992	9915	08.06.1993	10416	13.07.1993
Tirschenreuth	2601	4819	17.06.1992	6322	30.09.1992	10330	07.07.1993
Trambach	2583	4132	30.04.1992	4633	04.06.1992	6136	17.09.1992
Treuchtlingen	2619	4862	20.06.1992	5363	25.07.1992	6365	03.10.1992
Trostberg	2637	5048	03.07.1992	5549	07.08.1992	6551	16.10.1992
Venlo	2565	4533	28.05.1992	5535	06.08.1992	6537	15.10.1992
Volkach	2601	4633	04.06.1992	5635	13.08.1992	6136	17.09.1992
Walenstadt	2655	4633	04.06.1992	5635	13.08.1992	6136	17.09.1992
Willisau	2655	4676	07.06.1992	5678	16.08.1992	9185	18.04.1993
Winsen	2529	4676	07.06.1992	5678	16.08.1992	6179	20.09.1992

Tabelle 29: Prozessierte ERS-1 Szenen (Teil 2)



Abbildung 33: TÜK 200 Blatt CC 7118 Stuttgart-Nord



Abbildung 34: TÜK 200 Blatt CC 8710 Freiburg-Süd

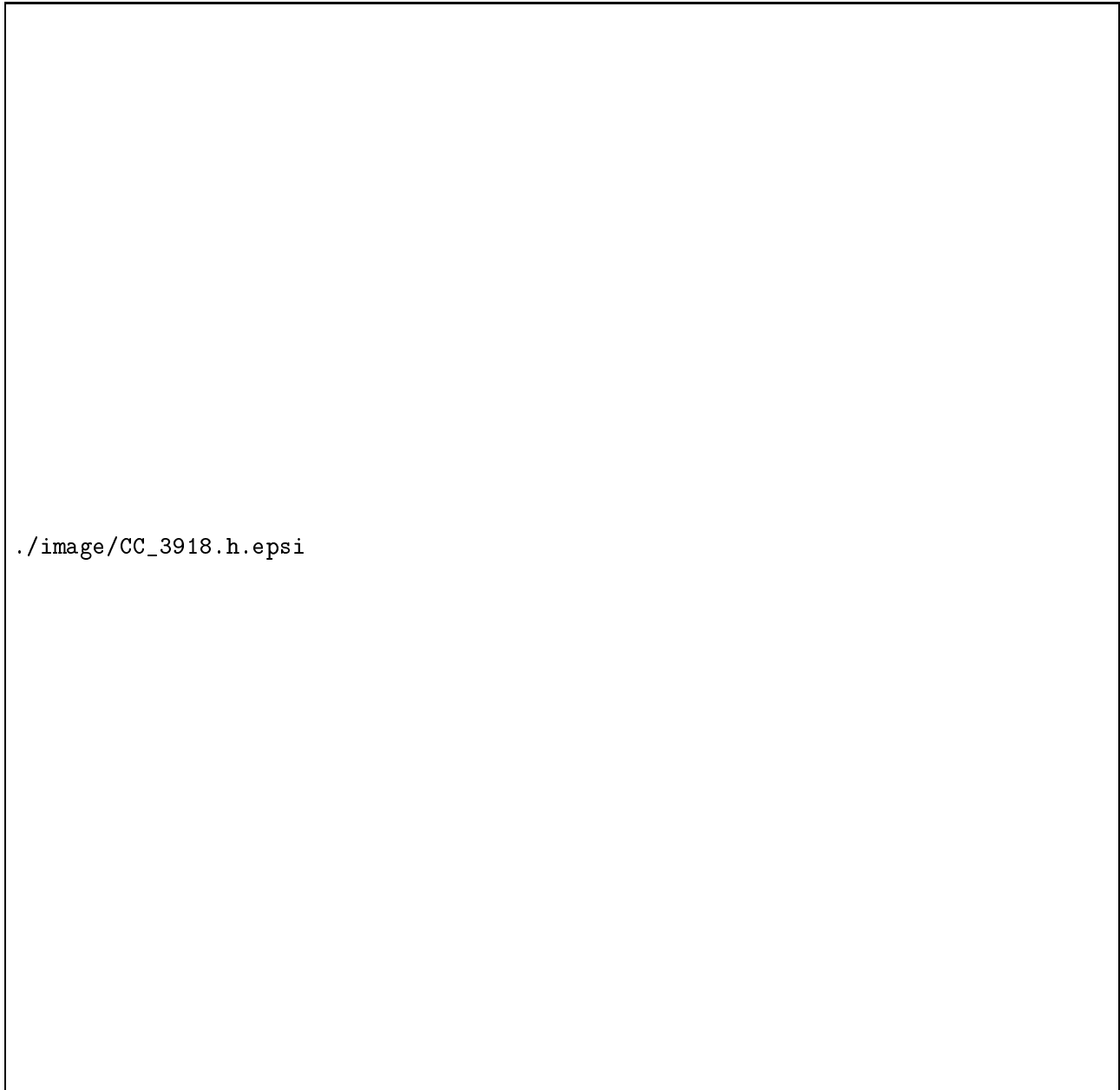


Abbildung 35: TÜK 200 Blatt CC 3918 Hannover



Abbildung 36: TÜK 200 Blatt CC 6310 Frankfurt a.M.-West

5.2 Beurteilung der Genauigkeit

Das Ergebnis der Landnutzungskartierung wurde am Beispiel des TÜK 200 Blattes CC 7118 Stuttgart-Nord eingehend untersucht. Das Blatt Stuttgart-Nord wird von den folgenden fünf ERS-1 Szenen überdeckt:

- Aalen
- Darmstadt-Ost
- Karlsruhe
- Lohr und
- Stuttgart.

Jede dieser Szenen wurde entsprechend der naturräumlichen Gliederung in Teile zerlegt, so daß insgesamt zwölf unabhängig klassifizierte Teilräume unterschiedlicher Größe im TÜK 200 Blatt CC 7118 enthalten sind. Trotz unterschiedlicher Interpretation durch verschiedene Operateure – dies waren im wesentlichen mehrere Hilfswissenschaftler – sind die Ergebnisse im Übergang zwischen den Ausschnitten hier weitestgehend homogen, was allgemein auf eine stabile Prozedur und eine gute Einarbeitung der beteiligten Personen hindeutet. Das Gebiet des Blattes Stuttgart-Nord verfügt über eine ausgeprägte Topographie, so daß ausgedehnte Layover/Shadow Gebiete im Bereich von Berghängen entstehen, an denen der SAR-Sensor keine Information über die Bodenbedeckung liefert. Die von der DLR in Oberpfaffenhofen gelieferte GIM - Maske erwies sich als zu klein, um die bei der Geokodierung entstehenden Defekte zu eliminieren. Aus diesem Grund wurde die Maske von einzelnen Störpixeln befreit und dann um 2-3 Pixel vergrößert, was im Maßstab 1:200.000 etwa 0.3 Millimeter entspricht. Trotz vergrößerter Maske gibt es noch einige wenige falsch klassifizierte Stellen in der Umgebung der Masken, die auf den Layover- bzw. Shadow- Effekt zurückzuführen sind. Insbesondere werden dort fälschlicherweise Siedlungs- oder Industriegebiete klassifiziert.

Um einen Anhaltspunkt für die Güte der Klassifizierung zu bekommen, wurde diese mit dem Digitalen Situationsmodell (DSM) und mit einer Klassifizierung von LANDSAT-TM Bilddaten vom 11. Juli und 28. August 1991 aus einem anderen Projekt verglichen und statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

5.2.1 Vergleich mit dem Digitalen Situationsmodell (DSM)

Um einen Anhaltspunkt für die Güte der Klassifizierung zu bekommen, wurde diese mit dem von der TK 50 digitalisierten Digitalen Situationsmodell (DSM) verglichen. Um eine Basis für den Vergleich zu schaffen, mußten hierzu einige Klassen zusammengefaßt werden: verglichen wurden die Klassen Siedlung, Boden, Wasser und Wald. Die Angabe der Genauigkeit für eine Klassifizierung ist sehr schwierig, da die tatsächliche Landnutzung in der großen Fläche nicht bekannt ist. Vergleicht man mit Daten wie dem DSM, so haben die Fehler beim Digitalisieren ebenso einen Einfluß wie die Aktualität der digitalisierten Karten. Trotzdem sei der Vergleich hier aufgeführt, um eine Diskussionsgrundlage für das erzielte Resultat zu haben. Die Tabellen 30 und 31 zeigen die Konfusionsmatrix, wobei die Zeile der jeweiligen Klasse im DSM und die Spalte der jeweiligen Klasse in der ERS-1 Klassifizierung entspricht. Die fettgedruckten Felder in Tabelle 30 sollen dies verdeutlichen: Die DSM-Klasse Boden wurde in der ERS-1 Klassifizierung in der fettgedruckten Anzahl von Pixeln als Wasser klassifiziert. In der zweiten Spalte ist die Gesamtzahl der Pixel der entsprechenden Klasse im DSM und in der zweiten Zeile die Gesamtzahl der Pixel der entsprechenden Klasse in der ERS-1 Klassifizierung eingetragen. Tabelle 30 zeigt die absolute Anzahl der Pixel, Tabelle 31 enthält dieselben Angaben in Prozent, normiert auf die Anzahl der im DSM vorkommenden Pixel der jeweiligen Klasse. Bei einer vollständigen Übereinstimmung müßte die Diagonale mit 100-Prozent Werten besetzt sein. Betrachtet man die Anzahl der

DSM ↓ ERS-1 ⇒	Summe	Reject	Siedlung	Boden	Wasser	Wald
Summe	12473140	207	601306	7649645	110841	4111141
Siedlung	960544	23	267953	418390	3442	270736
Boden	7775083	150	208393	6202594	89934	1274012
Wasser	9415	0	291	5828	2779	517
Wald	3728098	34	124669	1022833	14686	2565876

Tabelle 30: Vergleich von DSM und ERS-1 Klassifizierung: Absolute Anzahl

DSM ↓ ERS-1 ⇒	Summe	Reject	Siedlung	Boden	Wasser	Wald
Summe	100.00	0.00	4.82	61.32	0.88	32.96
Siedlung	100.00	0.00	27.89	43.55	0.35	28.18
Boden	100.00	0.00	2.68	79.77	1.15	16.38
Wasser	100.00	0.00	3.09	61.90	29.51	5.49
Wald	100.00	0.00	3.34	27.43	0.39	68.82

Tabelle 31: Vergleich von DSM und ERS-1 Klassifizierung: Relative Anzahl in Prozent

“richtig” klassifizierten Pixel von 9.039.202 gegenüber der Gesamtzahl der Pixel von 12.473.140, so ergibt sich aus diesem Vergleich eine absolute Genauigkeit von etwa 72.5 Prozent.

Für die Identifikation von Ackerflächen ist die Kombination der Aufnahmezeitpunkte von größter Bedeutung. Liegen sie günstig, so ist eine nahezu 100-prozentige Unterscheidung gegenüber anderen Klassen möglich. Ergibt sich zwischen den Zeitpunkten keine Änderung durch starkes Wachstum, Ernte oder anderweitige Bearbeitung der Ackerflächen, so ist eine Unterscheidung nur schwer möglich. Eine vergleichsweise geringe Übereinstimmung zwischen dem DSM und der Klassifizierung herrscht bei den Klassen Wasser und Siedlung. Im Bereich Wasser entsteht diese einerseits durch die unvollständige und ungenaue Darstellung der in dieser Region nur sporadisch vertretenen Wasserflächen im DSM, andererseits durch die Probleme bei der Trennung von Wasser und Wiesen bei der multitemporalen ERS-1 Klassifikation. Außerdem ist die Rückstreuung von Wasserflächen stark mit der lokalen Windstärke korreliert, was in seltenen Fällen zu Verwechslungen mit weiteren Klassen führen kann. Im Bereich der Siedlungen kommt insbesondere die Tatsache zum Tragen, daß das hier verwendete DSM nicht auf dem neuesten Stand ist. Die Tatsache, daß in den letzten Jahren verstärkt Flächen bebaut wurden, führt zu Siedlungsgebieten in der ERS-1 Klassifikation, die im DSM nicht ausgewiesen sind. Ein anderes Problem ist die Eigenschaft des SAR - Sensors, Siedlungen nicht zu registrieren, wenn diese eine ungünstige Orientierung zum Sensor haben oder durch Bewuchs verdeckt sind, wodurch die im DSM ausgewiesenen Siedlungen in der Klassifikation z.T. als Wald oder Boden abgebildet werden.

5.2.2 Vergleich mit einer LANDSAT-TM Klassifizierung

Die Frage der Klassifizierungsgenauigkeit der ERS-1 Bilddaten soll hier noch aus einem anderen Blickwinkel betrachtet werden. Wir haben für das Gebiet des Oberrheingrabens eine Vielfalt von Landnutzungsergebnissen aus anderen Vorhaben vorliegen. In einem Ausschnitt der Größe 19 km x 30 km im Bereich nördlich von Karlsruhe werden nachfolgend die Ergebnisse der ERS-1 Klassifizierung mit Radar-Bilddaten vom 07. Juni, 16. August und 20. Sept. 1992 mit dem Ergebnis der Klassifizierung von LANDSAT-TM Bilddaten vom 11. Juli und 28. August 1991 verglichen. Die Ergebnisse einer multispektralen LANDSAT-TM Klassifizierung entsprechen nach unserer Analyse zu 75% bis 100% der tatsächlichen Gegebenheit an der Erdoberfläche im betreffenden Zeitpunkt; wenn man die 15 Klassen dieses Ergebnisses zu den 4 Hauptklassen 'Wasser', 'Siedlung', 'Wald' und 'Boden' zusammenfaßt, sind die Ergebnisse im Bereich zwischen 95% und 100% korrekt. Sie eignen sich also als Zielgröße für die

Analyse der Ergebnisse der ERS-1 Klassifizierung, selbst wenn die Aufnahmedaten einerseits aus 1991 und andererseits aus 1992 stammen.

Abbildung 37 zeigt auf der linken Seite den hier verwendeten Ausschnitt der ERS-1 Bilddaten im Maßstab 1 : 150.000 in einer farbigen Überlagerung. Man erkennt die Stadt Karlsruhe und den Rheinhafen am unteren Bildrand. Auf der rechten Seite ist das Ergebnis des Vergleichs der beiden Klassifizierungen dargestellt. Dabei wurde die in Abbildung 38 gezeigte Farbtabelle verwendet.



Abbildung 37: ERS-1 Szene und Übereinstimmung zwischen ERS-1 und TM Klassifizierung

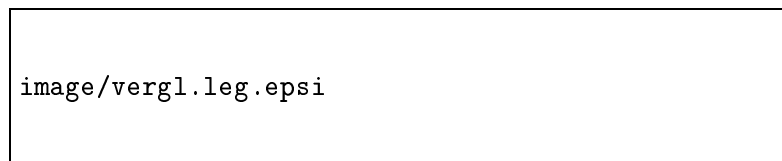


Abbildung 38: Legende zum Vergleich ERS-1 – LANDSAT-TM

Tabelle 32 zeigt das Ergebnis dieses Vergleichs in Zahlen. Genannt sind zunächst die Zahlen der Bildpunkte, die in der jeweiligen Klassifizierung in die jeweilige Klasse fallen. Die Zahl der für die Klassen übereinstimmenden Bildpunkte ist auch in Prozent, bezogen auf die TM- wie auch auf die ERS-1 Klassifizierung, angegeben. Die Übereinstimmung zwischen beiden Klassifizierungen erreicht insgesamt einen Betrag von 65%. Es fällt auf, daß die Bildpunkte, die die ERS-1 Klassifizierung den Klassen Wasser, Siedlung und Wald zuweist, überdurchschnittlich korrekt sind, wobei jedoch nur

	TM	ERS-1	übereinstimmend	% von ERS-1	% von TM
Wasser	46646	32076	28108	87	60
Siedlung	200195	54171	40571	75	20
Wald	288041	338998	219991	65	76
Boden	377116	486699	305019	59	76
Reject	2	56			
Summe	912000	912000	593689	65	65

Tabelle 32: Vergleich der ERS-1 Klassifizierung mit einer LANDSAT-TM Klassifizierung im Gebiet Karlsruhe

ein geringer Prozentsatz der laut TM-Klassifizierung existierenden Bildpunkte der Klasse Siedlung gefunden wurde. Die Erklärung dafür ist darin zu sehen, daß insbesondere lockere Siedlungen, die auch Grundstücksteile mit natürlicher Vegetation enthalten, in ihrem Rückstreuverhalten den verschiedenen Waldtypen sehr ähnlich sind und bei der Klassifizierung der ERS-1 Bilddaten sowohl mit Wald als auch mit verschiedenen landwirtschaftlichen Klassen leicht verwechselt werden.

5.3 Datenformat

Die Klassifizierungsergebnisse werden in dem von uns entwickelten DIDIX-Format abgespeichert. Dieses läßt sich problemlos in alle gängigen Bildformate konvertieren. Dadurch ist gewährleistet, daß die Rasterdaten ihren Geobezug nicht verlieren, da im DIDIX-Format sowohl Koordinaten als auch Pixelgröße und Koordinatensystem enthalten sind. Die Bildmatrix ist dabei mit maximal 256 verschiedenen Grauwerten kodiert, wobei jeder Klasse ein Grauwert zugeordnet wird. Die Grauwerte können dann mittels einer Look-Up-Tabelle in die entsprechende Farbkodierung transformiert werden, so daß die Farbgebung auch nachträglich auf einfache Art und Weise an die Bedürfnisse angepaßt werden kann. Als Projektion wird das von der DLR in Oberpfaffenhofen vorgegebene UTM-System verwendet. Die Größe und Lage der abgespeicherten Kacheln entspricht dem Blattschnitt der TÜK 200. Bedingt durch den Blattschnitt der TÜK 200, der sich an geographischen Koordinaten orientiert, ergibt sich in der UTM-Projektion eine Überlappung der Kartenblätter an den Rändern. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 39 dargestellt. Die Darstellung beruht auf der UTM-Projektion im UTM-Streifen UT32. Die einzelnen Kartenblätter entsprechen einer rechteckigen Matrix in der UTM-Projektion und sind so gewählt, daß das komplette TÜK 200 Blatt darin enthalten ist. Die beiden senkrechten Linien stellen die Grenze zwischen den UTM-Streifen UT31, UT32 und UT33 dar. Um große Überschneidungen im Osten Deutschlands zu vermeiden (dies führt auch zu entsprechend großen Verzerrungen in der Darstellung), werden die Blätter rechts der UTM-Streifengrenze im Streifen UT33 dargestellt. Die direkt auf der Grenze liegenden Blätter bleiben in der UT32 Darstellung. Die entstehenden Rastermatrizen haben eine Größe von ca. 4000 x 4000 Pixel, was einer Dateigröße von ca. 16 Megabyte entspricht. Das gesamte Datenvolumen für ganz Deutschland, einschließlich der Gebiete des benachbarten Auslandes, beläuft sich damit auf ca. 1 Gigabyte.

5.4 Programme

An unserem Institut wird schon seit längerem ein eigenes, auf unsere Bedürfnisse zugeschnittenes Bildverarbeitungssystem DIDIX entwickelt, gepflegt und weitergeführt ([Wiesel, 1985]). Ein wesentliches Entwicklungsziel liegt darin, ein portables, Netzwerk-transparentes Bildverarbeitungssystem aufzubauen, das auf allen möglichen Rechnerplattformen mit den Industriestandards UNIX und X-WINDOWS ablauffähig ist. In einer ersten Entwicklungsstufe wurden dazu die notwendigen DIDIX-Grundroutinen und ein Kernmodul zur Ausgabe und interaktiven Manipulation von Bildern auf dem Bildschirm unter

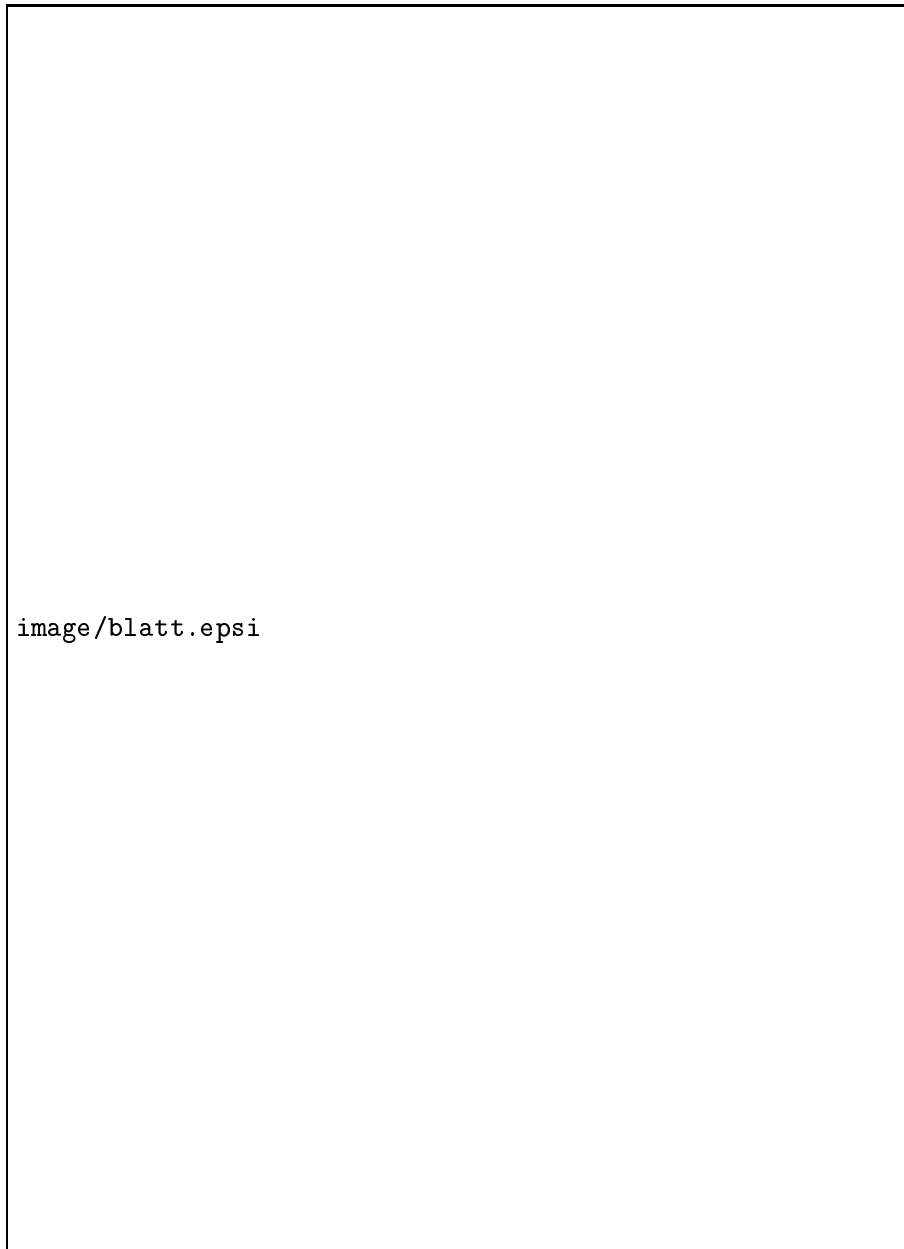


Abbildung 39: Blattschnitt der TÜK 200

X-WINDOWS implementiert. Die zweite Phase diente der Entwicklung der eigentlichen Bildverarbeitungs-routinen. In dieses Konzept sind auch die Programme der ERS-1 Verarbeitungskette eingebunden. Die gesamte Prozessierungskette wurde innerhalb der DIDIX-Umgebung implementiert.

Da die im Projekt implementierten Programme auch die DIDIX-Grundroutinen benötigen, würde eine Veröffentlichung an dieser Stelle den Rahmen des Berichtes sprengen. Interessenten werden gebeten, sich direkt mit unserem Institut in Verbindung zu setzen.

5.5 Sach- und Personalaufwand

Das Projekt Radarkarte Deutschland war aufgrund der zu bearbeitenden Fläche ein sehr aufwendiges Projekt. Die Klassifikation großer Gebiete ist einerseits eine logistische Herausforderung, andererseits mit einem großen interaktiven Aufwand durch einen Operateur verbunden. Darüberhinaus sollte die

Entwicklung und Erforschung neuer Techniken ein wesentlicher Bestandteil des Vorhabens sein.

5.5.1 Datengrundlage

Die Bundesrepublik Deutschland verfügt einschließlich der neuen Bundesländer über eine Gesamtfläche von 356910 Quadratkilometer. Bei einer Pixelgröße von 25 mal 25 Metern und einer Darstellung mit 256 Grauwerten ergibt dies eine Datenmenge von ca. 570 MByte, oder eben eine Anzahl von 570 Millionen Pixeln, die zu klassifizieren sind. Für die Prozessierung waren zusätzlich zu den ERS-1 Daten insgesamt 3 Datenquellen als Kontextinformation erforderlich: DGM, DSM und die Naturräumliche Gliederung. Alle sind mit 256 Grauwerten pro Pixel codiert und in Kacheln verschiedener Größe abgelegt. Bedingt durch Überschneidungen der Kacheln und die teilweise Abdeckung des benachbarten Auslandes beträgt die Datenmenge allein für die alten Bundesländer ca. 670 MByte pro Kanal, ca. 2 GByte in allen Kontextkanälen zusammen. Für die gesamte BRD summiert sich der Umfang der Kontextdaten zu ca. 3 GByte, das Klassifikationsergebnis benötigt nochmals 1 GByte.

Um die ganze BRD mit ERS-1 abdecken zu können, sind etwa 100 Szenen erforderlich, die jeweils in dreifacher Abdeckung für eine multitemporale Auswertung benötigt werden. Jede Szene deckt ein Gebiet von ca. 100 Quadratkilometern ab und benötigt etwa 200 MByte Speicherplatz. Die Szenen wurden in einem 12.5 Meter Raster mit einem Dynamikbereich von 16 Bit geliefert. Nach einer Reduzierung auf 8 Bit und einem Resampling auf eine Pixelgröße von 25 Metern reduzierte sich das Gesamtvolumen von 200 auf 25 MByte. Das gesamte Datenvolumen für die Bundesrepublik beträgt somit 60 GByte für die Originale und wurde bei uns auf ein Volumen von 7.5 GByte reduziert. Der etwas höhere Bedarf der ERS-1 Szenen von 2.5 GByte pro Kanal gegenüber 1 GByte bei den Kontextdaten resultiert aus einer fast vollständigen Überlappung der ERS-1 Szenen benachbarter Orbits.

5.5.2 Rechnerausstattung

Um die immense Datenmenge in angemessener Zeit bewältigen zu können, wurde am 30. Okt. 1989 ein für die Projektdurchführung erforderlicher Arbeitsplatz-Rechner ARDENT TITAN III mit

- 32 MB Arbeitsspeicher
- zwei mit 32 MHz getakteten R 3000 RISC Mikroprozessoren
- max. 64 MIPS Rechenleistung mit skalaren Größen
- zusätzlich 2 Vektorprozessoren mit zusammen max. 64 MFLOPS Rechenleistung mit Vektorgrößen
- 256 MB/sec interne Datenübertragungsrate
- 760 MB Plattenspeicher
- 120 MB Magnetbandlaufwerk
- 19 Zoll Farbbildschirm 1280 x 1024 Bildpunkte
- Ethernet - Schnittstelle für Vernetzung mit vorhandenen Rechnern
- UNIX Version V.3 Betriebssystem mit Berkeley 4.3 Erweiterung
- Network File System
- parallelisierender und vektorisierender FORTRAN-Compiler
- parallelisierender und vektorisierender C - Compiler

- X-WINDOWS Version 11
- Dynamic Object Rendering Environment Software für graphische Ausgabe

beschafft. Im Laufe der Zeit wurden weitere externe Plattenspeicher hinzugekauft, so daß letztlich ca. 5 GByte zur Verfügung standen. Dies ist in Anbetracht des 60 GByte Datenvolumens der ERS-1 Daten und des Bedarfs der Speicherung verschiedener Zwischenergebnisse nicht besonders großzügig dimensioniert, kann aber durchaus als ausreichend angesehen werden. Die Prozessierung der Szenen erfolgte hauptsächlich nachts, um die interaktive Arbeit am Rechner möglichst wenig zu stören. Rechenintensive Prozesse wurden auf mehrere Rechner innerhalb des vorhandenen Netzwerkes verteilt, wodurch sich die Rechenzeit für eine Szene auf ca. 10 Stunden verkürzte. In diesem Zusammenhang muß erwähnt werden, daß im Hinblick auf eine Verarbeitung über Nacht keine besonderen Anstrengungen hinsichtlich der Optimierung der Rechenzeit unternommen wurden. Vielmehr wurde auf objektorientierte Strukturen geachtet, die ein effektiveres Arbeiten erlauben, jedoch hinsichtlich der benötigten Rechenzeiten etwas schlechter abschneiden.

5.5.3 Personal

Für die Forschungs- und Organisationsaufgaben innerhalb des Projektes standen zwei Mitarbeiter zur Verfügung, wovon einer seitens der DARA finanziert wurde. Desweiteren waren im Durchschnitt 5 Hilfswissenschaftler mit einem Einsatz von 20 - 40 Stunden pro Monat beschäftigt. Ihr Aufgabenbereich umfaßte unter anderem die folgenden Punkte:

- Archivierung der ERS-1 Bänder
- Digitalisierung der Naturräumlichen Gliederung
- Entzerrung des DGM auf das UTM-Koordinatensystem
- Vektor-Raster Konvertierung und Entzerrung des DSM
- Klassifikation
- Implementierung von in der Literatur beschriebenen Verfahren

6 Probleme

Die Generierung einer großflächigen Landnutzungskartierung, wie sie hier für den Bereich der Bundesrepublik durchgeführt wurde, bringt eine Reihe von Problemen mit sich. Zum einen stellt sich die Frage nach der Qualität des Endproduktes, zum anderen ist die einfache Durchführbarkeit oder Automatisierbarkeit der angewandten Verfahren ein entscheidendes Kriterium bei der Lösung zukünftiger Aufgaben.

6.1 Qualität

Die Qualität des Endproduktes hängt zum einen von den verwendeten Daten, zum anderen von den angewandten Verfahren ab, mit denen die Daten verarbeitet werden. Hinzu kommt die nur subjektiv zu bewertende Erfahrung und Eignung des Operateurs bei interaktiven Prozessen, z.B. bei der Definition von Trainingsgebieten für die Klassifikation.

6.2 Produktspezifische Probleme

Die Kartierung der Landnutzung mit multitemporalen ERS-1 Abbildungen ist mit Problemen hinsichtlich der Trennbarkeit der Klassen verbunden. Selbst die Unterscheidung der sechs Grobklassen bereitet Schwierigkeiten, da die Signaturen oftmals völlig identisch sind. Überschneidungen entstehen insbesondere bezüglich der Klassen (fließendes) Wasser und Wiese, sowie zwischen Siedlung und Wald. Diese Mehrdeutigkeiten können mit den Mitteln des ERS-1 auch bei multitemporaler Auswertung nicht beseitigt werden: Hierfür wäre ein Sensor mit verschiedenen Frequenzen und Polarisationen erforderlich.

Das allgemein bei SAR auftretende Problem der geringen radiometrischen Auflösung, das durch den Speckle-Effekt hervorgerufen wird, konnte mit dem von uns entwickelten EPOS-Filter wesentlich entschärft werden. Der Gewinn an radiometrischer Auflösung geht dabei nicht wie bei anderen Filtern auf Kosten der geometrischen Auflösung: Kanten und einzelne Punktstreuer bleiben nahezu vollständig erhalten.

6.3 Verfahrensspezifische Probleme

In ERS-1 Bildern treten immer wieder landwirtschaftliche Flächen mit sehr hohen Rückstreuwerten auf, die in Konflikt mit Siedlungsbereichen stehen. Sorgfältig gewählte Aufnahmezeitpunkte sind eine Möglichkeit, solche Fehler auszuschließen: Ein Zeitpunkt muß zu einer Zeit niedrigen Bewuchses aufgenommen sein. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Texturmerkmalen für die Klassifikation, die aber bislang nur unzureichend realisiert ist. Weitere Lösungsansätze werden weiterhin von uns verfolgt.

Bei einem so großen Gebiet wie der Bundesrepublik ist es nicht möglich, mit einem vernünftigen Aufwand Trainingsgebiete durch Ortsbegehungen zu definieren. Die Definition muß sich somit an - in der Regel nicht aktuellen- Karten und an der Signatur der Aufnahmen orientieren. Dies kann im Einzelfall zu Fehleinschätzungen durch den Operateur führen, stellt im Großen und Ganzen aber keine allzu große Fehlerquelle dar. Nicht zuletzt wegen des subjektiven Einflusses des Operateurs auf das Ergebnis ist hier eine weitere Automatisierung dringend erforderlich.

6.4 Automatisierbarkeit

Für den praktischen Einsatz einer solchen Verarbeitungskette zur Kartierung der Landnutzung ist die Automatisierbarkeit der anfallenden Verarbeitungsschritte von größtem Interesse. Die meisten Verarbeitungsschritte sind im Rahmen des Projektes bereits auf ein Minimum an Interaktion reduziert worden. Unumgänglich ist nach wie vor die Bedienung eines Bandlaufwerkes, da die große Menge anfallender ERS-1 Szenen derzeit nur auf Bändern gespeichert werden kann. Die Kontextdaten hingegen lassen sich problemlos in komprimierter Form für die ganze Bundesrepublik auf Platte speichern, so daß sie stets verfügbar sind.

Der hauptsächliche Teil der interaktiven Arbeit ist der iterative Klassifikationsprozeß selbst, der aus den Schritten Trainingsgebietsdefinition, Klassifikation und Verifikation besteht. Der Versuch, Statistiken aus bereits klassifizierten Gebieten auf andere zu übertragen, war aufgrund der nicht hinreichend genauen Kalibrierung der ERS-1 Szenen und der unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte nicht erfolgreich. Auch eine nachträgliche Kalibrierung aufgrund der Gesamtstatistik einer Szene führte nicht zum erhofften Erfolg. Dieses Problem bedarf noch weiterer eingehender Untersuchungen. Die Verwendung von Trainingsgebieten bereits bestehender Klassifikationen für eine Aktualisierung konnte noch nicht untersucht werden, da hierzu Aufnahmen über einen längeren Zeitraum zur Verfügung stehen sollten.

6.5 Probleme der einzelnen Verfahren

6.5.1 Radiometrische Korrektur von Beleuchtungseffekten

Die Qualität der radiometrischen Korrektur aufgrund der Hangneigung ist im wesentlichen von der Genauigkeit des verwendeten Digitalen Geländemodells abhängig. Insbesondere erhalten wir eine nahezu vollständige Korrektur, wenn eine pixelgenaue Überlagerung der ERS-1 Daten mit dem DGM zustande kommt.

6.5.2 Texturanalyse

Die Texturanalyse von ERS-1 Bilddaten als Hilfsmittel für die Landnutzungskartierung hat aus mehreren Gründen nicht zum erhofften Erfolg geführt. Zum einen ist bei einer Auflösung von ca. 25 Meter auf der Erdoberfläche nur eine Abbildung von relativ groben Texturmustern zu erwarten. Diese beschränken sich im wesentlichen auf alle künstlichen Objekte wie Industrie- und Siedlungsgebiete. In Waldgebieten ist ansatzweise mit Texturinformationen zu rechnen, während sich bei Wiesen und Landwirtschaftsflächen keine Textur abzeichnen wird, da die Strukturen zu klein sind. Im Bereich von Wasserflächen sind die Strukturen sehr unregelmäßig und stark mit der lokalen Windstärke korreliert, so daß eine Bewertung schwierig ist. In Siedlungsgebieten sind die Strukturen ebenfalls unregelmäßig und entziehen sich damit einer exakten Bewertung.

Die im Speckle-Rauschen enthaltene Texturinformation ist stark mit dem lokalen Grauwert korreliert, der Grauwert eignet sich aber wesentlich besser zur Analyse. Da Texturparameter aus der Pixelumgebung berechnet werden, entstehen Fehler im Bereich von Kanten zwischen unterschiedlichen Bodenbedeckungsklassen. Diese Fehler bedingen eine Verringerung der geometrischen Auflösung im Klassifizierungsergebnis, so daß die Effekte der kantenerhaltenden Filterung wieder zunichte gemacht werden. Die gezeigten Verfahren einer bezüglich Kanten unsensiblen Texturextraktion zeigen hier eine mögliche Forschungsrichtung zur Lösung der Probleme auf.

7 Ausblick

Radarsysteme wie das des ERS-1 Satelliten stellen ein mächtiges Werkzeug in der Fernerkundung dar. Die geringe Abhängigkeit von Witterungseinflüssen wie z.B. Bewölkung erlaubt es, Aufnahmen mit geringen zeitlichen Abständen zu erhalten. Dies ermöglicht zum einen die Bereitstellung aktueller flächendeckender Informationen über die Landnutzung, zum anderen wird durch die Auswertung von Zeitreihen erstmals eine differenzierte Beobachtung landwirtschaftlich genutzter Flächen erreicht.

Um eine höhere Genauigkeit und eine bessere Differenzierung von Bodenbedeckungsklassen zu erreichen, werden in naher Zukunft neben der Auswertung von textuellen und strukturellen Bildinformationen insbesondere die interferometrischen Produkte eine wichtige Rolle spielen. Die Interferometrie bietet, neben der Möglichkeit der Generierung von Digitalen Geländemodellen, auch eine Aussage über die zeitliche Konstanz der Objekte auf der Erdoberfläche bezüglich sehr kurzer Zeitintervalle. Diese als Phasen-Kohärenz bezeichnete Information erlaubt es, dynamische Bereiche, wie etwa durch Wellen bewegtes Wasser oder durch starkes Wachstum geprägte Bereiche in der Landwirtschaft, zu separieren. Weitere Verbesserungen sind durch Verfahren zu erwarten, die eine Kombination von Daten verschiedener Sensoren unter Berücksichtigung der jeweiligen Sensor-Eigenschaften ermöglichen.

Einer der wesentlichen mittelfristigen Schritte ist die Realisierung von Sensoren mehrerer Frequenzen und Polarisierungen. Die hierdurch zur Verfügung stehenden zusätzlichen Informationen werden eine sehr viel bessere Differenzierung von Landnutzungsklassen erlauben als dies bislang der Fall war.

Die weitere Automatisierung der Landnutzungskartierung ist in Hinblick auf eine operationelle Bereitstellung aktueller Datensätze unerlässlich. Diese muß auf der Basis bereits existierender Datensätze erfolgen, die hierzu in ihrer Charakteristik beschrieben und entsprechend der Beschreibung miteinander verknüpft werden müssen.

8 Veröffentlichungen

Im Rahmen dieses Projektes entstanden Veröffentlichungen zu folgenden Themenbereichen:

- Vorläufige Ergebnisse von Texturauswertungsverfahren: [Sties und Tex, 1990]
- Gesamtdarstellung des Gemeinschaftsprojektes RADARMAP OF GERMANY: [Winter et al., 1993]
- Qualitätskontrolle und Radiometrische Korrektur von Beleuchtungseffekten: [Tex und Sties, 1993b]
- Erste Ergebnisse der ERS-1 Bildauswertung: [Tex und Sties, 1993a]
- Gesamtdarstellung des Gemeinschaftsprojektes RADARMAP OF GERMANY: [Winter et al., 1994]
- Speckle-Filterung: [Hagg und Sties, 1994]
- Gesamtdarstellung des Gemeinschaftsprojektes RADARMAP OF GERMANY: [Markwitz et al., 1995]
- Texturbeschreibung durch Strukturanalyse: [Hagg et al., 1995]

Literatur

- [Argenti et al., 1990] Argenti F., Alparone L., und Benelli G. (1990). Fast algorithms for texture analysis using cooccurrence matrices. *IEEE-Proceedings*, 137, Pt. F(6):443–448.
- [Bähr und Vögtle, 1991] Bähr H.-P. und Vögtle T. (1991). *Digitale Bildverarbeitung: Anwendungen in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung*. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 2. Auflage.
- [Bayer, 1990] Bayer T. (1990). Korrektur reliefbedingter radiometrischer Verzerrungen in geokodierten SEASAT-A SAR-Bildern am Beispiel des Szenenausschnittes Bonn und Umgebung. DLR-FB 90-54, DLR Oberpfaffenhofen.
- [Crimmins, 1985] Crimmins T. (1985). Geometric filter for reducing speckle. In *SPIE, International Conference on Speckle*, Band 556, Seiten 213–222.
- [Czech, 1995] Czech A. (1995). Analyse nicht differenzierbarer ERS-1 SAR-Signaturen von Siedlungsbereichen. Unveröffentlichte Studienarbeit, IPF, Universität Karlsruhe.
- [Davis, 1982] Davis L. (1982). Image texture analysis: Recent developments. In *Proc. of the Conf. on Pattern Recognition and Image Processing*, Seite 214.
- [Ebert und Mauer, 1987] Ebert A. und Mauer E. (1987). Automatische Detektion von Bereichen einheitlicher Interferenzerscheinungen in SAR - Abbildungen durch Speckle Modellierung. In *Proc. des Aachener Symposiums für Signaltheorie*, Band 153 der Reihe *Informatik Fachbericht*, Seite 181. Springer Verlag.
- [Elachi, 1987] Elachi C. (1987). *Spaceborne Radar remote sensing: Applications and techniques*. IEEE Press, New York.
- [Fisz, 1962] Fisz M. (1962). *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Mathematische Statistik*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin.

- [Föllner, 1994] Föllner J. (1994). Kombination der Abbildungen verschiedener operationeller Satellitensensoren zur Optimierung der Landnutzungsklassifizierung. Unveröffentlichte Diplomarbeit, IPF, Universität Karlsruhe.
- [Frost et al., 1982] Frost V., Stiles J., Shanmugan K., und Holtzman J. (1982). A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 4(2):157–166.
- [Hagg et al., 1995] Hagg W., Segl K., und Sties M. (1995). Classification of urban areas in multi-date ERS-1 images using structural features and a neural network. In *Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- [Hagg und Sties, 1994] Hagg W. und Sties M. (1994). Efficient speckle filtering of SAR images. In *Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Seiten 2140–2142.
- [Hagg und Sties, 1996] Hagg W. und Sties M. (1996). The epos speckle filter: A comparison with some well-known speckle reduction techniques. In *Proceedings XVIII ISPRS-Congress, Wien*. In Druck.
- [Hamming, 1977] Hamming R. (1977). *Digital Filters*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- [Haralick, 1978] Haralick R. (1978). Statistical and structural approaches to texture. In *Proc. of the 4. Int. Conf. on Pattern Recognition*, Seite 45.
- [Hartman et al., 1990] Hartman E. J., Keeler J. D., und Kowalski J. M. (1990). Layered Neural Networks with Gaussian Hidden Units as Universal Approximations. *Neural Computation*, 2:210–215.
- [Hermann, 1992] Hermann C. (1992). Radiometrische Korrektur des Einflusses von Hangneigungen auf Radar-Abbildungen. Unveröffentlichte Diplomarbeit, IPF, Universität Karlsruhe.
- [Hornik, 1991] Hornik K. (1991). Approximation Capabilities of Multilayer Feedforward Networks. *Neural Networks*, 4:251–257.
- [Joos, 1995] Joos C. (1995). Kombination von Szenen verschiedener Orbits zur Reduzierung der aufgrund geometrischer Bedingungen nicht abbildbaren Gebiete. Unveröffentlichte Diplomarbeit, IPF, Universität Karlsruhe.
- [Kleinknecht, 1996] Kleinknecht E. (1996). Analyse der Multitemporalen Auswertung von SAR-Bilddaten des ERS-1. Unveröffentlichte Studienarbeit, IPF, Universität Karlsruhe.
- [Kramer, 1994] Kramer J. (1994). *Observation of Earth and its Environment*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- [Kuan et al., 1985] Kuan D., Sawchuk A., Strand T., und Chavel P. (1985). Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 7(2):165–177.
- [Leberl, 1990] Leberl F. W. (1990). *Radargrammetric Image Processing*. ARTECH HOUSE, INC., Norwood, MA, USA.
- [Lee und Schachter, 1980] Lee D. und Schachter B. (1980). Two algorithms for constructing a delaunay triangulation. *International Journal of Computer and Information Sciences*, 9(3):219–242.
- [Lee, 1981] Lee J. (1981). Refined filtering of image noise using local statistics. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 15:380–389.

- [Lee, 1980] Lee J.-S. (1980). Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAM1-2(2):165–168.
- [Lee, 1983a] Lee J.-S. (1983a). Digital image smoothing and the sigma filter. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 24:255–269.
- [Lee, 1983b] Lee J.-S. (1983b). A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC - 13(1):85–89.
- [Lee et al., 1994] Lee J.-S., Jurkevich I., Dewaele P., Wambacq P., und Oosterlinck A. (1994). Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review. In *Remote Sensing Reviews*, Band 8, Seiten 313–340, USA. Harwood Academic Publishers.
- [Lopes et al., 1990a] Lopes A., Nezry E., Touzi R., und Laur H. (1990a). Maximum a posteriori filtering and first order texture models in sar images. In *Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Seiten 2409–2412.
- [Lopes et al., 1990b] Lopes A., Touzi R., und Nezry E. (1990b). Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(6):992–1000.
- [Markwitz et al., 1995] Markwitz W., Winter R., Kosmann D., Wiggenhagen M., Hagg W., und Sties M. (1995). Radarkarte Deutschland. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung (ZPF)*, Seiten 150–159. Herbert Wichmann Verlag Karlsruhe.
- [Nagao und Matsuyama, 1980] Nagao M. und Matsuyama T. (1980). *A Structural Analysis of Complex Aerial Photographs*. Plenum Press, New York and London.
- [Peckinpough, 1991] Peckinpough H. S. (1991). An improved method for computing gray-level cooccurrence matrix based texture measures. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 53(6):574–580.
- [Pike, 1985] Pike T. (1985). SAR image quality: A review. DFVLR-Mitt., Wissenschaftliches Berichtswesen der DFVLR ISSN 0176-7739, DLR Oberpfaffenhofen.
- [Roth, 1993] Roth J. (1993). Implementierung zweier Verfahren zur Qualitätsanalyse von SAR-Bilddaten. Unveröffentlichte Studienarbeit, IPF, Universität Karlsruhe.
- [Schreier, 1993] Schreier G., Hrsg. (1993). *SAR Geocoding - Data and Systems*, Band 1. Wichmann, Karlsruhe.
- [Segl, 1990] Segl K. (1990). Neuentwicklung eines Programmpaketes zur überwachten Klassifizierung für mehrkanalige Bilddaten. Unveröffentlichte Diplomarbeit, IPF, Universität Karlsruhe.
- [Segl, 1996] Segl K. (1996). *Klassifizierung von Form- und Spektralmerkmalen in Satellitenbildern mit künstlichen neuronalen Netzen*. Dissertation, IPF, Universität Karlsruhe.
- [Shi und Fung, 1994] Shi Z. und Fung K. B. (1994). A comparison of digital speckle filters. In *Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- [Sties et al., 1994] Sties M., Hagg W., und Joos C. (1994). Ergebnisse der Auswertung von JERS-1 Radar-Bilddaten. In *Berichtsband zum DFD - Nutzerseminar*. DLR Oberpfaffenhofen.
- [Sties und Tex, 1990] Sties M. und Tex S. (1990). Analysis of ERS-1 radar image data for land use classification. In *ISPRS, Commission VII*, Band 28, Part 7-1, Seiten 693–701. Victoria, Canada.

- [Tex und Sties, 1993a] Tex S. und Sties M. (1993a). Radarkarte Deutschland - Erste Ergebnisse der ERS-1 Bildauswertung -. In *Tagungsband: 9. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums der DLR*, Seiten 15–20. DLR, Oberpfaffenhofen.
- [Tex und Sties, 1993b] Tex S. und Sties M. (1993b). Radarkarte Deutschland, Verfahren für die ERS-1 Radarbildauswertung. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung (ZPF)*, Seiten 115–122. Herbert Wichmann Verlag Karlsruhe.
- [Ulaby et al., 1982a] Ulaby F., Moore R., und Fung A. (1982a). *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*. Remote Sensing. Artech House, Inc., 685 Canton Street, Norwood, MA 02062.
- [Ulaby et al., 1982b] Ulaby F., Moore R., und Fung A. (1982b). *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Kapitel 7, Seiten 483–492. Band II der Reihe [Ulaby et al., 1982a].
- [Wechsler, 1980] Wechsler H. (1980). Texture analysis - a survey. In *Signal Processing*, Nummer 2, Seite 271.
- [Wiesel, 1985] Wiesel J. (1985). Entwurf eines Bildverarbeitungskernsystems. *Bildmessung und Luftbildwesen*, 53:91.
- [Winter et al., 1993] Winter R., Kosmann D., Schulz B.-S., Sties M., und Wiggenhagen M. (1993). Radarmap of germany - first mosaic and classification. In *Proceedings First ERS-1 Symposium - Space at the Service of our Environment, Cannes, France*. ESA SP-359.
- [Winter et al., 1994] Winter R., Kosmann D., Sties M., und Wiggenhagen M. (1994). Mosaic and classification for the radarmap germany. In *Proceedings Second ERS-1 Symposium - Space at the Service of our Environment, Hamburg, Germany*. ESA SP-361.