

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Lehrstuhl für Geoinformatik, Geohydrologie und Modellierung des Geographischen Instituts der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Die zugrundeliegenden Untersuchungen wurden im Herbst 1995, im Rahmen meiner Tätigkeit im Teilprojekt B1¹ des Sonderforschungsbereichs 350² der Universität Bonn, begonnen und ab Frühjahr 1998, im Rahmen eines DFG-Projekts³, am Lehrstuhl für Geoinformatik, Geohydrologie und Modellierung an der FSU Jena weitergeführt und abgeschlossen.

Herr Prof. Dr. W.-A. Flügel übernahm die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit. Ihm gilt mein herzlicher Dank für die stets engagierte und kritische Begleitung der Untersuchungen.

Herrn Prof. Dr. R. Mäusbacher und Herrn Prof. Dr. C. Leibundgut danke ich für die Bereitschaft zur Übernahme der Korreferate.

Bei den Kolleginnen und Kollegen aus dem Teilprojekt B1 und vom Lehrstuhl für Geoinformatik der FSU Jena möchte ich mich für die gute und intensive Atmosphäre unserer Zusammenarbeit bedanken.

Ulrike Bende-Michl und Christian Michl verdanke ich eine Vielzahl von Hinweisen zur regionalen Charakteristik der Einzugsgebiete von Sieg und Bröl. Helmut Staudenrausch unterstützte mich bei der Analyse der Digitalen Geländemodelle und den damit verbundenen GIS-Verarbeitungen. Peter Dornberg sorgte, als Administrator der B1-Projekt Datenbank, für einen effektiven Informationsfluß zwischen Jena und Bonn. Helen Dahlke übernahm Teile der umfangreichen Klima- und GIS-Datenaufbereitungen. Volker Hochschild begleitete die gesamte Arbeit mit Diskussionen und Anregungen. Rainer Hoffmann unterstützte, in seiner Funktion als Systemadministrator am Lehrstuhl für Geoinformatik, die Projekte in zahlreichen technischen Detailfragen.

Die Daten der ERS-1/2 Tandem Mission stellte die ESA für die Auswertung im Rahmen des PI-Projekts AOT.D306 zur Verfügung.

Jena, im April 1999

Martin Klenke

¹Teilprojekt B1: „Wasserbilanzen, Stoffeintrag und -transport im Einzugsgebiet der Sieg – Regionale Modellierung des hydrologischen Prozeßgefüges“.

²SFB 350: „Wechselwirkungen kontinentaler Stoffsysteme und ihre Modellierung“.

³Titel: „Auswertung von Daten der ERS-Tandem Mission (1995/1996) für die Klassifikation von Landoberflächen im Einzugsgebiet der Sieg, Rheinisches Schiefergebirge“.

GIS-gestützte Landnutzungs-klassifikationen auf Grundlage von Daten passiver und aktiver Fernerkundungssensoren zur distributiven Flußeinzugsgebietsmodellierung

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden LANDSAT TM- und ERS SAR-Daten zur Erfassung der Landnutzung im Einzugsgebiet der Sieg genutzt. Das 2853 km² große Untersuchungsgebiet liegt im zentralen, ostrheinischen Teil des Rheinischen Schiefergebirges.

Die Auswertung der optischen Daten dient der Erstellung einer Parameterisierungs- und Validierungsbasis für distributive, hydrologische Modellierungsverfahren. Die Landnutzung stellt in diesem Zusammenhang einen Kernparameter dar, der für das Einzugsgebiet flächendeckend aus TM-Daten bestimmt wird. Methodisch wird nach Atmosphärenkorrektur, Georeferenzierung und Topographischer Normalisierung eines monotonalen TM-Datensatzes die Landnutzung mit einer überwachten Maximum Likelihood-Klassifikation bestimmt. Im Rahmen der Nachbearbeitung kommen zur Ergebnisverbesserung u.a. GIS-Verfahren der Nachbarschaftsanalyse zum Einsatz.

Als weitere Bestandteile der Parameterisierungs- und Validierungsbasis werden aus unterschiedlichen Quellen Daten zu Klima, Böden und Landnutzung homogenisiert, aufbereitet und innerhalb eines Geographischen Informations- und Datenbank-Systems strukturiert archiviert, sowie Höhendaten verschiedener Landesvermessungsämter zum Aufbau von Digitalen Geländemodellen genutzt.

Die Analyse der Radardaten stützt sich auf Aufnahmen aus der ERS-1/2 Tandem Mission (1995/1996). Methodische Fragen stehen bei der Auswertung im Vordergrund, daher werden die Untersuchungen nicht auf Gesamteinzugsgebietsebene durchgeführt, sondern in einem, mit Zusatzdaten besonders gut dokumentierten, Teilgebiet. Die weitgehende Bewölkungs- und Beleuchtungsunabhängigkeit stellt einen wesentlichen Vorteil der Mikrowellenverfahren dar, allerdings gestaltet sich die Auswertung, vor allem in reliefiertem Gelände, methodisch aufwendiger als die Analyse optischer Fernerkundungsdaten. Zur Isolierung des Reliefeinflusses in den PRI-Daten werden Hauptkomponententransformationen eingesetzt, der Speckle-Effekt wird mit Hilfe adaptiver Filterverfahren reduziert. Die Georeferenzierung erfolgt unter Berücksichtigung eines Digitalen Geländemodells. Aus SLC-Daten verschiedener Tandempaare werden interferometrische Kohärenzbilder berechnet. Die Erfassung der Landnutzung erfolgt unter Berücksichtigung von Intensitäts- und Kohärenzinformation mit überwachten und unüberwachten Klassifikationsverfahren sowie verschiedenen GIS-Verarbeitungen.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Ansätze und Methoden werden abschließend vergleichend diskutiert und in den Gesamtzusammenhang der Arbeit gestellt.

Land use classifications using passive and active remote sensing data and GIS for distributed hydrological modelling

Summary

The study focuses on land use detection using LANDSAT TM and ERS SAR data in the River Sieg catchment. The study area is located in the Renish Slate Mountains (Central Uplands, Germany) and covers 2853 km².

The parameterization of physically-based, distributed hydrological watershed models requires areal analysis of the water cycle components. Besides topographical, pedological and geological factors the actual land use is an important input parameter for the physical and chemical modelling of the watershed hydrology and plays a significant role in the GIS-based delineation of the modelling entities that are used to preserve the spatial heterogeneity of catchments within physically-based, distributed hydrological models.

Hence, the visible/infrared remote sensing data is used for an areal determination of land use in the Sieg catchment. The data preprocessing includes atmospheric correction, rectification and topographic normalization of a monotemporal TM dataset. The classification utilizes a supervised maximum likelihood classifier. To enhance the accuracy of the classification result neighborhood-based GIS-postprocessing techniques are applied.

Furthermore additional reference information from different sources (including meteorological, pedological, digital terrain and detailed land use data) is edited, unified and archived in GI- and DB-systems to complete the parameterization and validation database.

The all weather capability is an important advantage of active microwave sensors. However, the analysis of this kind of data is more complicated due to the different factors influencing the backscatter intensity, the scene geometry, the radiometric terrain effect in mountainous regions and the speckle. Another advantage of SAR-systems is the possibility to analyze the phase content of the data making an interferometric processing possible.

In this study ERS-1/2 tandem mission data is used to clarify the feasibility of SAR-based land use detection in hilly terrain. Multitemporal PRI and SLC data is evaluated for this purpose. Adaptive filter techniques are used for speckle suppression in the PRI data. The geometric correction includes a Digital Elevation Model. The radiometric terrain effect is isolated and rejected with the help of Principal Components Analysis. The SLC data is used for an estimation of the interferometric coherence between different tandem partners. The land use classification utilizes supervised and unsupervised techniques under consideration of backscatter intensity and coherence information. Several GIS-techniques are used to enhance the classification accuracy.

Finally the results of the different approaches and methodologies are compared and discussed within the scope of the formulated questions.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	II
Summary	III
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XI
1 Einführung und Problemstellung	1
2 Stand der Forschung	3
2.1 Regionale hydrologische Modellierung	3
2.1.1 Räumliche Diskretisierung und Geographische Informationssysteme	4
2.1.2 Das Konzept der Response Units	5
2.2 Fernerkundung in der Flusseinzugsgebietsmodellierung	6
2.2.1 Landnutzung	7
2.2.2 Bodenphysik	10
2.2.3 Relief	13
2.2.4 Schnee	13
2.2.5 Gewässer	15
2.2.6 Niederschläge	15
2.2.7 Automatisierte Informationsextraktion aus Fernerkundungsdaten	17
2.3 Forschungsbedarf	19
2.4 Theoretische Grundlagen	21
2.4.1 Satellitensysteme	21
2.4.1.1 Das LANDSAT-System	22
2.4.1.2 ERS-1 und ERS-2	23
2.4.2 Eigenschaften abbildender Radarsysteme	25
2.4.2.1 SAR-Aufnahmeprinzip und systemeigene Parameter	25
2.4.2.2 Oberflächenparameter und Rückstreuverhalten	28
2.4.2.3 Interferometrische Verarbeitung und Kohärenz	32
2.4.3 Multispektralklassifikationen	34

3	Zielsetzung der Arbeit und methodisches Vorgehen	37
3.1	Arbeitsziele	37
3.2	Methodisches Vorgehen	38
4	Untersuchungsgebiet, Datenquellen und Vorarbeiten	41
4.1	Physische Ausstattung des Untersuchungsgebiets	41
4.2	Hydrologische Arbeiten in Teileinzugsgebieten der Sieg	44
4.3	Ausgewertete Fernerkundungsdaten	45
4.4	Höhendaten	45
4.5	Aufbau eines Datenpools für das Siegeinzugsgebiet	46
4.5.1	Landnutzung und Böden	47
4.5.2	Klima- und Bodendaten	47
5	Arbeiten und Ergebnisse	49
5.1	Aufbau und Analyse der Digitalen Geländemodelle	49
5.1.1	Erstellung eines Höhenmodells für das Siegeinzugsgebiet	50
5.1.2	Aufbau von Höhenmodellen für verschiedene Teileinzugsgebiete	50
5.1.3	Hydrologische GIS-Operationen	50
5.1.3.1	Ableitung von Einzugsgebietsgrenze und Teileinzugsgebieten	51
5.1.3.2	Berechnung des Flußnetzes	52
5.1.4	Reliefklassifikationen	53
5.2	Landnutzungserfassung mit Landsat TM-Daten	55
5.2.1	Vorverarbeitung der optischen Satellitenszenen	55
5.2.1.1	Atmosphärenkorrektur	57
5.2.1.2	Georeferenzierung	60
5.2.1.3	Topographische Normalisierung	61
5.2.1.4	Visuelle Interpretation der vorhandenen Szenen	62
5.2.2	Klassifikation der Landnutzung	63
5.2.2.1	Statistische Bildanalyse	63
5.2.2.2	Unüberwachte Klassifikationen	64
5.2.2.3	Signaturanalysen und Trainingsgebietsausweisung	65
5.2.2.4	Überwachte Maximum Likelihood-Klassifikation	73
5.2.3	Nachbearbeitung des Klassifikationsergebnisses	74
5.2.3.1	Fehlerbeurteilung	74
5.2.3.2	Zurückweisung unsicher klassifizierter Bildelemente	77
5.2.3.3	Umgebungsbezogene Reklassifikation	79
5.2.3.4	Mischpixelbereinigung	82
5.2.4	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	84
5.3	Auswertung der ERS SAR-Daten	86
5.3.1	Vorverarbeitung der PRI-Daten aus der ERS-1/2 Tandem Mission	87

5.3.1.1	Reduzierung des Speckle-Effekts	88
5.3.1.2	Berechnung des Radarrückstreuoeffizienten σ^0	90
5.3.1.3	Geometrische Korrektur	93
5.3.2	Vorverarbeitung der SLC-Daten	95
5.3.2.1	Erstellung von interferometrischen Kohärenzbildern	96
5.3.2.2	Geometrische Referenzierung	97
5.3.3	Erfassung der Landnutzung mit dem ERS SAR	97
5.3.3.1	Interpretation multitemporaler Intensitätskomposite	98
5.3.3.2	Hauptkomponententransformation zur Isolierung des radiom. Reliefeffekts	103
5.3.3.3	Kohärenzanalysen	106
5.3.3.4	Synergetische Klassifikation der Landnutzung	109
5.3.4	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	116
6	Zusammenfassung und Ausblick	119
6.1	Vergleichende Diskussion der Datenanalysen	119
6.2	Zusammenfassung	121
6.3	Ausblick	122
A	Farbtafeln	125
B	Referenzierung eines ERS-1/2 Tandem-Datensatzes	135
C	Abkürzungen	141
	Literaturverzeichnis	143

Abbildungsverzeichnis

2.1	Eindringvermögen von Radarwellen.	27
2.2	Der Effekt der Volumenstreuung.	27
2.3	Streuanteile unterschiedlich rauher Oberflächen.	28
2.4	Geometrische und radiometrische Effekte im SAR-Bild.	31
2.5	Interferometrisches Aufnahmeprinzip.	33
3.1	Organigramm der Fernerkundungsdatenauswertung.	38
4.1	Lage der Einzugsgebiete von Sieg und Bröl.	42
4.2	Landschaften des Siegeinzugsgebiets.	43
4.3	Höhenmodelle für das Siegeinzugsgebiet.	47
5.1	Arbeitsschritte der GIS-Analyse des Siegeinzugsgebiet-DGMs.	51
5.2	Teileinzugsgebiete der Sieg.	52
5.3	Die Sieg und ihre Hauptnebenarme abgeleitet aus dem DGM 25.	54
5.4	Organigramm der TM-Datenauswertung.	56
5.5	Paßpunkte auf der TM-Szene vom 05.08.1992.	60
5.6	Nutzungsspezifische Reflexionsmittelwerte der Trainingsgebiete.	68
5.7	Kanalspezifische Reflexionsmittelwerte der Trainingsgebiete.	68
5.8	Histogramme aus den Trainingsgebieten für Laub- und Mischwald.	69
5.9	Signaturmittelwerte und 1.5 σ -Ellipsen der Trainingsgebiete.	69
5.10	Werkzeug zur Reklassifikation zurückgewiesener Bildelemente.	80
5.11	Werkzeug zur Bereinigung von Mischpixelerscheinungen.	83
5.12	Organigramm der PRI-Daten Vorverarbeitung.	87
5.13	Speckle in 1-Look (ERS-SLC) und 3-Look (ERS-PRI) SAR-Bildern.	88
5.14	Speckle-Reduktion mit einem 5-5 GammaMAP-Filter.	89
5.15	Winkelbeziehungen zur Berechnung von σ^0	90
5.16	Eingabemaske der EASI-Prozedur zur Berechnung von σ^0	91
5.17	Effekt der σ^0 -Berechnung auf die Grauwertverteilung.	93
5.18	Simuliertes und reales SAR-Bild.	94
5.19	Geometrische Effekte der Terrainkorrektur.	95
5.20	ERS SAR PRI-Szene und Kohärenzbild.	97

5.21	Bearbeitungsausschnitt im nördlichen Teil des Bröleinzugsgebiets.	98
5.22	Tagesmittel, -minima und -maxima der Lufttemperatur an der Meßstation Bröl.	99
5.23	Lufttemperatur in den Zeiträumen vor ERS-Aufnahmen.	100
5.24	Bodentemperatur in den Zeiträumen vor ERS-Aufnahmen.	101
5.25	Nutzungsspezifisches, multitemporales Rückstreuverhalten.	102
5.26	Anteil erklärter Varianz der Hauptkomponenten.	104
5.27	Ladungen der Hauptkomponenten.	104
5.28	Nutzungsspezifische PC-Werte.	105
5.29	Kohärenzhistogramme.	107
5.30	Windgeschwindigkeiten zu den ERS-Überflügen.	108
5.31	Nutzungsspezifisches Kohärenzverhalten.	108
5.32	Wald-Trennung auf Grundlage von Kohärenzinformation.	109
5.33	Spektrale Trennbarkeit verschiedener Nutzungen.	112
A.1	Höhenstufen im Siegeinzugsgebiet.	125
A.2	Hangneigungen im Einzugsgebiet der Bröl.	126
A.3	Hangexpositionen im Einzugsgebiet der Bröl.	126
A.4	Zurückweisung unsicher klassifizierter Bildelemente.	127
A.5	Nachbarschaftsbasierte Reklassifikation und Mischpixeleliminierung.	128
A.6	Radiometrischer Reliefeffekt in den Intensitätsdatensätzen.	129
A.7	Nachgeordnete Hauptkomponenten.	130
A.8	ISODATA-Klassifikationsergebnisse.	131
A.9	Komplementärer Charakter von Intensitäts- und Kohärenzinformation.	132
A.10	SAR-Klassifikationsergebnisse.	133

Tabellenverzeichnis

2.1	Das LANDSAT-System	23
2.2	Der Thematic Mapper	23
2.3	ERS AMI SAR Image Mode-Parameter	24
2.4	ERS PRI-Daten	24
2.5	ERS SLC-Daten	25
4.1	Hydrologische Arbeiten im Siegeinzugsgebiet	44
4.2	Ausgewertete TM-Daten	45
4.3	Ausgewertete ERS-Daten	46
5.1	Ableitung von Ausflußrichtung und Fließakkumulation aus einem Raster-DGM	53
5.2	Allgemeine Bandstatistik der TM-Szene vom 05.08.1992	55
5.3	Kovarianzen (E) und Korrelationen (r) der TM-Kanäle	57
5.4	Reflexion in den Referenzpixeln	58
5.5	Parameter der Atmosphärenkorrektur	59
5.6	Parameter und Fehler der Georeferenzierung	61
5.7	Parameter der Topographischen Normalisierung	62
5.8	Bandstatistik nach den Vorverarbeitungsschritten	64
5.9	Kovarianzen (E) und Korrelationen (r) nach der Vorverarbeitung	64
5.10	Trainingsgebiete	66
5.11	Allgemeine Signaturstatistik	67
5.12	Allgemeine Signaturtrennung	70
5.13	Nutzungs- und kanalspezifische Signaturtrennung	71
5.14	Nutzungsspezifische Signaturtrennung über 6 Kanäle	72
5.15	Nutzungsspezifische Signaturtrennung über 4 Kanäle	73
5.16	Ergebnis der überwachten ML-Klassifikation	74
5.17	Testgebiete	76
5.18	Konfusionsmatrix der 74 Testgebiete vor der Nachbearbeitung	76
5.19	Zurückweisungsschwellen	77
5.20	Klassenverteilung nach der Zurückweisung	78
5.21	Reklassifikationsverlauf	81
5.22	Klassenverteilung nach der Reklassifikation	82

5.23 Klassenverteilung nach Abschluß der Nachbearbeitung	84
5.24 Konfusionsmatrix der 74 Testgebiete nach der Nachbearbeitung	84
5.25 Klassifikationsergebnisse in den verschiedenen Stadien der Nachbearbeitung	85
5.26 Landnutzung im Bröleinzugsgebiet: Geländeaufnahme vs. TM-Klassifikation	86
5.27 Landnutzung in den Teileinzugsgebieten	87
5.28 Einfluß der σ^0 -Berechnung auf die Grauwertstatistik	92
5.29 Landnutzung im Bearbeitungsausschnitt aus der TM-Klassifikation	97
5.30 Rückstreuintensitäten im Bearbeitungsausschnitt	98
5.31 Korrelationen (r) der Rückstreuintensitätsdatensätze	99
5.32 Standardabweichungen der nutzungsspezifischen Signaturen in den ERS PRI-Datensätzen .	103
5.33 Standardabweichungen der nutzungsspezifischen Signaturen in den Hauptkomponenten . .	106
5.34 Kohärenzen im Bearbeitungsausschnitt	106
5.35 Korrelationen (r) der Kohärenzinformationen	107
5.36 Korrelation (r) von Intensitäts- (I) und Kohärenzkanälen (K)	110
5.37 Trainings- und Testgebiete im Ausschnitt Bröl	110
5.38 Signaturtrennung in den Hauptkomponenten 2, 3 und 4	111
5.39 Signaturtrennung bei Berücksichtigung der Hauptkomponenten 2, 3 und 4	111
5.40 Signaturtrennung in den Hauptkomponenten 2, 3 und 4 bei vereinigter <i>wald/bbng</i> -Signatur	112
5.41 Gesamt-Signaturtrennung bei vereinigter <i>wald/bbng</i> -Signatur	113
5.42 Konfusionsmatrix für das PCA-Klassifikationsergebnis	113
5.43 Zurückweisungsschwellen für das PCA-Klassifikationsergebnis	114
5.44 Verarbeitungsspezifische Landnutzungsverteilungen im Ausschnitt Bröl	114
5.45 Konfusionsmatrix für das Klassifikationsergebnis nach GIS-Bearbeitungen	115

Kapitel 1

Einführung und Problemstellung

Die Verwendung von Daten flugzeug- und satellitengetragener Fernerkundungssysteme bietet ein breites Forschungs- und Anwendungsspektrum innerhalb der hydrologischen Prozeßforschung. Insbesondere distributive, physikalisch basierte Modellierungsverfahren sind auf räumlich verteilte Information verschiedenster Eingabeparameter angewiesen. Je nach Größe der Untersuchungsgebiete kommt bei der Gewinnung dieser Information fernerkundungsgestützten Verfahren unterschiedliche Bedeutung zu (MAUSER et al. 1998[203]).

Traditionell erfolgt die Aufnahme erforderlicher physikalischer Parameter durch Punktmeßnetze, Kartierungen und Geländearbeiten. Insbesondere in kleinräumig gekammerten Landschaften und bei der Bestimmung räumlich hochvariabler Parameter kommt dabei der Dichte der Meßnetze entscheidende Bedeutung zu, um aus Punktdaten eine dem Skalenbereich der Fragestellung angemessene Interpolation in die Fläche zu gewährleisten.

Können in mikroskaligen Gebieten zahlreiche Parameter mit den beschriebenen Methoden angemessen erfaßt werden, so stoßen diese Verfahren bereits im Bereich mesoskaliger Anwendungen häufig an eine, im wesentlichen durch wirtschaftliche Überlegungen gesetzte, Grenze.

Der hier entstehende Widerspruch zwischen vertretbarem Kostenaufwand und inhaltlich angemessener Zahl von Stützstellen im Gelände kann, unter bestimmten Bedingungen, durch die Verwendung von Fernerkundungsdaten und -verfahren aufgelöst werden. Je nach Sensor liefern diese Systeme flächenhafte Informationen für unterschiedliche Fragestellungen und Skalenbereiche (vgl. Kapitel 2.2). Da es sich naturgemäß um indirekte Messung über die Reflexions-, bzw. Emissionscharakteristika der Oberflächenmaterialien handelt, müssen die erforderlichen hydrologischen Eingabeparameter aus diesen abgeleitet werden.

Der angewandten Methodik kommt insofern entscheidende Bedeutung zu, sie bestimmt die Güte des zu extrahierenden Parameters. Während bei der traditionellen Punktmessung im Gelände die Flächeninterpolation eine, das Ergebnis distributiver, hydrologischer Modellierungsverfahren wesentlich beeinflussende, Schlüsselrolle spielt, verschiebt sich die Problematik bei der Nutzung von Fernerkundungsdaten auf eine angemessene Überführung gemessener Reflexions-, bzw. Emissionswerte in die benötigten physikalischen Eingangsparameter. Hier kommt den Geländemessungen als Referenzierungs- und Eichgrundlage entscheidende Bedeutung zu. Insofern kann die Nutzung von Fernerkundungsdaten die Geländearbeit nicht ersetzen, jedoch in ihrem Umfang einschränken und neues Potential für eine regionalisierende Interpretation und Parameterisierung erschließen.

Übergeordnetes Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, in diesem Forschungskomplex einen Beitrag zum Verständnis des hydrologischen Anwendungspotentials von Fernerkundungsdaten zu erarbeiten (vgl. Kapitel 3). Den inhaltlichen Schwerpunkt bildet hierbei die Erfassung der Landnutzung, bzw. Landbedeckung¹.

¹Der Doppelbegriff folgt der in der Fachliteratur häufig anzutreffenden systematischen Trennung von *land use* und *land cover*. Nach LILLESAND & KIEFER (1994[185]) spricht die Landnutzung (*land use*) wirtschaftliche Funktionen, bzw. menschliche Aktivitäten an, die mit den betreffenden Flächen verbunden sind. Erweiternd beschreibt die Landbedeckung (*land cover*) die aktuelle Ausstattung der Erdoberfläche ohne Berücksichtigung von Funktion oder Genese. Im weiteren Verlauf der Arbeit benutze ich den im deutschsprachigen Raum gebräuchlicheren Begriff Landnutzung, der auch inhaltlich angemessener erscheint, da in den Untersuchungsgebieten jede Fläche einer anthropogenen Nutzung, bzw. Funktion zuzuordnen ist.

Die Landnutzung stellt einen wesentlichen Eingabeparameter für die distributive Flußeinzugsgebietsmodellierung dar, indem sie beispielsweise hydrologische Kernparameter, wie Evapotranspiration und Interzeption, entscheidend beeinflusst (FLÜGEL 1996[98]). Ihre Erfassung ist darüber hinaus auch in vielen anderen geowissenschaftlichen Fragestellungen von Bedeutung. Dementsprechend haben Landnutzungsklassifikationen auf Grundlage von Fernerkundungsdaten, seit Anfang der 70er Jahre mit dem Landsat MSS² die ersten systematisch aufgenommenen Satellitendaten verfügbar wurden, einen hohen Stellenwert sowohl in der Forschung, als auch in der anwendungsbezogenen Praxis.

Methodisch befaßt sich die vorliegende Studie mit der Datenauswertung unterschiedlicher Fernerkundungssensoren (Landsat TM, ERS SAR), sowie vorhandener Zusatzinformation (Digitale Geländemodelle, Klimadaten, Bodendaten, hydrologische Daten). Unter Verwendung unterschiedlicher methodischer Ansätze (Reflexionsintensitätsanalysen, interferometrische Kohärenzanalysen) soll aus der integrativen Interpretation ein im Hinblick auf die Fragestellung optimaler Synergieeffekt erzielt werden.

Den regionalen Schwerpunkt der Arbeit bildet das Einzugsgebiet der Sieg, im zentralen, osthheinischen Teil des Rheinischen Schiefergebirges.

Als Informationsträger, Analyseinstrument und Dokumentationsmedium finden die Geographischen Informationssysteme, bzw. Digitalen Bildverarbeitungsprogramme Erdas/Imagine, Arc/Info, PCI Easi/Pace und Envi/IDL Verwendung.

²MSS: *Multispectral Scanner*. Instrument an Bord des 1972 gestarteten LANDSAT 1 und seinen Nachfolgern.

Kapitel 2

Stand der Forschung

Im folgenden werden inhaltlicher Rahmen und Hintergrund der Arbeit zusammenfassend vorgestellt. Ausgehend von dem, für diese Arbeit maßgeblichen, räumlichen Diskretisierungsansatz der *Hydrological Response Units* (HRUs), werden Möglichkeiten und Grenzen der Parametererfassung aus Fernerkundungsdaten beschrieben. Gemäß des Schwerpunkts der Arbeit, wird in der Literaturdiskussion besonderer Wert auf den Beitrag der Fernerkundung zur Erfassung hydrologisch relevanter Parameter gelegt. Die historische Entwicklung und Relevanz der verschiedenen Modellansätze wird lediglich im Überblick dargestellt. Im Anschluß an die Literaturdiskussion wird auf bestehende Forschungsdefizite hingewiesen, aus denen sich die, in Kapitel 3 beschriebenen, Arbeitsziele ableiten. Den Abschluß des Kapitels bildet ein Abschnitt, in dem für diese Arbeit maßgebliche Grundlageninformationen gegeben werden. Ausgehend von der Beschreibung der genutzten Sensoren und Datenprodukte, werden Arbeitsweise und Charakteristika der SAR-Verfahren vorgestellt sowie einige, im Zusammenhang mit den Klassifikationen stehende, Begrifflichkeiten geklärt.

2.1 Regionale hydrologische Modellierung

Die Beurteilung der Verfügbarkeit, Qualität und zukünftigen Entwicklung der Süßwasserreserven der Erde, sowie ihr Schutz, ist eines der Hauptaufgabenfelder der angewandten hydrologischen Forschung. Sowohl im regionalen, als auch im globalen Maßstab bestehen in diesem Zusammenhang derzeit vielfältige Probleme. Beispielhaft seien Schadstoffbelastungen aus Landwirtschaft und anderen anthropogenen Nutzungen, großflächige Nutzungsänderungen, wie Abholzung und Versiegelung, sowie Schadstoffeinträge aus der Atmosphäre genannt.

Um ein erfolgreiches, d.h. qualitäts- und quantitätssicherndes, Management der Süßwasserreserven zu gewährleisten, müssen die Ressourcen erfaßt und die steuernden Prozesse verstanden werden. So vielfältig sich diese Prozesse und die Skalenbereiche hydrologischer Relevanz darstellen, so vielfältig sind auch die Versuche diese in Computersimulationen abzubilden, um Prognosen zu treffen und erweitertes Verständnis der interaktiven Transferprozesse zu erlangen. Modelle können auf diesem Gebiet wertvolle Hinweise liefern, ihre Entwicklung und Anwendung hat daher in der hydrologischen Forschung und wasserbaulichen Praxis eine lange, umfassend dokumentierte, Tradition. Arbeiten von HORTON (1945[142]), PENMAN (1948[232]), PHILIPS (1954[236]), RICHARDS et al. (1956[245]), NASH (1957[219]), CRAWFORD et al. (1966[54]), KIRKBY (1978[156]), MAIDMENT (1991[191]), REICHE (1995[241]) FLÜGEL (1996[98]) und GEROLD et al. (1997[118]) können an dieser Stelle, stellvertretend für die große Anzahl an Publikationen, aufgeführt werden.

Ausgehend von frühen, auf statistischen Einzugsgebietsmittelwerten basierenden, *black box*-Modellen, wurden in neuerer Zeit zahlreiche, zunehmend physikalisch basierte und distributive, Modellansätze für verschiedenste hydrologische Anwendungen entwickelt (FLÜGEL et al. 1993[101], LEAVESLY et al. 1996[179]). Das wachsende Verständnis der hydrologischen Prozeßabläufe, sowie die sich rasch entwickelnde Rechentechnik wirkten in diesem Zusammenhang fördernd.

Als klassisches Beispiel kann die Berechnung, bzw. Simulation von Abflüssen aus Niederschlagsdaten dienen. Zu diesem Zweck wurden zunächst einfache Eingabe-Ausgabe-Modelle entwickelt, die als Mittelwertmo-

delle (*Lumped Models*) die heterogene Verteilung wichtiger hydrologischer Einzugsgebietsgrößen (Landnutzung, Böden, Topographie, Niederschlagsverteilung) nur unzureichend abbilden, bzw. berücksichtigen können. Um Simulationsergebnisse zu verbessern, sowie das konzeptionelle Systemverständnis zu erhöhen, ist einerseits eine angemessene mathematische Formulierung der relevanten Transport- und Umwandlungsprozeßdynamiken notwendig, zum anderen muß die Heterogenität der Flächenbeschaffenheit in die Modelle integriert werden. Zahlreiche vergleichende Studien belegen, daß distributive Modellansätze den klassischen Lumped-Modellen in vielen Fragestellungen überlegen sind (vgl. z.B. CYFFKA et al. 1991[56], KITE et al. 1992[157] und FLÜGEL et al. 1993[101]).

Die Auswahl eines Modells erfolgt in erster Linie auf Grundlage der Fragestellung –„Was soll modelliert werden?“–, muß aber auch den Skalenbereich des Einzugsgebiets und die Verfügbarkeit der notwendigen Eingabeparameter berücksichtigen. Insofern können auch Regressions- oder Lumped-Modelle sinnvoll Anwendung finden, z.B. wenn die, für ein distributives, stärker physikalisch basiertes Modell erforderlichen, Eingabedaten nicht vorhanden sind und daher geschätzt werden müßten (KITE et al. 1992[157]).

2.1.1 Räumliche Diskretisierung und Geographische Informationssysteme

Einen starken Impuls erhielten die distributiven Ansätze durch die sich entwickelnde GIS-Technologie (STUEBE 1990[275], MAIDMENT 1991[191], FLÜGEL 1995[97], BENDE 1997[26]). Zwar sind Geographische Informationssysteme (GI-Systeme) kein adäquates Modellierungsinstrument, u.a. da sie, wie MEIJERINK et al. (1994[205]) feststellen, keine explizite Repräsentation der Zeitkomponente enthalten. Dennoch sind sie für Parameterisierung und Kalibrierung von Modellen ein unentbehrliches Werkzeug geworden, da sie die Aggregation, Verschneidung und Verdichtung notwendiger Eingangsparameter bei Erhalt des Raumbezugs ermöglichen, und so eine Grundvoraussetzung distributiver Modellierungsverfahren schaffen.

Die Anwendung eines distributiven, hydrologischen Modells erfordert einen systemanalytischen Ansatz, dessen Kern die Art der räumlichen Diskretisierung bildet. Die angemessene Übertragung der dreidimensionalen, physiographischen Heterogenität des Untersuchungsgebiets in das anzuwendende Modell, beeinflusst die Qualität und Repräsentativität der Modellierungsergebnisse entscheidend (FLÜGEL 1996[98]).

Der Versuch, heterogene Einzugsgebiete, im Hinblick auf eine verbesserte Modellierung, räumlich in Flächen zu untergliedern, die bezüglich bestimmter Ausprägungen homogenen Charakter besitzen, reicht bis in die 60er Jahre zurück. HILLS (1961[138]) und HOPKINS (1977[141]) weisen hierzu *natural units* aus. BLÖSCHL et al. (1995[32]) leiten *representative elementary areas* (REAs) ab, um die Abflußbildung eines Einzugsgebiets zu simulieren. MEIJERINK (1997[204]) weist, u.a. auf Grundlage von Fernerkundungsdaten, *terrain mapping units* aus, die wiederum in die Ableitung seiner räumlichen Modellentitäten einfließen, die er als *hydrotopes* bezeichnet. Diese werden genutzt um Interaktionen im Bereich Oberfläche-Grundwasser zu modellieren. Weitere methodische Beiträge, zur Ausweisung hydrologisch ähnlich reagierender Landschaftseinheiten als räumlich verteilte Modellierungsentitäten, lieferten BERAN et al. (1990[27]), BECKER (1992[19]), PLATE (1992[237]), FLÜGEL (1996[98]) und LEAVESLEY et al. (1996[179]). Die „Flächen gleicher hydrologischer Systemantwort“ werden inzwischen von vielen Autoren als *Hydrological Response Units* (HRUs) angesprochen (ENGEL 1993[86], FLÜGEL 1996[98], LEAVESLEY et al. 1996[179]). Bevor auf das, den HRUs zugrundeliegende Konzept eingegangen wird, sollen zunächst die wesentlichen distributiven Modellentwicklungen im Überblick vorgestellt werden.

Zu den ersten Modellen, die der Heterogenität der Einzugsgebiete, bezüglich Infiltration, Evapotranspiration, Niederschlag u.ä., Rechnung tragen, gehören TOPMODEL (BEVEN et al. 1979[30], BEVEN et al. 1985[28]), SHE-model (ABBOTT et al. 1986[1][2]) und mit Einschränkungen das IHDM (Institute of Hydrology Distributed Model, BEVEN et al. 1987[29]). Im wesentlichen basieren diese Modelle auf numerischen Lösungen partieller Differentialgleichungen, mit deren Hilfe die Transport- und Flußprozesse beschrieben werden. Methodische Grundlage bilden Finite Elemente, bzw. Finite Differenzen Ansätze (BONGARTZ 1996[34]). Auf Grundlage des HRU-Ansatzes wurden FESHM (ENGEL 1993[86]) und MMS/PRMS (LEAVESLEY et al. 1983[178], LEAVESLEY 1996[179]) entwickelt.

Derzeit wird, auf Grundlage von Modellsystemen wie MMS/PRMS und TOPMODEL, ein objektorientiertes Modellierungssystem (OMS) entwickelt (DAVID 1997[62]). Diese Arbeit trägt dem Umstand Rechnung, daß sich die Verfügbarkeit von Rechnerleistung und Modellen in den letzten Jahren stark verbessert hat und somit heute ein großer Anwenderkreis auf diese zurückgreifen kann. Demgegenüber sind die existierenden

Modelle häufig monolithisch und durch zahlreiche Erweiterungen unsystematisch strukturiert und somit ihre Arbeitsweise schwer nachvollziehbar. Desweiteren sind diese Systeme in der Regel auf bestimmte Rechner-Architekturen zugeschnitten, was Anwendung und Datentransfers erheblich erschwert.

Mit dem OMS sollen derartige Schwierigkeiten überwunden werden, indem ein architekturunabhängiges, modular strukturiertes, flexibles Toolset aufgebaut wird, welches auch dem Nicht-Programmierer erlaubt, auf eine Vielzahl von Routinen zurückzugreifen und sich so ein, an seine Fragestellung optimal angepaßtes, Modellsystem aufzubauen. Die hydrologischen Routinen werden in einer Bibliothek zusammengefaßt, welche auch die Fortran- und C-Bausteine bestehender Modelle weitergeben kann, sämtliche Kompilier- und Verknüpfungsschritte basieren auf der JAVA-Architektur und sind somit weitgehend plattformunabhängig (DAVID 1997[59] [60]).

Neben dem methodischen Fortschritt, spielen bei dem Übergang zu objekt-orientierten Systemen inhaltliche Überlegungen eine Rolle, man glaubt, Entitäten der physischen Umwelt (Boden, Vegetationstyp, etc.) und deren zeitliche Veränderung und Interaktion, in objektorientierten Strukturen angemessener darstellen zu können und somit zu verbesserten Ergebnissen in der Modellierung zu gelangen (DAVID 1997[61]).

Einen explizit auf die Nutzung von Fernerkundungsdaten ausgerichteten Modellpool beschreiben MAUSER et al. (1997[202]). Die von der Arbeitsgruppe aufgebaute PROMET-Modellfamilie (*Process Oriented Multiscale Evapotranspiration*) integriert für Parameterisierung und Validierung Daten von ERS, LANDSAT, NOAA-AVHRR und METEOSAT. Um die aktuelle Evapotranspiration abzuschätzen, werden

- Parameter der Landnutzung und Nutzungsänderung (Leaf Area Index, Pflanzhöhe, Albedo),
- Bodenphysikalische Parameter und Variabilitäten (Bodenfeuchte) und
- Meteorologische Daten (Strahlung, Temperatur, Wind, Luftfeuchte)

aus Fernerkundungsdaten unterschiedlicher Wellenlängen- und Skalenbereiche abgeleitet. Eine räumliche Diskretisierung im Sinne von HRUs findet hierbei nicht statt, es wird rasterzellenbasiert modelliert.

2.1.2 Das Konzept der Response Units (RUs)

Distributive Modellansätze unterteilen das Flußeinzugsgebiet in verschiedene Teilräume, die getrennt voneinander modelliert und anschließend verknüpft werden, so daß ein integraler Gesamtgebietsaustrag entsteht. Hinsichtlich der räumlichen Diskretisierung lassen sich drei Ansätze unterscheiden:

- Auf Rasterzellen basierende Ansätze (z.B. ABBOTT et al. 1986[1][2], MAUSER et al. 1997[202]),
- Auf digitaler Reliefanalyse basierende Ansätze (vgl. hierzu TRIBE 1992[282], GEROLD et al. 1997[118]) und
- Auf Response Units basierende Ansätze (z.B. bei FLÜGEL 1996[98]).

Letztere gehen davon aus, daß die physiographische Heterogenität von Einzugsgebieten sich in raster- und höhenmodellbasierten Ansätzen nicht angemessen repräsentieren läßt, wenn auf, aus Fernerkundungsdaten oder Rasterhöhenmodellen einer bestimmten geometrischen Auflösung abgeleitete, Zellen Einzugsgebietsdurchschnittswerte der physikalischen Eingabeparameter verteilt werden und diese Pixel als räumliche Modellentitäten Verwendung finden. Demgegenüber entwickelt FLÜGEL (1996[98]) ein Diskretisierungssystem, daß auf, im Hinblick auf ihre hydrologische Dynamik, homogenen Flächen (HRUs) beruht. Diese werden durch Verschneidung mittels GIS-Operationen abgeleitet und beinhalten sämtliche, die hydrologische Dynamik wesentlich beeinflussende, Parameter, wie Vegetation/Nutzung, Boden, Geologie, Topographie (Neigung, Exposition) und klimatische Charakteristik der Teilflächen. Man erhält durch dieses Vorgehen ein, gegenüber den rasterbasierten Ansätzen, kompakteres Einzugsgebietsmodell, welches sich wesentlich einfacher parameterisieren läßt. FLÜGEL (1996[98], S.47) definiert die HRUs wie folgt:

„ Hydrological Response Units are distributed, heterogeneously structured entities having a common climate, land use and underlying pedo-topo-geological associations controlling their hydrological transport dynamics. “

Bei der Anwendung des Konzepts im Einzugsgebiet der Bröl (216 km²), Nordrhein-Westfalen, wurden 23 verschiedene HRU-Klassen ausgewiesen, die sich auf mehr als Eintausend Einzelflächen verteilen (FLÜGEL 1996). Zur Niederschlags-Abflußsimulation wurde MMS/PRMS (LEAVESLEY et al. 1983[178]) genutzt. Die Resultate wurden mit Modellierungsergebnissen anderer Systeme (NASIM und HSPF, vgl. MÜLDERS 1992[214], DAAMEN 1993[57]) verglichen, welche auf Grundlage identischer Eingangsdaten (Testgebiet, zwanzigjährige hydrometeorologische Datenbank in Tagesschrittauflösung, GIS-Datenbank, Evapotranspirationsbestimmung nach Penman-Monteith, ALLEN 1992[7]) durchgeführt wurden.

Das NASIM-Modell modellierte dabei auf Basis verteilter Teileinzugsgebiete, HSPF benutzte Flächeneinheiten, die sich entlang von Flußabschnitten hydrologisch homogenen Verhaltens orientieren. Es stellte sich heraus, daß die Modellierung auf Grundlage der HRUs bei geringerem Rechenaufwand signifikant verbesserte, realistischere Ganglinienanpassungen lieferte. Darüber hinaus bewies der Ansatz seine konzeptionelle Eignung zu zeitlichen und räumlichen Skalentransfers. Restriktionen gehen in diesem Zusammenhang lediglich von der zeitlichen Auflösung der hydro-meteorologischen Datenbank und der räumlichen Auflösung der GIS-Information (z.B. des Höhenmodells) aus. Die konzeptionelle Eignung zu, und Flexibilität bei, informationsverlustfreien Skalentransfers ist für hydrologische Modellansätze, wegen der in der Regel sehr unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Auflösung der Eingangsdaten, von besonderer Bedeutung.

Probleme bestehen bei der abflußwirksamen Vernetzung und Einordnung der HRUs in die topographisch-hydrologische Sequenz des Einzugsgebiets, da die Flächen nicht mehr ausschließlich mit dem Relief in Verbindung stehen. Insofern ist ein detailliertes Routing der Wasser- und Stoffflüsse durch das Gebiet nicht ohne erweiternde Annahmen über die Austauschdynamik der Flächen untereinander möglich. Spielt dieser Umstand bei der Betrachtung groß- bis mittelmaßstäbiger Gebiete und einer relativ groben zeitlichen Auflösung (Tagesschritte), wie STAUDENRAUSCH (1997[270]) feststellt, nur eine untergeordnete Rolle, so gewinnt er an Gewicht, wenn meso- bis makroskalige Gebiete betrachtet werden, oder Einzelereignisse in hoher zeitlicher Auflösung modelliert werden sollen. Die Entwicklung von Netzwerktopologien zur hierarchischen Verknüpfung der Teilflächen auf Grundlage von Höheninformation befindet sich derzeit im Forschungsstadium (STAUDENRAUSCH 1997[270], REICHE 1995[241]).

2.2 Fernerkundung in der Flußeinzugsgebietsmodellierung

Wie bereits einleitend erwähnt, bieten, neben geländebasierten Verfahren, auch Fernerkundungsmethoden die Möglichkeit einer aktuellen und flächenhaften Gewinnung von Eingangsparametern für die distributive, hydrologische Modellierung (MAUSER et al. 1997[201]). Der hydrologisch orientierten Fernerkundung steht hierfür ein breites Band an Wellenlängenbereichen des elektromagnetischen Spektrums zur Verfügung. Es umfaßt, abgesehen von einigen atmosphärischen Absorptionsbanden, sechs Zehnerpotenzen vom Mikrowellenbereich ($\lambda \approx 0.5$ m) bis hin zum sichtbaren Licht ($\lambda \approx 0.4 \mu\text{m}$). Daten einer Vielzahl satellitengetragener Sensoren unterschiedlicher spektraler, radiometrischer, geometrischer und repetitiver Auflösung sind inzwischen operationell verfügbar.

Im hydrologischen Anwendungsfeld haben die geometrisch hochauflösenden, multifrequenten, optischen¹ Instrumente (z.B. auf LANDSAT, SPOT, IRS), sowie die hochauflösenden, aktiven Mikrowellensensoren (z.B. an Bord von ERS, JERS, RADARSAT) besondere Aufmerksamkeit erhalten. Für meteorologische und klimatologische Fragestellungen, z.B. die Modellierung und Quantifizierung von Niederschlagsereignissen, finden häufig räumlich grob, aber repetitiv/zeitlich hoch auflösende Daten von METEOSAT und NOAA Verwendung.

Im Hinblick auf eine Anwendung in der regionalen, hydrologischen Flußeinzugsgebietsmodellierung, lassen sich für die Verwendung von Satellitendaten folgende Vorteile nennen:

- Flächenhafte Erfassung der Landoberfläche in z.T. hoher geometrischer Auflösung (z.B. IRS PAN),
- Durch z.T. hohe spektrale Auflösung und Infrarotkanäle (z.B. Landsat TM, SPOT HRV) gute Eignung für Vegetationsanalysen,

¹Unter *optisch* wird, in diesem Zusammenhang und im weiteren Verlauf der Arbeit, der Bereich des sichtbaren Lichts und des nahen und mittleren Infrarots verstanden. Der VIS/IR-Bereich (visible/infrared) beinhaltet zusätzlich das thermale Infrarot).

- Erfassung großer Gebiete zu einem Zeitschnitt (durch Kartierungen nicht zu erreichen) und im Falle von z.B. Landnutzungserfassungen eingeschränkte Subjektivität durch geringere Anzahl von Bearbeitern,
- „Blick von oben“, der aus dem Gelände selten möglich und vor allem bei der Einschätzung von unterschiedlichen Forststandorten und unübersichtlichen Grünlandbereichen von Bedeutung ist,
- Rasterbildverarbeitung erlaubt den Import und die Weiterverarbeitung im GIS,
- Im Vergleich zu Kartierungen hohe Wirtschaftlichkeit bei der flächendeckenden Erfassung von Modellparametern.

Als Nachteile optischer Fernerkundungssysteme lassen sich benennen:

- Von Bewölkung abgedeckte Flächen können nicht analysiert werden,
- In Dunst- und Wolkenschattengebieten ist die Informationsextraktion häufig problematisch,
- Aufnahmen bei niedrigem Sonnenstand und in ausgeprägtem Relief sind wegen starker Schattenbereiche schwer interpretierbar (z.B. Landsat TM im Winter in Mitteleuropa),
- Durch die Reflexion von Wellen im Bereich des sichtbaren und infraroten Spektrums kann nur mittelbar auf Objekteigenschaften wie Bodenfeuchte, Schneedichte und Bodenfrost geschlossen werden,
- Noch relativ hoher finanzieller Beschaffungsaufwand.

Der wesentliche Nachteil optischer Satellitendaten liegt in ihrer bewölkungsabhängigen, eingeschränkten Verfügbarkeit. So ist es in wolkenreichen Regionen wie Mitteleuropa häufig schwierig, mehrere wolkenfreie Szenen pro Jahr zu bekommen, insbesondere wenn große Untersuchungsgebiete auszuwerten sind. Multitemporale Analysen aus einer Vegetationsperiode beschränken sich deswegen in der Regel auf kleinräumige Untersuchungsgebiete oder meteorologische Ausnahmesituationen.

Mikrowellendaten hingegen sind unabhängig von Bewölkung und Beleuchtung und im Falle der ERS-1, bzw. ERS-2-Daten, bei vergleichbaren geometrischen Auflösungen, auch preiswerter als die optischen Satellitenszenen von SPOT, Landsat TM oder IRS 1C. Bei ihrer Analyse und anwendungsorientierten Interpretation besteht allerdings weiterhin Forschungsbedarf (vgl. Kapitel 2.3).

Im folgenden wird der aktuelle Stand der Forschung in hydrologisch relevanten Themenbereichen der Fernerkundungsdatenauswertung diskutiert. Der großen Anzahl unterschiedlicher Fragestellungen, Sensoren und Methodiken Rechnung tragend, beschränkt sich die Darstellung inhaltlich im wesentlichen auf Hauptanwendungsgebiete und die Nutzung operationeller, satellitengetragener Sensoren. Einen umfassenderen Überblick über satelliten- und flugzeuggetragene Sensoren bietet z.B. RICHARDS (1994[244]). Abschließend wird zusammenfassend auf die existierenden Methoden rechnergestützter Klassifikation Bezug genommen. Einen Überblick über hydrologische Anwendungen der Fernerkundung liefern ENGMAN & GURNEY (1991[89]), FELLAH et al. (1997[93]) sowie BAUMGARTNER et al. (1997[16]).

2.2.1 Landnutzung

Die Landnutzungserfassung kann als klassisches Beispiel der Anwendung von Satellitenfernerkundung gelten. Die hydrologische Relevanz der Landnutzung unterstreicht FLÜGEL (1996[98]). Mit Daten hochauflösender, optischer Sensoren lassen sich, in überwachten Klassifikationsverfahren, mit hinreichender Referenzinformation, detaillierte Nutzungsmuster ableiten. In der Regel wird pixelweise auf Grundlage der Reflexionswerte über verschiedene Kanäle klassifiziert (KNICK et al. 1997[161], KLENKE 1997[159]). Stehen Daten verschiedener Aufnahmezeitpunkte zur Verfügung, so können multitemporale Verfahren zur Anwendung kommen. Die Nutzung von Radardaten setzt multitemporale Datensätze voraus, um zu verwertbaren Ergebnissen zu kommen (DOBSON et al. 1995[67]). Neben den pixelbasierten Reflexionsanalysen kommen gelegentlich auch texturanalytische Verfahren zur Anwendung (MIRANDA et al. 1996[210]).

Zur Untersuchung landwirtschaftlicher Nutzflächen fanden Daten von LANDSAT und SPOT bei ODENWELLER & JOHNSON (1984[222]), TOWNSHEND (1984[281]), DEANE & CHURCHILL (1985[66]),

ZUTTERMEISTER (1985[312]), BELWARD & TAYLOR (1986[22]), QUIEL (1986[239]), MAUSER (1987[200]), STIBIG (1988[273]), FULLER & PARSELL (1990[109]), FULLER et al. (1994[108]) und BARBOSA et al. (1996[12]) erfolgreich Verwendung. SAR-Daten von ERS und JERS werteten, im Hinblick auf Agrarflächenbestand und -entwicklung, BROWN et al. (1993[38]), WOODING et al. (1993[302]), SCHOTTEN et al. (1995[259]), WOODING et al. (1995[301]), XU et al. (1996[304]), AUQUIERE et al. (1997[9]), LEMOINE et al. (1997[183]) und VYAS et al. (1997[290]) aus.

Zusammenfassend kann man in diesem Themenzusammenhang feststellen, daß die Klassifizierung optischer Satellitendaten, insbesondere wenn Information aus dem nahen Infrarot vorhanden ist, detaillierte Ergebnisse liefert: Bei multitemporalen Datensätzen und entsprechender Geländeinformation sind die Signaturen nahezu sämtlicher Feldfruchtarten hinreichend trennbar.

Hinsichtlich der Klassifikationsmethodik fanden in der Mehrzahl der Anwendungsfälle überwachte Maximum Likelihood-Klassifikationen statt, die Aufarbeitung kann als operationell bezeichnet werden. Bei der Auswertung von SAR-Rückstreuintensitätsdaten wurden vergleichbar gute Ergebnisse erzielt, wenn Datensätze in ausreichender Zahl und in günstigen Zeitschritten vorhanden waren und wenig reliefierte Gebiete, wie dies bei Ackernutzung häufig der Fall ist, ausgewertet wurden. Probleme bestehen bei der, in stärker undulierten Gebieten notwendigen, Korrektur des Reliefeinflusses vor der eigentlichen Klassifikation. Methodisch finden auch bei der Auswertung von SAR-Daten zumeist Maximum Likelihood-Klassifikatoren Anwendung, wenngleich diese, aus verschiedenen Gründen, nicht optimal an die statistische Charakteristik von SAR-Daten anzupassen sind (vgl. Kap. 2.4.2). Ein weiteres Problem stellen *near range-far range* Effekte (vgl. Kap. 2.4.2) dar, die nach Untersuchungen von AUQUIERE et al. (1997[9]) die Rückstreuintensität von Getreidefeldern um bis zu 3dB variieren lassen. Generell gestaltet sich die Auswertung von Daten aus dem Mikrowellenbereich, wegen der Einflüsse von Rauigkeit, Feuchtigkeit und Geometrie auf die Rückstreuintensität, methodisch aufwendiger als die Analyse optischer Daten.

Forstwirtschaftliche Auswertungen optischer Satellitendaten haben inzwischen operationellen Status erreicht. Studien von ENDLICHER & KIRCHHOF (1990[84]), DANSON & PLUMMER (1995[58]) und LAMBERT et al. (1995[167]) bieten einen Querschnitt forstlicher Anwendungen, der von der Artenerfassung, über Schadensbewertung, bis hin zu Blattflächenabschätzungen reicht. SAR-Daten wurden ebenfalls im Hinblick auf Artenzusammensetzungen, Biomasse, Vitalität und Bestandsstruktur ausgewertet (z.B. bei WANG et al. 1995[293], DE CAUWER & DE WULF 1997[63], WANG & DONG 1997[294]), SAATCHI & RIGNOT 1997[253]). Hier bestehen weiterhin Probleme, die u.a. mit den Bestandsgeometrien und den benutzten Wellenlängen und Polarisationen in Zusammenhang stehen.

Ergebnisverbessernd wirkt in einer Vielzahl von Fragestellungen die Nutzung unterschiedlicher Wellenlängen, beispielsweise des ERS-C-Bands und des JERS-L-Bands, wie Studien von LE TOAN et al. (1997[177]), DE GRANDI (1997[64]) und ROSENQVIST (1997[251]) belegen. Auswertungen multifrequenter und multipolarisierter Flugzeugscannerdaten und der SIR-C/X-SAR Shuttle-Kampagnen lassen inhaltlichen Fortschritt erwarten (SCHMULLIUS 1997[258], PAOLO et al. 1997[230]), wenn ähnliche Systeme operationell auf satellitengetragenen Plattformen vorhanden sind (z.B. ENVISAT).

Neue und interessante Anwendungsperspektiven ergaben sich mit der Möglichkeit interferometrischer Auswertungen von ERS-Daten, speziell während der ERS-1/2 Tandem Mission (DUCHOSSOIS 1995[76]). Aufgrund des typischen Kohärenzverhaltens von Wäldern (KLENKE 1998[160]) ergeben sich für forstliche Fragestellungen operationelle Anwendungsperspektiven (WEGMÜLLER et al. 1995[297], FLOURY et al. 1996[96], ENGDahl & HYYPPÄ 1997[85]).

Die Analyse von Siedlungsbereichen stellt ein weiteres Anwendungsfeld hydrologisch orientierter Fernerkundung dar. Neben der flächenhaften Erfassung von Überbauungsbereichen und Aussagen hinsichtlich deren Struktur, spielen Siedlungen eine Rolle als Klimafaktor und Schadstoffemittent (Aerosole, Abwässer, Wärme, etc.), sowie für die Erzeugung von Oberflächenabfluß. Daten satellitengetragener, optischer Sensoren, mit Pixelauflösungen zwischen 5 m und 30 m, können zur Abschätzung des Grobversiegelungsgrads herangezogen werden. Dieser kann beispielsweise in kleinmaßstäbigen Modellierungen des Regenwasserabflusses Verwendung finden. BAYER & HILZ (1997[18]) präsentieren eine Studie, in der aus Landsat TM-Daten im Raum Graz vier Versiegelungsklassen abgeleitet werden. Eine musterflächenbasierte Bestimmung der mittleren Genauigkeit ergab ca. 75% und war damit als Grundlage einer kleinmaßstäbigen, stadtteilbasierten Regenwasserabflußmengenabschätzung geeignet. Feinversiegelungsbestimmungen wurden auf Grundlage einer DAEDALUS Scannerbefliegung mit einer Auflösung von 2.5 m durchgeführt.

Ein reflexionsintensitätsbasiertes mathematisches Verfahren zur Bestimmung der Überbauungsdichte auf

Grundlage von SPOT-Daten (PAN und HRV) stellt SPITZER (1997[268]) vor. KARATHANASSI et al. (1998[150]) nutzen hierzu texturanalytische Methoden und stellen die Ergebnisse unterschiedlicher Verfahren gegenüber.

SAR-Aufnahmen städtischer Bereiche zeichnen sich durch eine spezifische Textur aus, die im wesentlichen von starken Punktstreuern bestimmt ist. Zur Abgrenzung von Siedlungsflächen sind daher textur- und *multiresolution*-basierte Ansätze besonders geeignet (RAPTIS et al. 1998[240]). Bislang sind keine operationellen Verfahren zur Ableitung von Überbauungsdichten aus SAR-Daten verfügbar. DONG et al. (1997[69]) entwickeln, auf der Grundlage von multifrequenten und multipolarisierten JPL AirSAR-Daten, theoretische Konzepte zum Verständnis der, für Städte typischen, Einflüsse von *single*- und *double bounce*-Reflexion (vgl. Kap. 2.4.2) auf das Radarrückstreusignal. Um Rückschlüsse auf Gebäudegrößen und -dichten zu ziehen, ist es nötig, den Einfluß der Gebäudeorientierung zu kompensieren. Hierzu ziehen die Autoren geometrisch hoch auflösende optische und Mikrowellendaten heran, aus denen nach Kantenverstärkung die Straßenrichtungen extrahiert werden. Die aus Mikrowellendaten abgeleiteten Ergebnisse erreichen aber bislang nicht die Qualität optischer Auswertungen.

Neben den, in erster Linie auf flächenhafte, operationelle Nutzungserkennung, bzw. -klassifikation ausgerichteten Arbeiten, wird in zahlreichen Studien der Versuch unternommen, Parameter wie z.B. Biomasse, *Leaf Area Index* (LAI) und Vitalität bestimmter Nutzungen aus Fernerkundungsdaten abzuleiten. Diese Parameter bilden, neben den Flächenverteilungen, einen wesentlichen Beitrag zur Parameterisierung hydrologischer Modelle. Einen Überblick über Stand und Methoden der optischen Fernerkundung, zur physikalisch basierten Ableitung und Interpretation von Vegetations- und Bodenflächenreflexion, geben MYNENI et al. (1995[216]). Sie beschreiben verschiedene Strahlungsmodelle und die gebräuchlichen spektralen Vegetationsindizes, z.B. *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Simple Ratio* (SR), *Soil-Adjusted Vegetation Index* (SAVI), und stellen fest, daß zwischen diesen einfachen Ratiobildungen und vielen Vegetationsparametern (Bedeckungsgrad, LAI, Strahlungsabsorption, Bestandsphotosynthese) empirische Beziehungen bestehen, wenngleich diese vielfach noch keine kausalen Zusammenhänge implizieren.

Eine Vielzahl physikalischer Strahlungsmodelle für unterschiedlichste Oberflächen steht mittlerweile zur Verfügung, Probleme bestehen weiterhin in der Modellierung der Strahlungscharakteristik der Ast- und Blattgeometrien, dem Einfluß des Bodens in offenen Beständen, sowie den Mischphänomenen in heterogenen Landschaftsteilen. PRICE & BAUSCH (1995[238]) entwickeln ein numerisches Modell zur Bestimmung des LAI anhand von Landsat TM-Daten. Der Ansatz trägt dem Einfluß des Bodens bei verschiedenen Vegetationsbedeckungsdichten Rechnung und wird auf Getreideflächen unterschiedlicher phänologischer Entwicklung überprüft. Einen Modellansatz zur Ableitung des LAI auf Basis des NDVI beschreiben CARLSON & RIPLEY (1997[42]). Besondere Aufmerksamkeit wird hierbei dem Vegetationsbedeckungsgrad gewidmet.

Ein Problem bei der Bestimmung zeitlich hochvariabler Pflanzenparameter ist die, für viele Fragestellungen ungenügende, repetitive Auflösung der geometrisch hochauflösenden Sensoren an Bord von LANDSAT, SPOT und IRS. Demgegenüber steht die geringere geometrische Auflösung des NOAA AVHRR, der aber tägliche Repetition besitzt. Vor diesem Hintergrund untersucht GOETZ (1997[122]) inwieweit, aus Daten unterschiedlicher Sensoren abgeleitete, NDVI-Werte vergleichbar sind. Für ein landschaftlich wenig heterogenes, gemischtes Grünlandgebiet stellt er fest, daß, nach Kalibrierung, räumlicher Mittelung und Atmosphärenkorrektur, die NDVI-Werte gute Übereinstimmung zeigen. Insofern bietet sich die Möglichkeit, die unterschiedlichen Sensorcharakteristiken synergetisch zu nutzen.

Die Auswertung von Daten aus dem Mikrowellenbereich liefert, wie weiter oben bereits für Forstanwendungen ausgeführt, bislang keine Ergebnisse, die mit der Qualität optischer Datenanalysen vergleichbar sind. STOLZ et al. (1997[274]) weisen einen Zusammenhang zwischen Radarrückstreukoeffizient und Wuchshöhe von Grünlandflächen nach und berechnen auf dieser Grundlage flächenspezifische Biomassen. Die Vitalität von Forstbeständen untersuchen ZINK et al. (1997[311]). Sie kommen zu dem vorläufigen Ergebnis, daß sich beispielsweise Wassergehalte von Blättern und Nadeln, als Vitalitätsanzeiger, nicht allein aus Rückstreuintensitätsdaten der ERS-Satelliten ableiten lassen und verweisen für die Zukunft auf die zusätzliche Nutzung von flugzeuggetragenen, multifrequenten und multipolarisierten Sensoren und die Anwendung interferometrischer Methoden. KLAASEN et al. (1997[158]) beschreiben einen Ansatz zur Bestimmung von Interzeptionswasser in Beständen nach Niederschlagsereignissen. Methodischer Fortschritt ist, neben neuen Sensorgenerationen, auch von verbesserten Radarreflexionsmodellen zu erwarten (WANG & DONG 1997[294]).

Durch ihre operationelle Verfügbarkeit eignen sich satellitengetragene Fernerkundungsdaten vorzüglich zum multitemporalen Flächenmonitoring. Studien von MEINEL et al. (1996[206]) und NORDBERG (1998[221])

belegen die Kompetenz optischer Systeme im Bereich *change detection* in unterschiedlich ausgestatteten Landschaftsgebieten. Erweiternd entwickelt MATTIKALLI (1995[197]) ein System zur Integration von Nutzungsinformation unterschiedlicher Quellen im Vektorformat und digitalen Rasterdaten optischer Fernerkundungssensoren, innerhalb eines GI-Systems. Gerade bei Analysen zur Veränderung der Landnutzung sind derartige Integrationsmöglichkeiten von besonderer Bedeutung, da vielfach historische Informationen einbezogen werden müssen, die gewöhnlich aus Karten digitalisiert, als Vektordatenschichten innerhalb eines GI-Systems vorliegen.

Auch multitemporale Mikrowellendaten wurden vielfach erfolgreich zum Flächenmonitoring benutzt. KATTENBORN et al. 1993[151]) entwickeln eine auf Änderungserkennung ausgerichtete SAR-Prozessierungskette, die im wesentlichen auf Rückstreuintensitätsanalysen basiert, aber auch texturanalytische Verfahren beinhaltet. Im weiteren Sinne machen sich alle, oben im Zusammenhang mit Agraranwendungen aufgeführten, Publikationen, über die Nutzung multitemporaler Datensätze, auch *change detection*-Methodiken zunutze.

2.2.2 Bodenphysik

Mikrowellen sind in der Lage, in Medien wie Boden, Vegetationsbestände und Schnee einzudringen. Ihr Emissions-, bzw. Reflexionsignal bietet somit Information über den Zustand der jeweiligen Materialien innerhalb des Penetrationsbereichs. In besonderem Maße beeinflussen die Rauigkeit und die dielektrischen Eigenschaften eines Materials dessen Mikrowellenemission, bzw. -reflexion (ULABY et al. 1981[285], 1982[286], 1986[287], HALLIKAINEN et al. 1985[133]). Letztere werden im wesentlichen vom Wassergehalt bestimmt, da sich die Dielektrizitätskonstanten von Wasser und trockenem Boden im Frequenzbereich der Mikrowellen stark unterscheiden.

Studien zur Quantifizierung der Bodenfeuchtigkeit nutzen daher gewöhnlich passive oder aktive Mikrowellensensoren. Optische Systeme spielen in diesem Zusammenhang eine untergeordnete Rolle. Einen Sonderstatus nehmen Sensoren ein, die über Messung der Emission von thermalem Infrarot Oberflächentemperaturen ermitteln können (LAMBIN & EHRLICH 1995[168], GOETZ 1997[122]).

Der Bodenfeuchte kommt, innerhalb der regionalen Flußeinzugsgebietsmodellierung, eine zentrale Rolle zu, sie bildet die prozeßsteuernde Schnittstelle zwischen Grundwasser und Oberfläche (ENGMAN 1997[87]). Kritisch ist die hohe zeitliche und räumliche Variabilität der Bodenfeuchte. Diese macht eine flächenhafte, konsistente Erfassung mit Punktmeßnetzen nahezu unmöglich. Die Mikrowellenfernerkundung bietet die Möglichkeit, Bodenfeuchte in unterschiedlichen Maßstäben flächenhaft zu erfassen, methodisch besteht bei der Überführung von Emissions-, bzw. Reflexionsintensitäten in Bodenfeuchtegehalte allerdings weiterhin Forschungsbedarf.

Neben der Bodenfeuchtigkeit ist die Oberflächenrauigkeit ein Parameter, der die Mikrowellenreflexion und -emission beeinflusst und für die Abflußbildung in einem Einzugsgebiet von Bedeutung ist. Der Rauigkeitsanteil des Signals wird dabei sowohl von der Vegetation, als auch von der Geometrie der Bodenoberfläche beeinflusst. Die passiv arbeitenden Radiometer (z.B. SSM/I) liefern geometrische Auflösungen im Bereich von zehn und mehr Kilometern und sind somit für Maßstäbe meteorologischer und klimatologischer Modelle anwendbar, nicht jedoch für die Skalenbereiche distributiver, hydrologischer Anwendungen (ENGMAN & CHAUHAN 1995[88]). Die aktiven SAR-Verfahren liefern die nötigen geometrischen Auflösungen, allerdings wird die Rückstreuintensität, neben Feuchtezustand und Rauigkeit, auch in stärkerem Maße von anderen Oberflächenparametern, z.B. Bodentextur, Eindringtiefe, Vegetation und Relief sowie Sensorparametern (z.B. Einfallswinkel und Frequenz) beeinflusst (vgl. Kap. 2.4.2). Der Quantifizierung der jeweiligen Einflüsse widmet sich die Mehrzahl der im folgenden aufgeführten Publikationen.

ENGMAN & CHAUHAN (1995[88]) geben einen allgemeinen Überblick über Methodiken und Probleme bei der Feuchtebestimmung mit fernerkundlich aufgenommenen Mikrowellendaten. Sie beschreiben die grundlegenden mathematischen Zusammenhänge von Dielektrizitätskonstante und volumetrischem Bodenwassergehalt, sowie die Folgen für das Emissions- und Reflexionsverhalten der Oberfläche. Es werden Ansätze entwickelt, Bodenfeuchte auch unter von Vegetation bestandenen Flächen abzuschätzen, den Vegetationseinfluß also physikalisch basiert zu eliminieren. Hierzu setzen sie sich eingehend mit der Art der Streuung und Reflexion der Mikrowellen in Beständen auseinander. Desweiteren werden multitemporale Ansätze verfolgt, um die zeitlich weniger variierenden, reflexionsbeeinflussenden Parameter der Textur,

Rauhigkeit, etc. auszuschließen. HU et al. (1997[143]) beschreiben und formulieren die passiven Radiometerdaten inhärente Statistik, im Hinblick auf deren Bodenfeuchteinformation. Mittels Flugzeugscanneraufnahmen untersuchen BENALLEGUE et al. (1995[23]) den Zusammenhang von Rückstreuung, Feuchte und Rauhigkeit. Der Sensor erlaubt eine dem ERS ähnliche Konfiguration von Wellenlänge, Polarisation und Einfallswinkel. Für agrarisch genutzte Bodenflächen kommen die Autoren zu dem Ergebnis, daß die ERS Konfiguration nicht zur Erfassung von Bodenfeuchtigkeiten in der Feldskala geeignet ist. Signifikante Korrelationen lassen sich in diesem Maßstabbereich nur durch Einfallswinkel um 10° realisieren. Erst nach einer räumlichen Mittelung im Bereich von 1 km^2 kommen die Autoren zu einem Trend, der den Feuchteabfall im Testgebiet über die Abnahme der Rückstreuintensität hinreichend modelliert.

CHEN et al. (1995[45]) entwickeln ein mathematisches Modell zur Ableitung der Feuchte von „nackten“ Bodenflächen. Sie verifizieren ihr Modell mit experimentellen Daten und unterstreichen den Einfluß des Einfallswinkels auf die Feuchteschätzung. Mittels Nutzung verschiedener Polarisationen (VV & HH) gelingt es den Autoren, den Rauheits- und Einfallswinkeleinfluß zu verkleinern.

WEIMANN et al. (1997[299]) nutzen ERS-1 Daten zur Bodenfeuchteabschätzung über unbestandenen Ackerflächen. Sie wenden ein einfaches mathematisches Modell an, um den volumetrischen Wassergehalt aus den Rückstreuintensitäten abzuleiten. Ihr Ansatz schließt Vegetationsbedeckung und Rauhigkeit aus, in einer aufwendigen Geländekampagne werden die Testflächen vegetationsfrei gehalten und gewalzt um über den Untersuchungszeitraum konstante Rauigkeiten zu etablieren. Sie erhalten relativ hohe Korrelationen ($r = 0.82$) bei den Tagesüberflügen (*descending orbits*), während bei den Nachtüberflügen kein Zusammenhang erkennbar ist ($r = 0.46$). Diese Unterschiede werden mit dem nächtlichen Auftreten von Tau erklärt, der zwar nur geringen Einfluß auf den Gesamtfeuchtegehalt hat, durch seine Eigenschaft, sich um die obersten Bodenpartikel zu legen, aber die Dielektrizitätskonstante stark verändert. Einen methodisch ähnlichen Ansatz, allerdings mit einer weniger aufwendigen Geländekampagne, stellen MENDEL & PORTMANN (1997[207]) vor. Unter Ausschluß von Ausreißern erreichen die Autoren Anpassungen um 0.7.

O'NEILL et al. (1996[223]) modellieren die Bodenfeuchtigkeit unter Getreidefeldern mit einem flugzeuggetragenen passiven L-Band Radiometer und verschiedenen aktiven flugzeuggetragenen SAR-Systemen. Ihr methodischer Ansatz beinhaltet ein Modell zur Formulierung der Reflexions- und Transmissionseffekte innerhalb der Vegetationsschicht, sowie ein Rückstreumodell für die Oberfläche, bzw. die Penetrationsschicht. Sie erreichen mit diesem Vorgehen Anpassungen ihrer Modellrechnungen an die Referenzdaten im Bereich von durchschnittlich 2% der gemessenen, absoluten Feuchtegehalte. Allerdings erfordert vor allem das Vegetationsmodell eine aufwendige Parameterisierung.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen TACONET et al. (1996[278]). Um Bodenfeuchte unter Weizenfeldern abzuschätzen, findet ein Vegetationsmodell Anwendung, daß lediglich auf dem Wassergehalt der Pflanzendecke aufsetzt. Dieser ist mit Geländeuntersuchungen oder aus optischen Fernerkundungsdaten vergleichsweise einfach abzuschätzen. Der benutzte Sensor ist ein helikoptergetragener Radiometer (ERASME) der dem ERS ähnliche Eigenschaften simulieren kann (u.a. 23° Einfallswinkel und C-Band mit VV-Polarisation). Die Autoren schätzen, daß mit Ihrer Methodik der volumetrische Feuchtegehalt aus ERS-Daten mit einer Genauigkeit von $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ abgeleitet werden kann.

CHAUHAN (1997[44]) führt die Arbeiten von O'NEILL et al. (1996[223]) weiter, indem er aktive und passive Verfahren synergetisch mit ähnlichem Modellierungsansatz nutzt. Die aktiven Verfahren werden zur Erfassung von Parametern verwendet, die das Vegetations-Streuungsmodell steuern, das Bodenfeuchtemodell wird mit den passiven Radiometerdaten gespeist. Die Feuchteschätzungen der Modelle weichen im Mittel weniger als fünf Prozent von den im Gelände gemessenen, absoluten Feuchtwerten ab. HUANG & JIN (1995[145]) nutzen ebenfalls die Synergie aktiv generierter Radarrückstreuintensitäten und passiver Emission um die Einflüsse von Feuchtigkeit und Rauhigkeit zu isolieren.

ROMBACH & MAUSER (1997[249]) entwickeln eine Methodik, Bodenfeuchte unter verschiedenen Landnutzungstypen, neben Agrarnutzungen (Brachflächen, Gerste, Hafer, Weizen) auch Grünlandnutzungen, aus ERS-Daten abzuleiten. Zunächst werden die *in Situ* Feuchtemessungen nach HALLIKAINEN et al. (1985[133]) in Dielektrizitätskonstantenwerte umgerechnet, anschließend wird für jede Nutzungsart ein Rauigkeitsbeiwert eingeführt, um die unterschiedlichen Rauigkeiten zu normalisieren und ihren Einfluß auszuschließen. Für die Grünlandnutzungen wird zusätzlich der Parameter Biomasse geschätzt, um die hohe zeitliche Variabilität der Nutzung angemessen im Modell berücksichtigen zu können. Desweiteren gehen Bodenparameter in die Modellrechnungen ein. Für jede Nutzungsart werden empirisch nichtlineare Regressionskurven entwickelt, um den Zusammenhang von Rückstreuintensität und volumetrischem Wassergehalt abzubilden. Die Intensitäten werden hierbei nicht pixelweise berücksichtigt, sondern pro Feld,

anhand einer digitalen Feldgrenzenkarte, gemittelt. Die Übereinstimmung von modellierten und gemessenen Feuchtwerten ist für alle untersuchten Nutzungsarten hoch ($0.90 \leq r \leq 0.97$), Voraussetzung für die Anwendung der Methodik ist allerdings eine umfangreiche GIS-Datenbank, die u.a. Informationen zu Landnutzung, Böden und aktueller Biomasse der Grünlandflächen beinhalten muß.

Ebenfalls auf Basis von Feldmittelwerten rechnen TROCH et al. (1996[283]). Zur Ableitung der Grenzen finden optische Spektrometerdaten Verwendung (RODIS), die Bodenfeuchte wird mit einem *Integral Equation Model* (IEM, FUNG et al. 1992[110]) auf Einzugsgebietsebene aus ESAR-Daten modelliert. Das ESAR ist ein experimenteller, multifrequenter, multipolarisierter und flugzeuggetragener Sensor des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). WEGMÜLLER (1997[296]) nutzt, analog zu ROMBACH & MAUSER (1997[249]), Regressionskoeffizienten zur Ableitung von relativen Feuchteänderungen und absoluten Feuchtebestimmungen. Er beschränkt sich nutzungsspezifisch auf Ackerflächen ohne, bzw. mit wenig Bewuchs und stabiler Rauigkeit. Diese Flächen leitet er mit Hilfe von interferometrisch extrahierter Kohärenzinformation, aus Daten der ERS-1/2 Tandem Mission, ab.

MATTIKALLI & ENGMAN (1997[198]) stellen einen Zusammenhang zwischen Bodenfeuchteänderungen und der Bodenart her. Sie benutzen Daten eines flugzeuggetragenen L-Band Radiometers (ESTAR) mit 200 m Pixelauflösung. Im einzelnen leiten die Autoren zunächst multitemporal die Feuchteentwicklung aus den *Brightness*-Temperaturen ab. Bei einem Vergleich der Feuchteentwicklungen auf unterschiedlichen Bodenarten innerhalb eines GI-Systems, stellen Sie fest, daß sich für sandige und lehmige Böden unterschiedliche Feuchtegehalts- und Feuchtedrainagemuster ergeben. Über diese Muster scheint es möglich, unterschiedliche Bodenarten voneinander zu unterscheiden und auf dieser Grundlage hydraulische Eigenschaften des jeweiligen Bodens abzuleiten. Im Ergebnis stellen die Autoren einen Zusammenhang zwischen Feuchteänderungen im Zwei-Tagesrhythmus und der hydraulischen Leitfähigkeit der Böden her, und kommen zu dem Schluß, daß satellitengetragene Mikrowellensensoren das Potential besitzen, in regionalem bis globalem Maßstab, die räumliche Verteilung bestimmter Bodenparameter, über die Analyse der Feuchtigkeitsänderungsmuster, zu erfassen.

Aus der Vielzahl unterschiedlicher mathematischer Konzepte, Methodiken, Daten und Sensoren lassen sich zusammenfassend für die Feuchteerfassung aus Mikrowellendaten folgende Punkte festhalten:

- Insgesamt besteht eine breite theoretische Basis für die Nutzung aktiver und passiver Mikrowellendaten zur Bodenfeuchtigkeitsbestimmung in allen Maßstabsbereichen.
- Der Wassergehalt eines Boden läßt sich durch die Messung der Dielektrizitätskonstanten bestimmen (MAUSER et al. 1997[201]).
- Das zu untersuchende Bodenvolumen hängt von der Penetrationstiefe der Mikrowellen ab, die wiederum von der Wellenlänge bestimmt wird. Als Faustregel gilt für nackten Boden, daß die Eindringtiefe zumeist die Hälfte der Wellenlänge nicht übersteigt. Damit beschränkt sich das Meßvolumen auf die obersten 2 cm (z.B. ERS) bis 10 cm (z.B. JERS). Generell sind die langwelligeren Mikrowellen besser zur Feuchtebestimmung geeignet, u.a. da der Vegetationseinfluß geringer und die Eindringtiefe größer ist.
- Neben den dielektrischen Eigenschaften beeinflusst die Rauigkeit der Oberfläche deren Reflexions-, bzw. Emissionsverhalten. Der Rauigkeitseinfluß muß korrigiert werden um zu realistischen Abschätzungen zu kommen.
- Die Vegetation beeinflusst Reflexion, bzw. Emission je nach Biomasse, Wassergehalt und Geometrie des Bestands. Um zu Bodenfeuchteabschätzungen unter Vegetation zu kommen, muß dieser Einfluß ebenfalls eliminiert werden. Hierfür stehen unterschiedliche theoretische Konzepte zur Verfügung.
- Die Kenntnis von Nutzung und Böden in den Untersuchungsgebieten erhöht die Güte der Abschätzungen.
- Der Einfallswinkel beeinflusst vor allem die Rauigkeitssensitivität des Sensors. Kleine Einfallswinkel reduzieren den Rauigkeitseinfluß und sind daher für Feuchteuntersuchungen besser geeignet.
- Bislang existiert kein Ansatz zur Erfassung der Bodenfeuchtigkeit unter Wald.

2.2.3 Relief

Neben Landnutzung und Bodenfeuchtigkeit wird die hydrologische Dynamik eines Einzugsgebiets wesentlich durch das Relief bestimmt. Zur Ableitung von Digitalen Geländemodellen können, neben Stereo-Luftbildpaaren, auch Daten satellitengetragener Systeme Verwendung finden. Im optischen Bereich werden zur Extraktion von Terraininformation häufig SPOT PAN-Stereobildpaare genutzt (z.B. bei AL-ROUSAN et al. 1997[5]). Die Verarbeitung erfolgt, analog zur Auswertung von Luftbildern, mit photogrammetrischen Methoden unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Aufnahmegeometrien. Die aktive Mikrowellenfernerkundung bietet, neben *Shape-from-Shading*-Verfahren (FIKSEL & HARTMANN 1994[95]), über interferometrische Verarbeitung zweier SAR-Szenen die Möglichkeit zur Erstellung von Digitalen Geländemodellen.

Mit der ERS-1/2 Tandem Mission (DUCHOSSOIS et al. 1996[75]) stieg der Anwenderkreis beträchtlich, da erstmals ideale Geometriebedingungen (Basislinienabstände, Orbitstabilität) und gute repetitive Voraussetzungen für interferometrische Verarbeitungen realisiert werden konnten. Insbesondere der nur eintägige Aufnahmeabstand ist in diesem Zusammenhang von Bedeutung, da die Qualität der Höhenabschätzung maßgeblich von hoher Kohärenz zwischen beiden Szenen abhängig ist (RUFINO et al. 1996[252]).

Arbeiten von HERLAND (1996[136]) und MAUSER et al. (1997) setzen sich anwendungsbezogen mit der *InSAR* (Interferometric SAR) Technik auseinander, methodisch orientierte Studien von LUCA et al. (1996[189]) und WU et al. (1996[303]) beschreiben Methoden und Probleme der Ableitung von Höheninformation und ihrer Genauigkeit.

Den aktuellen, methodischen Stand der DGM-Erstellung mit ERS-Tandemdaten beschreiben FERRETTI et al. (1998[94]). Um den Einfluß der Atmosphäre zu minimieren, kombinieren die Autoren mehrere ERS Tandem DGMs. Da sich die größten Höhenfehler in der Regel in Gebieten mit geringer Reliefenergie konzentrieren, nutzen Sie Zusatzinformation aus grob auflösenden DGMs, um die Genauigkeit weiter zu steigern. Schließlich wird eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht, auch Datensätze mit geringer Kohärenz erfolgreich zu bearbeiten. Dies würde in Zukunft die Kombination von Datensätzen größeren zeitlichen Abstands und unterschiedlicher Sensoren (z.B. ERS und ENVISAT) ermöglichen. Insgesamt werden durchschnittliche Höhengenaugkeiten im Meter- bis Zehnermeterbereich erzielt. Somit ist die Qualität interferometrisch abgeleiteter Höhenmodelle, mit der optischer, digital-photogrammetrischer Verarbeitungen (z.B. mit SPOT PAN-Daten) vergleichbar.

2.2.4 Schnee

Die Schneeschmelze ist in zahlreichen Einzugsgebieten der hohen und mittleren Breiten für einen Großteil des jährlichen Abflusses verantwortlich. Das freiwerdende Wasser dient häufig der Gewinnung von Energie, der Bewässerung, sowie privatem und industriellem Verbrauch. Insofern sind Monitoring der Schneebedeckung und die Abschätzung von Wassergehalt und Zustand für die regionale, hydrologische Modellierung von Schneeschmelze und Abfluß von entscheidender Bedeutung (SWAMY & BRIVIO 1996[277]). Hinzu kommt im globalen Skalenbereich die Bedeutung der Schneedeckenausdehnung für klimatologische und meteorologische Modelle (GUNERIUSSEN 1997[129]). Zum Flächenmonitoring werden sowohl optische, als auch Mikrowellendaten genutzt, die quantitative Abschätzung von Parametern wie Wassergehalt, Dichte und Lagerung erfolgt zumeist mit Daten aktiver Radarsensoren, die in der Lage sind, in die Schneedecke einzudringen. Wegen der starken räumlichen und zeitlichen Dynamik von Schneedecken sind kurze Beobachtungsabstände von besonderer Bedeutung.

SWAMY & BRIVIO (1996[277]) geben einen Überblick über Möglichkeiten und Probleme beim Monitoring von Schneeflächen. Sie vergleichen die Leistungsfähigkeit optischer Systeme unterschiedlicher geometrischer Auflösung, sowie aktiver und passiver Mikrowellensensoren. Für ein Hochgebirgseinzugsgebiet in den italienischen Alpen modellieren die Autoren die Schneeschmelz-Abfluß Dynamik anhand von, aus optischen Satellitendaten (TM, MSS) abgeleiteten, Schneebedeckungskarten und Geländeinformation. Als Probleme werden die, sich durch häufige Wolkenbedeckung verschärfenden, schlechten Repetitionsraten, sowie die, bei geometrisch gröber auflösenden Sensoren (MSS, NOAA) entstehende, Mischpixelproblematik benannt. Die besten Modellanpassungen werden bei Nutzung des hochauflösenden TM erreicht.

Dem Problem der Wolkenbedeckung widmen sich EHRLER et al. (1997[80]) indem sie eine Methodik entwickeln, mit der die Schneeflächenausdehnung unter der Wolkendecke auf Grundlagedaten wolkenfreier Teile

einer optischen Satellitenszene unter Einschluß weiterer Parameter, wie z.B. Höhe und Exposition, abgeschätzt wird. Zu diesem Zweck werden innerhalb eines GI-Systems *Snow Cover Units* (SCUs) abgeleitet. Die Bedeutung Geographischer Informationssysteme wird ebenfalls von BAUMGARTNER & APFL (1997[16]) herausgestellt. Sie entwickeln ein integriertes Analysesystem ASCAS (Alpine Snow Cover Analysis System), welches aus einer Bildverarbeitungs-komponente, einem GIS, einem *Database Management System* (DBMS) und einem Schneeschmelz-Abfluß Modell, dem *Snowmelt Runoff Model* (SRM), besteht. Die Schneeverteilung und -entwicklung wird auf Grundlage von NOAA AVHRR-Daten erfaßt.

Schneedecken ändern ihre dielektrischen Eigenschaften entsprechend ihrem Wassergehalt. Trockener Schnee ist in der Regel für Mikrowellen transparent, die Rückstreuung wird vom darunterliegenden Substrat bestimmt. Eine Methodik zur Ableitung von feuchten Schneeflächen aus ERS SAR-Daten entwickeln NAGLER & ROTT (1997)[218]). Sie bearbeiten ein Gebiet in den Zentralalpen mit Hochgebirgsrelief. Die Szenen müssen, wegen der starken geometrischen Verzerrungen und Terraineffekte, aufwendig vorprozessiert werden. Die Ergebnisse werden mit Resultaten optischer Fernerkundungsanalysen verglichen und zeigen gute Übereinstimmung. Die Verteilungskarten dienen ebenfalls als Eingabeparameter in SRM (s.o.), mit dem befriedigende Übereinstimmungen zwischen gemessenem und simuliertem Abfluß erreicht werden. BAGHDADI et al. (1997[10]) entwickeln einen Algorithmus zum Monitoring feuchter Schneedecken, der im wesentlichen auf multitemporaler Analyse von ERS-1 SAR-Daten beruht.

DE SÈVE et al. (1998[65]) nutzen passive SSM/I-Daten um die Emission von Schneedecken im Bereich verschiedener Mikrowellenfrequenzen zu untersuchen: Die 37 GHz Frequenz ist prinzipiell zur Ableitung von Feuchtegehalten dünner Schneedecken geeignet, bei 19 GHz besteht ein Zusammenhang zu Luft- und Bodentemperatur. Wegen der groben räumlichen Auflösung des Sensors kommt es zu Mischpixelphänomenen, die bislang methodisch keine Berücksichtigung finden.

HAEFNER & PIESBERGEN (1997[131]) entwickeln eine Methodik zur synergetischen Nutzung von optischen und Mikrowellendaten zum Schneeflächenmonitoring im Hochgebirge. Ihr System *MORA* (Multitemporal Optimal Resolution Approach) nutzt ERS-Daten um die Perioden zwischen wolkenfreien TM-Aufnahmen zu überbrücken. Um die starken Terraineffekte in den SAR-Bildern zu minimieren, werden auf- und absteigende ERS-Orbits integriert.

Neben dem Flächenmonitoring spielt die Abschätzung des Wasseräquivalents (*SWE*, Snow Water Equivalent) der Schneedecken eine entscheidende Rolle für Simulation und Prognose von Schneeschmelzereignissen. GUNERIUSSEN (1997[129]) liefert einen Überblick über den physikalisch-theoretischen Hintergrund von Mikrowellenreflexion und Streuung in einer Schneedecke. Er nutzt ERS-1 SAR-Daten zur Bestimmung des SWE in bergigem Relief. MÄTZLER et al. (1997[199]) untersuchen in diesem Zusammenhang Daten der SIR-C/X-SAR-Kampagne. KELLY et al. (1997[152]) nutzen ERS-SAR Aufnahmen und Kohärenzbilder aus der ERS-1/2 Tandem Mission um den Verlauf der Schneegrenze, sowie verschiedene Eigenschaften des Schnees, auf einer Inlandeiskappe in Norwegen zu untersuchen. Hintergrund Ihrer Arbeit ist der Versuch, Aussagen über Massenbilanzen der Eiskappe zu treffen, um Hinweise auf Klimaschwankungen zu erhalten. MOORMAN (1998[212]) wertet sowohl Luftbilder, als auch TM-, ERS-, JERS- und RADARSAT-Aufnahmen aus, um die Schnee- und Eisentwicklung von Gletschern im Jahresverlauf zu charakterisieren. Die Radardaten eignen sich in diesem Zusammenhang zur Charakterisierung des Ausaperungsvorgangs und zur Erkennung von Entwässerungssystemen unter Schnee.

Zusammenfassend läßt sich aus der Literaturdiskussion zur Schnee-problematik festhalten:

- Die Mehrzahl der Studien mit hydrologischem Hintergrund nutzt Daten geometrisch hochauflösender Sensoren und stellt die Bedeutung hoher Repetitionsraten heraus.
- Die Ausweisung von Schneeflächen mit optischen Satellitendaten hat operationellen Status erreicht. Eine methodische Herausforderung stellt die Handhabung der Wolkenbedeckung dar.
- Trockener Schnee hat auf die Radarrückstreuung nahezu keinen Einfluß, das Signal wird in diesem Fall von der Charakteristik des darunterliegenden Substrats bestimmt, daher können mit Mikrowellenverfahren lediglich feuchte Schneedecken detektiert werden.
- Die Auswertung von Mikrowellendaten hinsichtlich Flächenverteilung und Monitoring erfordert einen höheren methodischen Aufwand, liefert aber bei feuchten Schneedecken, den Analysen optischer Satellitendaten vergleichbare, Ergebnisse. Ein Vorteil ist in der Wetter- und Beleuchtungsunabhängigkeit der Mikrowellensysteme zu sehen.

- Zahlreiche Studien nutzen die Synergie von Sensoren verschiedener geometrischer Auflösung, Radiometrie und Repetition, sowie topographische Zusatzinformation.
- Studien zur quantitativen Ableitung des SWE nutzen häufig flugzeuggetragene, multifrequente und multipolarisierte Systeme. Operationelle Verfahren sind bislang nur in Ansätzen vorhanden.

2.2.5 Gewässer

Im Bereich der Gewässerqualität bieten Fernerkundungsmethoden die Möglichkeit flächendeckender Messung bei simultaner Bestimmung mehrerer Parameter aus einer Meßgröße. Optische Verfahren eignen sich zur Detektion von Gelbstoffen, Schwebstoffen und Chlorophyll. Allerdings sind operationelle Modelle zur Differenzierung und Quantifizierung der genannten Stoffe bislang nur in Ansätzen vorhanden (RENNERT 1997[242]). Die erforderlichen spektralen Auflösungen übersteigen bislang die Möglichkeiten satellitengetragener Sensoren. Im wesentlichen kommen deshalb flugzeuggetragene oder bodengebundene, im optischen Bereich arbeitende, Spektrometer zum Einsatz. Bei flugzeug- und satellitengetragenen Sensoren stellt die Eliminierung des atmosphärischen Einflusses eine methodische Herausforderung dar.

GEGE (1996[116]) klassifiziert vier Phytoplankton-Klassen durch Modellierung der Gewässeralbedo. Als Sensor findet ein schiffgetragener Spektrometer (400 nm bis 800 nm) Verwendung. Der Autor entwickelt ein Albedomodell und gibt Hinweise für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf flugzeug- und satellitengetragene Sensoren. RENNERT (1997[242]) nutzt ebenfalls Daten eines schiffgetragenen Spektrometers. Er entwickelt, vor dem Hintergrund eines Gewässergütemonitorings, eine Methodik zur Ableitung von Gelbstoffen, Schwebstoffen und Chlorophyll. GITELSON et al. (1997[121]) leiten aus Daten eines optischen Radiometers (400 nm bis 900 nm) die Qualität von Abwässern im Aufbereitungsprozeß ab. Es werden Algorithmen zur Berechnung von Chlorophyll-*a*, Bakteriochlorophyll-*a* und dem Anteil gelöster Stoffe entwickelt. Feldspektrometermessungen und Daten eines flugzeuggetragenen Spektrometers (CASI, Compact Airborne Spectrographic Imager) finden bei THIEMANN & KAUFMANN (1998[280]) Verwendung. Sie quantifizieren erfolgreich Secchi-Tiefe und Chlorophyll-*a*-Gehalt um auf den Trophiegrad von Seen zu schließen.

Mikrowellendaten können in diesem Zusammenhang keine Verwendung finden, da sie an der Oberfläche reflektiert werden und nicht in der Lage sind einige Zentimeter in Wasserflächen einzudringen. Ein breites Anwendungsspektrum ergibt sich jedoch im Monitoring von Flutereignissen, da sich, v.a. bei multitemporaler Analyse der Rückstreuintensität, Wasserflächen zumeist klar von Landflächen unterscheiden lassen. Vor allem wegen ihrer Wetterunabhängigkeit sind Radardaten auf diesem Gebiet von großem Nutzen, da Flutereignisse in der Regel von Niederschlägen begleitet werden und optische Daten keine sinnvolle Anwendung finden können. BLYTH et al. (1993[33]) nutzen multitemporale ERS-1 PRI-Daten um überflutete Flächen eines Themsehochwassers zu erfassen. Methodisch ähnlich arbeiten LAUGIER et al. (1997[174]) in der Camargue. GIACOMELLI et al. (1997[120]) entwickeln eine Methodik zur Integration eines DGMs und weiterer Information in einem GI-System, um bei Nutzung der Rückstreuintensitäten zu verbesserten Überflutungsflächenkarten zu gelangen. MARINELLI et al. (1997[193]) und SMITH & ALSDORF (1997[267]) nutzen neben multitemporaler Rückstreuintensitätsinformation zusätzlich Kohärenzinformation verschiedener Paare aus der ERS-1/2 Tandem Mission.

2.2.6 Niederschläge

Die Niederschlagsmenge pro Gebiet und Zeiteinheit stellt, für hydrologische Modellierungen jeden Maßstabs, einen Kernparameter dar. Die Niederschlagsverteilung ist, sowohl zeitlich, als auch räumlich, hochvariabel. Traditionell werden Niederschlagssummen aus einem Meßnetz von Regenschreibern interpoliert. Abgesehen von methodischen Problemen bei der Messung, ist die Dichte der Meßnetze in großen Teilen der Erde ungenügend. Gleiches gilt für die moderneren, bodengebundenen Wetterradarsysteme (GABELLA et al. 1998[111]).

Ansätze zur Bestimmung von Niederschlagsmengen aus Satellitendaten lassen sich grundsätzlich in zwei methodische Herangehensweisen trennen: Zum einen die Nutzung von VIS/IR-Radiometern, die Temperatur und Reflexion an der Wolkenoberfläche messen, zum anderen passive Mikrowellenradiometer, die, von Wasserdampf nahezu unbeeinflusst, direkt Informationen zu Wasser- oder Eisparkeln in der Atmosphäre geben können.

Bei den Sensoren kommen sowohl geostationäre, als auch polar umlaufende, sonnensynchrone Systeme zum Einsatz. Einen ausführlichen Überblick über Methoden, Sensoren und Algorithmen geben PETTY (1995[235]) und BARRETT (1997[13]). Anwendungsbezogene Studien zur Nutzung unterschiedlicher Sensoren und Referenzdaten präsentieren LIU & CURRY (1992[186]), ROSENFELD & GUTMAN (1992[250]), ADLER et al. (1993[4]), KUMMEROW & GIGLIO (1994[165][166]) und LANZA & SICCARDI (1997[170]).

Aus diesen Quellen läßt sich der aktuelle Forschungsstand auf dem Gebiet der Niederschlagsquantifizierung aus Satellitendaten wie folgt zusammenfassen: Die am häufigsten genutzten Systeme auf geostationären Satelliten sind auf dem amerikanischen GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), dem europäischen METEOSAT, dem japanischen GMS (Geostationary Meteorological Satellite) und dem indischen INSAT installiert. Es handelt sich um VIS/IR-Radiometer mit einer geometrischen Auflösung zwischen einem und elf Kilometern. Aufgrund ihrer Orbitkonfiguration sind sie in der Lage, die von ihnen erfaßten Gebiete in hoher zeitlicher Auflösung (z.B. halbstündlich) aufzunehmen. Bei den polar umlaufenden Systemen finden in erster Linie, als VIS/IR-Instrument, das AVHRR an Bord von NOAA und, im Mikrowellenbereich, das SSM/I an Bord des DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) Verwendung.

Wegen der hohen Variabilität von Niederschlagsereignissen ist die zeitliche Auflösung der geostationären Satelliten von besonderer Bedeutung, demgegenüber bieten die polar umlaufenden Systeme höhere geometrische Auflösungen und decken einen größeren Teil der Erde, u.a. auch die hohen Breiten, ab. Die Mikrowellenradiometer haben gegenüber den VIS/IR-Instrumenten den Vorteil, daß sie nicht nur Wolkenoberflächenparameter erfassen, sondern die flüssigen oder festen Wasserteilchen innerhalb und unterhalb der Wolken selbst die Mikrowellenemission beeinflussen, und sie somit den Meßgegenstand direkt erfassen. Daher sind die physikalisch basierten Algorithmen zur Ableitung von Niederschlagsmengen aus Mikrowellenradiometerdaten, speziell dem SSM/I, in der Regel leistungsfähiger, als auf dem VIS/IR-Spektrum ansetzende Algorithmen.

Dennoch sind für viele Fragestellungen in den mittleren und hohen Breiten die geostationären VIS/IR-Radiometer wegen ihrer hohen zeitlichen Auflösung die einzig angemessene Sensorvariante, da bislang kein geostationärer Mikrowellenradiometer existiert. In jüngster Zeit wird in verschiedenen Studien der Versuch unternommen, Daten der geostationären Radiometer synergetisch mit den Daten polar umlaufender, VIS/IR- und Mikrowellenradiometer zu verknüpfen.

PETTY (1995[235]) kritisiert, daß Ergebnisse einer Vielzahl von Studien nur ungenügend validiert wurden. Die Resultate variieren sehr stark mit der Stärke der räumlichen und zeitlichen Mittelung, sowie der geographischen Lage des Anwendungsgebiets, so daß verschiedene Algorithmen eine starke regionale Bindung besitzen und wenig übertragbar sind. Die Validierung wird durch den Umstand erschwert, daß auch auf Regenmessern und Wetterradarsystemen beruhende Niederschlagsbestimmungen fehlerbehaftet sind, und somit eine „objektive“ Validierungsbasis nicht vorhanden ist (BARRETT 1997[13]). Mit Studien zur vergleichenden Beurteilung und Validierung unterschiedlicher Sensoren und Algorithmen befaßten sich die *Algorithm Inter-Comparison* Projekte (AIP) des *Global Precipitation Climatology* (GPCP) Projektes (LEE et al. 1991[182], EBERT 1996[79], BARRETT 1997[13]).

In diesen Studien bewegen sich die Korrelationen zwischen Abschätzungen aus geostationären Radiometerdaten (VIS/IR) und Referenzergebnissen aus Regenmessern oder Wetterradarsystemen, bei täglicher Mittelung, zwischen 0.4 und 0.7. Viele Algorithmen erreichen bei Monatssummen bessere Korrelationen (> 0.7), allerdings bei großen individuellen Abweichungen von zweifacher Unter- bis zu fünffacher Überschätzung. Bestimmungen auf Grundlage von Mikrowellenradiometern sind den VIS/IR-Methoden bei direkter Ableitung klar überlegen, zeigen jedoch bei Wochen- und Monatssummen, aufgrund der geringeren zeitlichen Auflösung, eine erheblich schlechtere Leistungsfähigkeit.

PETTY (1995[235]) stellt fest, daß VIS/IR-Methoden derzeit für Fragestellungen klimatischer Skalenbereiche (Wochen- oder Monatsmittel, 2° bis 5° Pixelgröße) und zur Erfassung konvektiver Niederschläge geeignet sind. Der Autor schätzt, daß unter diesen Voraussetzungen Korrelationen von 0.8 und größer erreicht werden können. Mikrowellenradiometer haben aus physikalischen Gründen Probleme bei der Erfassung von Niederschlägen aus warmen Wolken, VIS/IR-Sensoren sind zur Erfassung advektiver Ereignisse nur beschränkt geeignet (PETTY 1995[235]).

Somit läßt sich für den beschriebenen Themenkreis zusammenfassend festhalten:

- Niederschlagsbestimmungen auf Grundlage satellitengetragener Sensoren sind für regionale Skalenbereiche distributiver, hydrologischer Modellierungen nur begrenzt geeignet.

- Die methodischen Probleme bei advektiven und „warmen“ Niederschlägen, die grobe räumliche und zeitliche Auflösung und die großen Qualitätsschwankungen, v.a. bei Ableitung von Tages- oder sogar Stundenwerten, erschweren eine sinnvolle Anwendung.
- Es existieren weiterhin Probleme bei Algorithmen und Validierung.

So wird bislang, soweit vorhanden, in der Mehrzahl der hydrologischen und modellierungsorientierten Studien auf Daten von Bodenmeßnetzen zurückgegriffen.

2.2.7 Methoden der automatisierten Informationsextraktion durch rechnergestützte Klassifikation von Fernerkundungsdaten

Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen methodischen Ansätze im Bereich rechnergestützter, automatischer Klassifikation vorgestellt. Die Mehrzahl der Klassifikationsverfahren digitalen Bildmaterials basiert auf dem Maximum Likelihood (ML) Klassifikator. Dessen Anwendung kann als operationell bezeichnet werden. Aufgrund seiner Flexibilität und Leistungsfähigkeit (vgl. Kap. 5.2.2) findet er seit langem bei unterschiedlichsten inhaltlichen Fragestellungen Verwendung und gehört zum Standardumfang von Programmpaketen zur digitalen Bildverarbeitung. Probleme hinsichtlich seiner Anwendung bestehen bei Szenen, bzw. Klassen, deren Grauwerte sich nicht der Normalverteilung annähern, sowie bei Trainingsgebieten mit sich stark überlappenden spektralen Eigenschaften (CORTIJO & PEREZ DE LA BLANCA 1997[51]).

Zahlreiche Studien versuchen, die, mit diesen Problemen zusammenhängenden, ungenügenden Ergebnissen, mit Vor- und Nachbearbeitungsverfahren zu verbessern. Einen umfassenden Literaturüberblick, sowie einen eigenen methodischen Ansatz präsentiert GANGKOFNER (1996[114]). Die Autorin setzt bei der Ausweisung der Trainingsgebiete, sowie bei umgebungsbezogenen Nachbearbeitungen an und vergleicht die Ergebnisse der unterschiedlichen Verfahren. Verschiedene pixelbasierte Klassifikatoren bewerten vergleichend ZHUANG et al. (1995[309]) und CORTIJO & PEREZ DE LA BLANCA (1997[51]). COUSINS & ARNBERG (1998[53]) untersuchen verschiedene Klassifikatoren auf Bildmaterial unterschiedlicher Auflösungen. STEHMAN (1997[272]) widmet sich unterschiedlichen Methoden und Koeffizienten zur Genauigkeitsabschätzung von Klassifikationsergebnissen.

Eine gebräuchliche Methode der Daten- und Informationskompression vor automatischen Klassifizierungen stellen Hauptkomponententransformationen (PCT, *Principal Components Transformation*) dar (RICHARDS 1994[244]). In der Praxis werden, insbesondere bei multitemporalen Analysen, aus vielkanaligen Eingabedatensätzen häufig die Hauptkomponenten extrahiert und die hochwertigsten anschließend in den Klassifikationsprozeß aufgenommen. LARK (1995[173]) kritisiert dieses Vorgehen, er stellt in einer vergleichenden Studie fest, daß auch nachgeordnete Komponenten, mit geringen Eigenwerten, das Klassifikationsergebnis beeinflussen und daß deren Ausschluß zu einer Verschlechterung der Ergebnissgüte führt. PCTs können weiterhin zur Kontrastverstärkung (PALMER & JACOBSON 1995[226]) eingesetzt werden. HENEGBRY (1997[134]) entwickelt eine, auf Hauptkomponenten basierende, Methodik zur Erkennung von Nutzungsänderungen auf Grundlage von multitemporalen ERS-1-Daten.

Texturanalytische Verfahren berücksichtigen bei der Klassenzuweisung nicht nur die Spektralinformation eines Pixels, sondern beziehen räumliche Muster der Grauwertverteilung mit in den Entscheidungsprozeß ein. PALUBINSKAS et al. (1995[228]) vergleichen texturbasierte Klassifikationsergebnisse mit Resultaten auf Grundlage von ML-Klassifikationen. Datengrundlage bilden Landsat TM-Szenen des tropischen Regenwalds nördlich von Manaus in Brasilien. Die Autoren erreichen mit Textur-Klassifikatoren höhere Genauigkeiten als mit den pixelbasierten Ansätzen.

Auch SAR-Daten werden häufig mit texturbasierten Klassifikatoren bearbeitet (vgl. z.B. HENEGBRY & KUX 1995[135], MIRANDA et al. 1996[210]), ML-Klassifikatoren haben in diesem Anwendungsfeld oft Probleme mit der, durch den Speckle-Effekt verursachten, Grauwertverteilung (HABERMEYER & SCHMULLIUS 1997[130]). Ein, vor allem in Regionen kleinräumigen Texturwechsels wirksames, Texturmaß entwickeln CARLSON & EBEL (1995[41]) auf der Basis von größenveränderlichen *Co-Occurrence*-Matrizen. Als Nachbearbeitungsverfahren zur Verbesserung pixelbasierter Klassifikationsergebnisse finden texturanalytische Verfahren bei GROOM et al. (1996[127]) und KONTOES & ROKOS (1996[162]) Verwendung.

Zahlreiche Studien nutzen unterschiedliche Sensoren, um Synergieeffekte aus komplementären Spektralbereichen und Auflösungen zu erzeugen. Den Techniken der Datenfusion (*data fusion*) ist mittlerweile

eine Vielzahl von Publikationen gewidmet. WALD (1998[291]) gibt einen Überblick über Definitionen und Methoden der Data Fusion. Arbeiten von VAN DER MEER (1997[288]), WALD et al. (1997[292]) und MASCARENHAS et al. (1996[195]) beschreiben Methodiken zur Verschneidung von Daten unterschiedlicher Sensoren und Auflösungen und Möglichkeiten der Quantifizierung der, durch die Fusion entstehenden, Informationserosion. GARGUET-DUPORT et al. (1996[115]) und YOCKY (1996[305]) nutzen Waveletanalysen um geometrisch hochauflösende SPOT PAN Daten mit Multispektralinformation von SPOT XS und TM zu verschneiden. Einen Ansatz zur Mischpixelmodellierung aus Daten geometrisch unterschiedlich auflösender Fernerkundungsdaten entwickeln ZHUKOV & OERTEL (1996[310]).

Anwendungsorientierte Arbeiten zur synergetischen Nutzung von Satellitendaten aus dem optischen und dem Mikrowellenbereich beschreiben PALUBINSKAS (1996[227]), MANGOLINI & ARINO (1996[192]) und DUCROT et al. (1998[78]) für den Bereich der Agrarflächenklassifikation. Weitere Studien belegen den Nutzen einer derartigen Fusion zum Grünland-Monitoring (SMITH et al. 1995[263]) und zur Siedlungserfassung (NACEUR et al. [217]). Methodische Arbeiten auf Grundlage von flugzeuggetragenen Sensoren stellen BRISCO & BROWN (1995[36]), SAN MIGUEL-AYANZ (1996[254]) und MORAN et al. (1997[213]) vor.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung von Klassifikationsgütern ergibt sich aus der Integration von geographischer Zusatzinformation (*local knowledge*, z.B. Informationen zu Feldgrenzen, Fruchtfolgen, etc.) in den Klassifikationsprozeß (BRONSVELD et al. 1994[37]). Die technische Möglichkeit hierzu, entstand mit der Entwicklung der modernen Geoinformationssysteme. Studien zu wissensbasierter Klassifikation im GIS-Kontext präsentieren FOODY (1995[102]), ADINARAYANA & KRISHNA (1996[3]), GAHEGAN & FLACK (1996[113]), PALACIO-PRIETO & LUNA-GONZÁLES (1996[225]), HABERMEYER & SCHMULLIUS (1997[130]), HUANG & JENSEN (1997[144]), ORTIZ et al. (1997[224]), MOISEN et al. (1998[211]), APLIN et al. (1998[8]) und KIDD & LEMOINE (1998[155]).

Die Integration von Information unterschiedlicher Daten- und Skalenniveaus stellt eine methodische Herausforderung an die Klassifikatoren dar, die in der Lage sein müssen, diese Information zielgerichtet zu verarbeiten. In diesem Zusammenhang gewinnen seit einigen Jahren Ansätze „unscharfer Logik“ (*fuzzy logic*) und Neuronale Netzwerke (*neural nets*, NN) an Bedeutung, die, im Vergleich zum ML-Klassifikator, in statistischer Hinsicht flexibler und weniger restriktiv sind. PALUBINSKAS et al. (1995[228]) und WARNER & SHANK (1997[295]) wenden Fuzzy Logic-Klassifikationsansätze auf Landsat TM- und SPOT HRV-Daten an, DU & LEE (1996[74]) nutzen multipolarisierte Flugzeug-SAR-Daten um Landnutzung zu klassifizieren, bzw. Klassifikationsergebnisse zu verbessern. FOODY (1996[103]) entwickelt eine, auf Fuzzy-Theorie basierende, Methodik zur Mischpixelmodellierung grob auflösender Fernerkundungssensoren.

Neuronale Netzwerke kamen in unterschiedlichen Fragestellungen und auf Grundlage unterschiedlicher Daten- und Informationsquellen zur Anwendung: Auf Grundlage von CASI-Daten klassifizieren SCHAALE & FURRER (1995[255]) Landnutzung mit Hilfe eines unüberwachten, selbstorganisierenden Neuronalen Netzwerks. CHEN et al. (1995[47]) entwickeln ein Netzwerk mit ähnlichem inhaltlichem Anspruch, methodisch aber verschiedenem Zugang und testen dessen Leistungsfähigkeit anhand von SPOT-Daten (CHEN et al. 1995[47]) und Radardaten (CHEN et al. 1995[46]). Weitere Neuronale Netze zur Klassifikation von Landoberflächen entwickeln für SAR-Daten FOODY (1995[102]) und WANG & DONG (1997[294]). KAMINSKY et al. (1997[147]) erstellt ein auf Texturparametern aufsetzendes Netz, BRUZZONE et al. (1997[39]), SKIDMORE et al. (1997[262]) und MURAI & OMATU (1997[215]) integrieren geographische Zusatzinformation. PAOLA & SCHOWENGERDT (1997[229]) testen, im Kontext von Landnutzungsklassifikationen aus optischen Satellitendaten, mehrere Netzwerk-Algorithmen und vergleichen deren Arbeitsweise und Leistungsfähigkeit. KANELLOPOULOS & WILKINSON (1997[148]) geben methodische Hinweise zu Training und Aufbau von Neuronalen Netzen zur Landoberflächenklassifikation. FOODY & ARORA (1997[104]) untersuchen verschiedene, die Qualität von NN-Klassifikationen beeinflussende, Faktoren. Die Anwendbarkeit von *Decision Tree*-Methoden im Bereich wissensbasierter, fernerkundungsgestützter Landnutzungsklassifikation belegen FRIEDL & BRODLEY (1997[106]).

Zusammenfassend läßt sich für den sehr heterogenen Methodikbereich feststellen:

- Lediglich die parametrischen (z.B. Maximum Likelihood, Minimum Distanz, Mahalanobis Distanz) und nicht-parametrischen (z.B. Feature Space orientiert, Parallelepiped) Standardklassifikatoren sind hinsichtlich Arbeitsweise und Anwendung als operationell zu bezeichnen. Sie sind Bestandteil aller professionellen Bildverarbeitungssysteme und stehen somit einem breiten Anwenderkreis zur Verfügung.

- Fuzzy-Algorithmen und Neuronale Netzwerke stehen im Augenblick an der Schwelle zur operationellen Anwendbarkeit. Erfahrungen bestehen in zahlreichen spezialisierten Arbeitsgruppen, der Schritt in die Breite der anwendungsbezogenen Forschung steht gleichwohl noch aus. Die Ansätze sind nach wie vor sehr heterogen. Die Ergebnisse unterscheiden sich je nach Vorverarbeitungen (Training), Fragestellung und Eingangsdaten noch erheblich.
- Die Beurteilung der Ergebnisgüten, vor allem im Vergleich zu den als operationell anzusprechenden, „klassischen“ ML-Klassifikationen, bereitet methodisch große Schwierigkeiten, da u.a. sowohl die Signaturanalyse im Vorfeld einer überwachten ML-Klassifikation, als auch das Training eines unscharfen Ansatzes, bzw. eines Neuronalen Netzwerks, stark subjektive Komponenten enthält. Deren Wirkung kann sich im Verlauf der unterschiedlichen methodischen Verarbeitung potenzieren und ist in jedem Fall kaum zu quantifizieren.
- Generell erscheinen die neuen Methoden durch ihre Flexibilität im Hinblick auf Grauwertverteilungen und ihre Fähigkeit unterschiedliche Datenniveaus zu integrieren, für eine Vielzahl anwendungsbezogener, geowissenschaftlicher Fragestellungen, als interessante Alternative zu den etablierten Klassifikationsverfahren.
- Texturanalytisch kommen ebenfalls sehr unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Zwar existiert eine Reihe von Standardtexturmaßen, deren konkrete Anwendung wird allerdings stark von der Fragestellung, den Eingangsdaten und deren räumlicher Auflösung bestimmt.
- Die Zahl der, Sensorynergien und geographische Zusatzinformationen nutzenden, Studien wächst, so daß zu erwarten ist, daß sich das große Bündel vorhandener Techniken weiter in Richtung operationeller Methoden entwickelt.

2.3 Forschungsbedarf

Anwendungsbezogene geowissenschaftliche Forschung erfordert die integrative Zusammenarbeit sehr unterschiedlicher Forschungsgebiete. Die physikalisch ausgerichtete Fernerkundungsgemeinde, die Seite der anwendungsbezogenen Informatik und Mathematik, sowie schließlich die an „Real World“-Problemen arbeitenden Geowissenschaftler und Hydrologen sind in ihren Fachgebieten methodisch hoch spezialisiert. Im Austausch bestehen hier z.T. noch Verständigungsprobleme, die mit den unterschiedlichen Sichtweisen und Prioritäten der verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen zusammenhängen.

In der Vergangenheit arbeiteten zahlreiche Sensorik- und Fernerkundungsgruppen, überspitzt formuliert, im anwendungsfreien Raum, auf der anderen Seite wurden im geowissenschaftlichen Forschungsumfeld die Möglichkeiten der Fernerkundung und deren methodisches Potential nur unzureichend erkannt und genutzt. Zahlreiche wissenschaftspolitische Initiativen versuchen in neuerer Zeit dieses Defizit zu beseitigen, z.B. das europäische CEO-Programm (EUROPEAN COMMISSION 1997[90]), das eindeutig auf die Förderung der anwendungsbezogenen Nutzung von Fernerkundungsdaten ausgerichtet ist.

Die Resolutionen des 18. IGPF-Kongresses (*Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*) 1996 in Wien fassen Forschungsstand und -bedarf in verschiedenen, für diese Arbeit relevanten, Bereichen zusammen. Zwar sind seit der Formulierung zwei Jahre vergangen, gleichwohl hat die Mehrzahl der Thesen nichts an Aktualität verloren.²

In der Resolution I.6 (Mikrowellensensoren) heißt es:

„Der Kongreß erkennt, daß optische sowie aktive Mikrowellen-Fernerkundungstechnologien komplementär sind, er empfiehlt, daß Gruppen aus beiden Bereichen zusammenarbeiten, um Vorteile aus der Kombination beider Technologien zu ziehen und daß die Genauigkeit von SAR-Interferometrie weiter untersucht wird“.

²Die Resolutionen sind der Online-Dokumentation des 18. Kongresses der IGPF/ISPRS (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) entnommen:

http://www.geod.ethz.ch/isprs/documents/resolutions_vienna/vienna_resolutions_ger.html

Die ISPRS WWW-Adresse lautet:

<http://www.geod.ethz.ch/isprs/isprs.html>

(Stand August 1998).

In Resolution I.4 (Systeme für die Verarbeitung von Radar-Daten) empfiehlt der Kongreß „*verstärkte Konzentration auf die Entwicklung von Algorithmen für die Integration von SAR-Daten und anderen Daten*“, „*Bereitstellung von Information über SAR, um es für Endbenutzer besser zugänglich zu machen*“ und das „*Anbieten von nutzerfreundlichen SAR-Systemen und Software*“.

Desweiteren wird in Resolution III.5 (Theorie und Algorithmen für SAR) empfohlen, „*daß Theorie und Algorithmen für SAR studiert und entwickelt werden, besonders auf dem Gebiet von Interferometrie und Merkmalsextraktion*“.

In Resolution VII.1 (Nutzung von Fernerkundung für physikalische Messungen und Signaturen) stellt der Kongreß „*ein wachsendes Nutzerinteresse an der Mikrowellenfernerkundung*“ fest und empfiehlt „*daß Radar- und andere Fernerkundungsaspekte (...) verstärkt beachtet werden*“.

Die Notwendigkeit, „*die mögliche Nutzung von SAR-Daten für Nutzer verschiedener Anwendungsfelder zu klären*“ wird in Resolution VII.2 (Überwachung von Ressourcen und Umwelt mittels SAR) herausgestellt. Außerdem wird „*die Einrichtung eines Informationsnetzes für SAR Charakteristik, Datenanalysemethodik usw.*“ und „*die Auswahl von Fallstudien für Nutzung von Daten derzeitiger Mikrowellenfernerkundungssatelliten*“ empfohlen.

In Resolution II.5 (Integrierte Produktionssysteme für GIS) wird die „*verstärkte Nutzung von Daten aus einem weiten Spektrum von Sensoren, um besondere Aufgaben zu lösen*“ und der „*Entwurf spezieller Systeme um entsprechende Aufgabenstellungen zu bearbeiten*“ festgestellt. Gleichzeitig wird die „*Notwendigkeit, den Entwurf solcher Systeme durch Nutzung von marktgängiger Hardware, Software und Datenaustausch sowie Verteilungsmechanismen zu erleichtern*“ betont. Auf den „*Bedarf an fortgesetztem Informationsaustausch zwischen Spezialisten, Praktikern und Herstellern auf diesem Gebiet*“ wird hingewiesen. Empfohlen wird: „*Daß die derzeitigen Arbeiten auf dem Gebiet integrierter Geoinformations-Produktionssysteme ihr Spektrum erweitern, um Entwicklung und Test von Produktionssystemen einzubeziehen sowie um Satelliten- und Luftbilddaten zu integrieren mit dem Ziel, anwendungsbezogene Probleme auf dem Gebiet des Umweltmonitorings und -managements zu lösen*“.

In Resolution III.4 (Konzeptionelle Aspekte von GIS) wird „*die weitere Entwicklung von Konzepten sowie Theorie für räumliche Datenmodellierung und Handhabung räumlicher Daten*“ empfohlen.

Aus der Literaturdiskussion sowie den Feststellungen und Empfehlungen der IGPF läßt sich zusammenfassend festhalten: Aktuell besteht Forschungsbedarf im Bereich der Methodenentwicklung zur synergetischen Nutzung von

- (i) Fernerkundungsdaten unterschiedlicher spektraler und geometrischer Auflösungen,
- (ii) Heterogener GIS-Information als Basis von Wissensimplementation in automatische Klassifikationsabläufe, sowie
- (iii) Deren mathematischer Umsetzung innerhalb von integrierten Programmsystemen und
- (iv) Der Nutzung von dergestalt extrahierter Information zur Parameterisierung und Validierung physikalisch basierter Oberflächenmodelle.

Im einzelnen erscheinen folgende Forschungsschwerpunkte und -arbeiten derzeit besonders relevant:

- Aufbau methodischer Werkzeuge zur Integration von geographischer Zusatzinformation, wie z.B. Hangneigung, Höhe und Exposition, Fruchtwechsel und phänologische Kalender, Feldgrenzen, Nachbarschaft, Lokalklima. Hierbei kann es sich sowohl um Verfahren der Vorbereitung und Nachbearbeitung von Klassifikationen, als auch um direkte Informationsverwertung im eigentlichen Klassifikationsprozeß handeln.
- Entwicklung von Verfahren zur integrativen Nutzung pixelbasierter und textueller Klassifikatoren.
- Bereitstellung von Werkzeugen zur synergetischen Verarbeitung von VIS/IR und Mikrowellendaten und zur Verknüpfung von Daten unterschiedlicher Skalenbereiche.
- Weitere Untersuchung des Anwendungspotentials von Mikrowellendaten in reliefiertem Gelände, die Mehrzahl der publizierten Studien arbeitet nach wie vor in ebenen Validierungsgebieten.

- Untersuchung des Potentials der interferometrischen Kohärenzinformation für geowissenschaftliche Fragestellungen und weitere Grundlagenstudien zu den, das Kohärenzverhalten unterschiedlicher Oberflächen beeinflussenden, Parametern.
- Nutzung der komplementären Informationsschichten Kohärenz und Rückstreuintensität.
- Vertiefung des Verständnisses der Wechselwirkung von Mikrowellenreflexion, bzw. -emission und Substrat/Vegetation, sowie deren mathematische Formulierung zur quantitativen Bestimmung von Oberflächenparametern (Feuchte, Biomasse, Rauigkeit). Hierzu sind, auch im Hinblick auf die kommenden, Multipolarisations- und Multifrequenzsysteme, umfangreiche Geländevalidierungen notwendig.

Um die, in den Einzeldisziplinen weit fortgeschrittenen, Erkenntnisse in die Breite anwendungsbezogener, geowissenschaftlicher Fragestellungen zu projizieren, ist die Entwicklung und Implementation von robusten Verfahren notwendig, die auch dem Nicht-Spezialisten sinnvolle Anwendungsperspektiven bieten. Im hydrologisch-modellierungsorientierten Forschungsumfeld werden hierzu folgende Forschungsschwerpunkte bearbeitet:

- Validierung und Qualitätsbestimmung der aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten Parameter.
- Konzeptionelle Untersuchungen zur Synergie von Modelleingangsparametern aus Fernerkundungsdaten und aus Bodenmessungen sowie Kosten-/Nutzenabschätzungen.
- Entwicklung operationeller Methoden zur Integration von Fernerkundungsdaten in die Parameterisierung und Validierung von physikalisch-basierten Modellen.
- Nutzung von Fernerkundungsdaten zur Aktualisierung vorhandener GIS-Datenschichten und Monitoring.
- Bestimmung der notwendigen spektralen, geometrischen und zeitlichen Auflösungen für spezifische, hydrologische Fragestellungen.

Die Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit ordnen sich dem formulierten Forschungsbedarf in unterschiedlicher Gewichtung zu (vgl. Kap. 3).

2.4 Theoretische Grundlagen

Der folgende Abschnitt 2.4.1 beschreibt die genutzten Sensoren und deren Datenprodukte. Anschließend werden Arbeitsweise und Charakteristik abbildender Radarsysteme vorgestellt (Kap. 2.4.2). Auf die Darstellung der Aufnahmeprinzipien optischer Satellitensysteme wurde verzichtet, da diese in der geographischen Forschung mittlerweile eine lange, umfassend dokumentierte Tradition besitzen und zu Standardarbeitsmitteln geworden sind. Abschließend werden in Abschnitt 2.4.3 einige, häufig wiederkehrende Begrifflichkeiten aus dem Umfeld spektraler Klassifikationen geklärt.

2.4.1 Satellitensysteme

Mit dem Start des ersten LANDSAT im Jahre 1972 stand der Nutzergemeinde mit dem *Multispectral Scanner* (MSS) ein, im optischen Bereich arbeitender, Sensor zur Verfügung, der bis heute, in seiner aktuellen Version an Bord von LANDSAT 5, Daten liefert. Einen Anwendungsschub initiierte der *Thematic Mapper* (TM), der mit LANDSAT 4 (1982) gestartet wurde und eine bessere geometrische, spektrale und radiometrische Auflösung besitzt (vgl. Kap. 2.4.1.1).

Seit 1986 befindet sich der französische SPOT im Orbit, der, gegenüber dem Thematic Mapper, zwar über eine schlechtere spektrale Auflösung verfügt, dessen geometrische Auflösung aber im panchromatischen Modus 10 m und im Multispektralmodus 20 m beträgt und der daher einen erheblichen Fortschritt darstellt. Hinzu kommt die Möglichkeit den Sensor zu schwenken und somit eine höhere Repetitionsrate

zu erhalten. Weiterhin eröffnen sich über die Aufnahme von Stereobildpaaren weitere interessante Anwendungsmöglichkeiten, beispielsweise die photogrammetrische Erstellung von Digitalen Geländemodellen (DGMs).

Den aktuellen Stand der optischen Satellitenfernerkundung repräsentiert der indische IRS 1-C Satellit, der im panchromatischen Modus 5 m und im Multispektralmodus (LISS-3) 25 m geometrische Auflösung erreicht. Außerdem verfügt er über einen räumlich grob auflösenden (180 m) Sensor, der Informationen aus dem roten und nahen Infrarot sammelt und bei einer Streifenbreite von 774 km alle fünf Tage dasselbe Gebiet aufzeichnen kann.

In den letzten zehn Jahren erhalten die ursprünglich v.a. für marine Anwendungen vorgesehenen, aktiv arbeitenden, Radarsatelliten erhöhte Aufmerksamkeit auch für terrestrische Anwendungen. Der erste Satellit mit einem *Synthetic Aperture Radar* (SAR) war der 1978 gestartete amerikanische SEASAT. Es folgten nach verschiedenen Shuttle-Missionen (SIR-A, SIR-B, SIR-C/X-SAR). ERS-1, JERS-1, ERS-2 und der kanadische RADARSAT. Die Radarfernerkundung findet derzeit bereits starkes Anwenderinteresse und wird möglicherweise in Zukunft, mit multifrequenten oder multipolarisationsfähigen Sensoren (z.B. ENVISAT), den optischen Systemen bei der Bearbeitung vieler Fragestellungen überlegen sein. Am Beispiel der Interferometrie-Anwendungen, z.B. im Zusammenhang mit der ERS-1/2 Tandem Mission (DUCHOSSOIS 1996[75]), werden exemplarisch die Relevanz und das enorme Entwicklungspotential der Mikrowellenfernerkundung deutlich.

Im Gegensatz zu den genannten, geometrisch hoch auflösenden Sensoren, haben die, für meteorologische und klimatologische Anwendungen ausgelegten, „Wettersatelliten“ eine wesentlich grobere räumliche, aber höhere zeitliche Auflösung. Grundsätzlich sind die geostationären Systeme von den, in niedrigerer Höhe polar umlaufenden, Satelliten zu unterscheiden. Wichtigste Vertreter sind METEOSAT und Pendants, die bis zu fünfzehnminütig aufzeichnen (ca. 5 km geometrische Auflösung, drei Spektralkanäle im optischen und thermalen Infrarotbereich) sowie NOAA mit seinem *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), welches in der aktuellen Version fünf Wellenlängenbereiche im sichtbaren Licht und im Infrarot mit einer täglichen Repetitionsrate aufnimmt (1.1 km geometrische Auflösung).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Daten des Landsat TM und der ERS-1/2 Satelliten ausgewertet. Diese Systeme werden im folgenden detaillierter vorgestellt.

2.4.1.1 Das LANDSAT-System

Der erste Satellit des amerikanischen LANDSAT-Programms wurde 1972 gestartet. Seitdem liefern die Sensoren kontinuierlich Bildmaterial. Kernstück der ersten Satellitengenerationen waren das *Return Beam Vidicon* (RBV), ein dem Aufnahmeprinzip nach videokameraähnliches System, und der *Multispectral Scanner* (MSS). Der MSS hat eine geometrische Auflösung von $79 \cdot 79 \text{ m}^2$ und verfügt über zwei Spektralkanäle in den Bereichen des sichtbaren Lichts und zwei weitere im Bereich des nahen Infrarots. Die radiometrische Auflösung beträgt 7 bit (128 Grauwerte) für die drei kurzwelligen Kanäle und 6 bit (64 Grauwerte) für den langwelligeren der NIR-Kanäle. Mit LANDSAT 3 (1978) kam noch ein thermaler Infrarotkanal mit einer geometrischen Auflösung von $237 \cdot 237 \text{ m}^2$ hinzu.

Ab 1982 wurde mit dem Start von LANDSAT 4 eine neue Sensorgeneration eingeführt: Der *Thematic Mapper* (TM). Dieser opto-mechanische Scanner trug den gestiegenen Anforderungen der Nutzergemeinde mit einer neuen Qualität spektraler, radiometrischer und geometrischer Auflösung Rechnung. 1993 wurde LANDSAT 6 mit einem, um einen panchromatischen Kanal mit 15 m Bodenauflösung erweiterten, *Enhanced Thematic Mapper* (ETM) gestartet, zu dem Satelliten konnte jedoch, nach erfolgreichem Start, kein Kontakt aufgenommen werden. Tabelle 2.1 faßt die wesentlichen Eckwerte des LANDSAT-Systems zusammen.

Landsat Thematic Mapper-Daten

Der Thematic Mapper zeichnet in sieben schmalbandigen Spektralbereichen auf (vgl. Tab. 2.2). Die Kanäle eins bis drei liegen im Bereich des sichtbaren Lichts, Kanal 1 kann sinnvoll im Monitoring von Küstengewässern, zur Differenzierung von Laub-/Nadelwäldern und Boden/Vegetation Verwendung finden, ist allerdings sehr dunstanfällig. Kanal 2 liegt im Maximum der Grünreflexion und liefert z.B. Informationen über den Vegetationszustand, der Kanal 3 im Minimum der Chlorophyllreflexion gibt Auskunft über

Tabelle 2.1: Das LANDSAT-System

Orbit Parameter für LANDSAT 4 und 5	
Orbit	: Polar, sonnensynchron (absteigender Äquatorüberflug 09:30 Uhr local time)
Bahn-Inklination	: 99°
mittlere Flughöhe	: 705 km
Umlaufzeit	: 98.9 Minuten
Wiederholrate	: 16 Tage (14.56 Umrundungen pro Tag bei 233 Umläufen)
Bildformat TM	: 185 · 170 km ² (Vollszene)

die Vegetationsart. Für Vegetationsanalysen von größter Bedeutung ist der, im Bereich der maximalen Chlorophyllreflexion gelegene, Kanal 4. Er ermöglicht eine Differenzierung nach Biomassen, Vegetationstypen und Vegetationszustand. Da Wasser nahes Infrarot nahezu komplett absorbiert, kann er ebenfalls zur Abgrenzung von Wasserkörpern genutzt werden. Die Kanäle 5 und 7 decken unterschiedliche Wasserabsorptionsbereiche ab, Kanal 5 liefert Informationen zum Wassergehalt von Vegetation, Bodenfeuchtigkeit und ermöglicht die Differenzierung von Wolken und Schnee. Kanal 7 findet häufig in der Geologie, zur Abgrenzung lithologischer Einheiten, Verwendung. Kanal 6 zeichnet die Oberflächenemission thermalen Infrarots auf und ermöglicht so die Ableitung von Oberflächentemperaturen (BÄHR & VÖGTLE 1991[11], RICHARDS 1994[244], DÖRFFLER 1994[72]).

Tabelle 2.2: Der Thematic Mapper

Spektralbänder [μm]	GA [†] [m ²]	DR [‡] [bits]
1 : 0.45–0.52 (blau)	30 · 30	8
2 : 0.52–0.60 (grün)	30 · 30	8
3 : 0.63–0.69 (rot)	30 · 30	8
4 : 0.76–0.90 (nahes Infrarot)	30 · 30	8
5 : 1.55–1.75 (mittleres Infrarot)	30 · 30	8
7 : 2.08–2.35 (mittleres Infrarot)	30 · 30	8
6 : 10.4–12.5 (thermales Infrarot)	120 · 120	8

[†] GA: Geometrische Auflösung

[‡] DR: Dynamic Range

2.4.1.2 ERS-1 und ERS-2

Der ERS-1 (European Remote-Sensing Satellite) wurde 1991 gestartet. Er trägt ein *Active Microwave Instrument* (AMI) das als SAR und Windscatterometer betrieben werden kann, ein *Radar Altimeter* (RA), ein *Along-Track Scanning Radiometer* (ATSR), das *Precise Range and Range-rate Equipment* (PRARE) und einen Laser Retroreflector. Der Nachfolger ERS-2 wurde 1995 gestartet und trägt zusätzlich das *Global Ozone Monitoring Experiment* (GOME) Instrument (FRANCIS et al. 1995[105], DUCHOSSOIS & ZOBL 1995[77]). Tabelle 2.3 stellt einige Sensorparameter zusammen.

Die ERS SAR-Datenprodukte werden von Prozessoren bei der ESA/ESRIN (C-PAF) und folgenden, nationalen *Processing and Archiving Facilities* (PAFs) generiert:

- Der deutschen PAF in Oberpfaffenhofen (D-PAF),
- Der italienischen PAF (I-PAF) und
- Der britischen PAF (UK-PAF).

In der vorliegenden Arbeit wurden *Precision* (PRI) und *Single Look Complex* (SLC) SAR Image Mode-Daten des AMI ausgewertet. Deren charakteristische Merkmale werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Tabelle 2.3: ERS AMI SAR Image Mode-Parameter

Orbit	Polar, sonnensynchron (Äquatorüberflug 10:30 local time)
Bahn-Inklination	98.5°
mittlere Flughöhe	785 km
Wiederholrate	unterschiedlich je nach Mission, zwischen 3 und 35 Tagen
Wellenlänge	0.057 m (C-Band)
Frequenz	5.3 GHz
Polarisation	VV
Einfallswinkel	23°
Streifenbreite	100 km

ERS PRI-Daten

Die Precision-Daten sind *3-look* prozessiert und *ground range* projiziert (vgl. Kap. 2.4.2). Sie weisen in reliefiertem Gelände zwar mitunter erhebliche geometrische Verzerrungen auf (*layover*- und *foreshortening*-Effekte), die Intensitätswerte sind aber nicht, wie bei den GEC und GTC Daten (vgl. BATTRICK (1993[15])), durch bilineare Resamplingverfahren verändert und können als solche zur Berechnung von Rückstreukoeffizienten herangezogen werden. Diese Rückstreukoeffizienten erlauben methodisch den direkten Vergleich mit Geländemesswerten und können somit in geophysikalischen Modellierungsverfahren Verwendung finden. Tabelle 2.4 faßt die wesentlichen Eckwerte der PRI-Daten zusammen.

Tabelle 2.4: ERS PRI-Daten

Projektion	ground range
Pixelausdehnung in Range-Richtung	12.5 m
Pixelausdehnung in Azimut-Richtung	12.5 m
Szenenausdehnung in Range-Richtung	ca. 100 km
Szenenausdehnung in Azimut-Richtung	ca. 102.5 km
geometrische Auflösung (in Range und Azimuth)	ca. 30 m
Pixel in Range-Richtung	8000
Pixel in Azimuth-Richtung	8200
Radiometrische Auflösung	16 bit
Produktumfang	ca. 131 Mbyte
Anzahl prozessierter looks	3

Die radiometrische Charakteristik dieser Daten läßt sich wie folgt beschreiben:

- Die Pixelwerte sind proportional zur Quadratwurzel der Intensität.
- Die Intensitätswerte sind proportional zum Radarrückstreuquerschnitt β^0 .
- β^0 ist proportional zum Rückstreukoeffizienten σ^0 geteilt durch den Sinus des lokalen Einfallswinkels eines beliebigen Pixels (vgl. Kap. 5.3.1.2).
- Das Produkt ist *in-flight elevation antenna pattern*-korrigiert.
- Der *range spreading loss* ist kompensiert.

In Kapitel 2.4.2 wird genauer auf die Bedeutung der einzelnen Parameter eingegangen.

Tabelle 2.5: ERS SLC-Daten

Projektion	slant range
Pixelausdehnung in Range-Richtung	7.904 m
Pixelausdehnung in Azimut-Richtung	3.974 m
Szenenausdehnung in Range-Richtung	ca. 20 km
Szenenausdehnung in Azimut-Richtung	ca. 62 km
Pixel in Range-Richtung	2500
Pixel in Azimuth-Richtung	ca. 15500
Radiometrische Auflösung	16I, 16Q complex
Produktumfang	ca. 150 Mbyte
Anzahl prozessierter looks	1

ERS SLC-Daten

Die Single Look Complex-Daten sind 1-look prozessiert und liegen in Slant Range-Geometrie vor. Sie werden in komplexem Zahlenformat, nach Real- und Imaginärteil des Signals getrennt, ausgeliefert, d.h. die Phaseninformation ist, im Gegensatz zu den PRI-Daten, noch erhalten. Dies ist für eine interferometrische Verarbeitung zwingende Voraussetzung (vgl. Kap. 2.4.2.3). Die Daten erlauben ebenfalls die Berechnung von Intensitätsbildern. Diese sind zwar durch die 1-look Prozessierung stärker „verspeckelt“ als die PRI-Datensätze, konservieren aber die volle geometrische Auflösung des Systems. Die Szenen decken in Ground Range-Geometrie etwa ein Viertel einer PRI-Vollszene ab. Tabelle 2.5 beschreibt die wesentlichen Charakteristika der SLC-Daten.

2.4.2 Eigenschaften abbildender Radarsysteme

In der Fernerkundung eingesetzte Mikrowellensensoren lassen sich grundsätzlich in aktive und passive Systeme gliedern. Passive Sensoren messen die, für Landoberflächen extrem geringe, Energiemenge der von Objekten natürlich emittierten Mikrowellenstrahlung. Die geometrischen Auflösungen dieser Systeme reichen für Untersuchungen regionalen Maßstabs in der Regel nicht aus. Demgegenüber senden aktive Mikrowellensysteme elektromagnetische Wellen aus und messen den zur Antenne zurückgelangenden Anteil. Dem Aufnahmeprinzip nach lassen sich bei den aktiven Verfahren solche mit *realer Apertur* (Real Aperture Radar, RAR) von Systemen mit *synthetischer Apertur* (Synthetic Aperture Radar, SAR) unterscheiden. Bei ersteren ist die geometrische Auflösung unter anderem von der Distanz der Sende- und Empfangseinheit zum beleuchteten Objekt abhängig. Sie werden daher in der Regel von Flugzeugen aus eingesetzt (Side Looking Airborne Radar, SLAR). Orbitalsysteme nutzen synthetische Aperturen (RICHARDS 1994[244], HOCHSCHILD 1995[139]). SLAR und SAR werden auch als abbildende Radarsysteme bezeichnet, da das eingesetzte Seitensichtverfahren Grautonbilder erzeugt, die das Rückstreuverhalten der Elemente an der Erdoberfläche flächenhaft repräsentieren (BAYER 1990[17]). Zu den nicht-abbildenden Systemen zählen Scatterometer und Altimeter (ELACHI 1988[82]).

Im Rahmen dieser Arbeit soll kein allgemeiner Überblick über die Arbeitsweise von Mikrowellensensoren und die, das Radarsignal beeinflussenden Faktoren gegeben werden. Hierzu kann auf die Standardwerke von ULABY et al. (1981[285], 1982[286], 1986[287]) verwiesen werden. Komprimierte Darstellungen sind z.B. in BAYER (1990[17]) und HOCHSCHILD (1995[139]) enthalten. Im folgenden werden lediglich Grundlagen und Zusammenhänge erläutert, die mit der erfolgten Datenauswertung in direktem Bezug stehen.

2.4.2.1 SAR-Aufnahmeprinzip und systemeigene Parameter

Von der Sende-/Empfangseinheit (S/E) werden kurze, kohärente Mikrowellenpulse senkrecht zur Azimutrichtung schräg nach unten abgestrahlt. Die Strahlenkeule trifft auf die Oberfläche, die Wellen werden gestreut, reflektiert und absorbiert. Der Empfänger des Systems mißt die zurückkehrende Energie und die Laufzeit des Signals. Die Intensität des Rückstreusignals an der Empfangsantenne hängt von der Sendeleistung, der Antennenverstärkung, der Wellenlänge, der Distanz S/E-Objekt, der Fläche des beleuchteten

Objekts und dessen Rückstreuereigenschaften ab. Als Funktion läßt sich der Zusammenhang wie folgt darstellen (ULABY et al. 1982[286]):

$$\bar{P}_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)} \underbrace{\int \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \sigma^0 \cdot dA}{R^4}}_{\text{beleuchtete Fläche}} \quad (2.1)$$

wobei:

- \bar{P}_r : gemittelte Signalstärke am Empfänger,
- P_t : gesendete Signalstärke,
- G : Antennenverstärkung,
- λ : Wellenlänge,
- R : Distanz Antenne–Objektfläche,
- A : beleuchtete Fläche,
- σ^0 : mittlerer Rückstreuquerschnitt der Objekte in A .

Die Formel 2.1 wird auch als Radargleichung bezeichnet und liefert die fundamentale Beziehung zwischen Systemparametern, Objekteigenschaften und dem empfangenen Signal. Für die inhaltliche Auswertung von SAR-Daten ist vor allem der objektspezifische Rückstreuoeffizient σ^0 von Bedeutung (vgl. Kap. 5.3.1.2). Er stellt einen Flächenmittelwert der Rückstreuquerschnitte aller von der Radarkeule erfaßten Einzelobjekte dar (BAYER 1990[17]) und hängt von der Richtung der einfallenden Wellen, der Geometrie der beleuchteten Flächen und deren dielektrischen Eigenschaften ab.

Geometrische Auflösung

Die geometrische Auflösung des Systems wird in Azimut- und Range-Richtung von unterschiedlichen Parametern beeinflusst. Quer zur Flugrichtung („in range“) bestimmen Dauer und Frequenz der kohärenten Radarpulse, sowie der Sensordepressionswinkel die erreichbare Bodenauflösung. Nimmt die Impulsdauer ab, so erhöht sich die räumliche Auflösung. Einer theoretisch ins Unendliche zu steigernden Auflösung steht die Tatsache entgegen, daß sich mit abnehmender Pulsdauer auch die Energie verringert und sich somit das Signal/Rausch-Verhältnis verschlechtert. Um ein optimales Pulsleistungs-/Pulsdauer-Verhältnis zu realisieren emittiert das ERS-SAR keinen gleichförmigen Puls, sondern ein linear-frequenzmoduliertes Signal (CHIRP, Coherent Integration of Radar Pulses). Die empfangenen Echos dieser CHIRPs lassen sich bei der Prozessierung der Daten im Rahmen einer Frequenzanalyse (Pulskompression) dem entsprechenden Puls und seinem zeitlichen Verlauf zuordnen. So geht geometrische Auflösung nicht dadurch verloren, daß benachbarte Objekte Signale mit gleicher Frequenz zurücksenden (KEYDEL 1991[154], HOCHSCHILD 1995[139]).

Die Auflösung in Flugrichtung („Azimut“) wird im wesentlichen durch die Entfernung S/E–Objekt und die Antennenlänge bestimmt. Da die Flughöhe orbitaler Systeme sehr hoch ist und sich die Antennenlänge aus physikalischen Gründen nicht beliebig verlängern läßt, erreicht man hohe geometrische Azimutaufösungen mit Satellitensystemen nur durch eine „Antennensynthesierung“. Dem Prinzip nach wird durch die Flugbewegung des Sensors eine längere, synthetische Antenne simuliert. Hierbei macht man sich den Umstand zunutze, daß bei einer breiten Strahlenkeule jedes Objekt der Erdoberfläche bei einem Überflug mehrfach erfaßt wird. Die kohärente Natur der Signale, sowie der bekannte zeitliche Verlauf der Pulssende- und Empfangssequenzen erlauben später eine phasenkorrigierte Verarbeitung, da die verschiedenen Einzelechos eines Bodenobjekts mit Hilfe der Dopplerfrequenzen der zurückgestreuten Wellen zu trennen sind. Die Länge der synthetischen Antenne ist für ein beleuchtetes Objekt gegeben durch die Strecke, die der Sensor zurücklegt während das Objekt im Bereich der Strahlbreite der Mikrowellen liegt. Somit wird die Azimutauflösung entfernungsunabhängig, da mit zunehmender Distanz S/E–Objekt bei konstantem Abstrahlwinkel auch die Länge der synthetischen Antenne wächst. Theoretisch lassen sich in Azimutrichtung geometrische Auflösungen von der halben Länge der physikalischen S/E-Antenne erreichen (ALBERTZ 1991[6], KEYDEL 1991[154], BAYER 1990[17]).

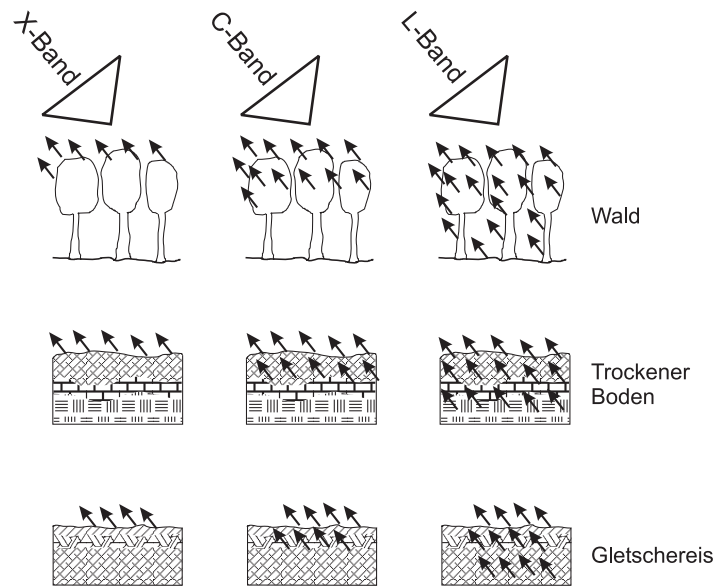


Abbildung 2.1: Eindringvermögen von Radarwellen (nach BAYER 1990[17]).

Wellenlänge

Das SAR der ERS-Satelliten arbeitet im C-Band, d.h. mit einer Wellenlänge von 5.6 cm entsprechend einer Frequenz von 5.3 GHz. Die Wellenlänge beeinflusst die Art der Interaktion der elektromagnetischen Wellen mit den Oberflächenobjekten entscheidend, indem sie

- Den Anteil der Streuung an den Objektflächen,
- Die Eindringtiefe und Signaldämpfung im Medium (z.B. Boden, Vegetation) und
- Den Anteil der Volumenstreuung (vgl. Kap. 2.4.2.2)

mitbestimmt (BAYER 1990[17]).

Generell steigt das Eindringvermögen von Mikrowellen in Oberflächenmaterialien mit der Wellenlänge. Abbildung 2.1 visualisiert beispielhaft das Verhalten von X-Band (3 cm), C-Band (6 cm) und L-Band (23 cm) Wellen in Vegetation, Böden und Schnee/Eis. Inzwischen existieren verschiedene multifrequente SAR-Systeme, die bislang allerdings nur auf flugzeuggetragenen Plattformen und während der SIR-C/X-SAR Shuttle Mission eingesetzt wurden. Die verschiedenen Wellenlängen erlauben die Ableitung objektspezifischer Signaturen und erhöhen den Informationsgehalt der SAR-Daten für die Bearbeitung unterschiedlichster Fragestellungen erheblich (HOCHSCHILD & KLENKE 1998[140], MORAN et al. 1997[213], CHAMPION 1996[43], PAPATHANASSIO et al. 1996[231]).

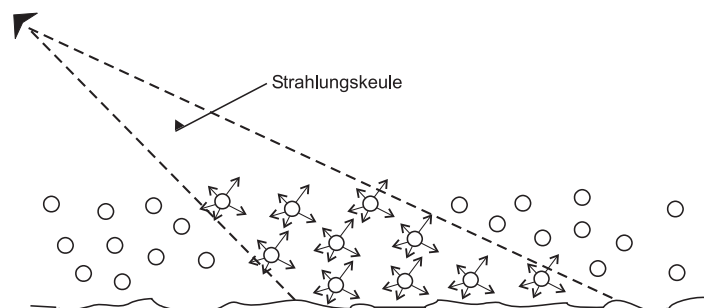


Abbildung 2.2: Der Effekt der Volumenstreuung (verändert nach ULABY et al. 1982[286]).

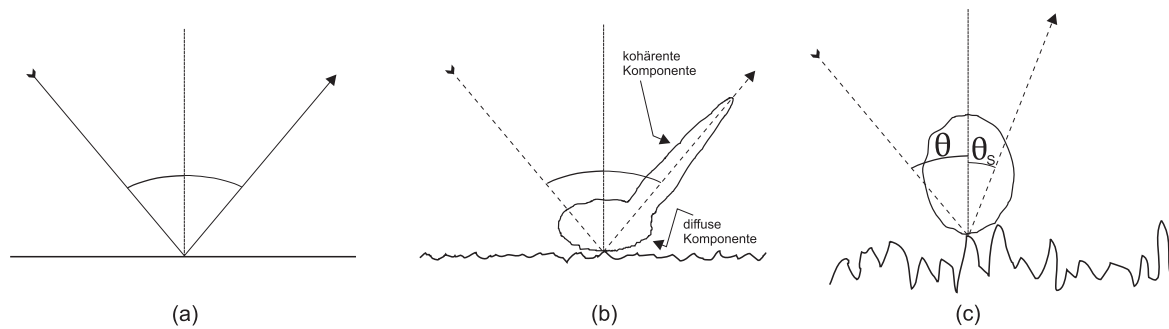


Abbildung 2.3: Streukomponenten unterschiedlich rauher Oberflächen (verändert nach ULABY et al. 1982[286]).

Polarisation

SAR-Systeme erzeugen linear polarisierte Mikrowellen, d.h. Wellen die nur in einer Ebene schwingen. Sie sind entweder vertikal (V) oder horizontal (H) polarisiert. Die Interaktion mit Oberflächen beeinträchtigt die lineare Polarisation. Von den Strahlungsanteilen die zur S/E-Einheit zurückgelangen, wird entweder die H-Komponente oder die V-Komponente gemessen. Insgesamt sind damit vier verschiedene Polarisationskombinationen für Sendung und Empfang vorhanden. Parallel polarisierte Systeme senden und empfangen in der gleichen Polarisation (VV oder HH), kreuzpolarisierte Systeme nutzen unterschiedliche Polarisationssebenen (VH oder HV) für Sendung und Empfang. Auf operationellen orbitalen Plattformen sind derzeit nur SAR-Sensoren mit einer Polarisationskombination im Einsatz. Multipolarisierte Systeme wurden bislang nur auf flugzeuggetragenen und Shuttle-Missionen geflogen. Die Ergebnisse zahlreicher Studien belegen das breite Anwendungspotential von SAR-Daten unterschiedlicher Polarisierungen (z.B. LE HÈGARAT-MASCLE et al. 1997[176], SCHABER et al. 1997[256], DONG & FORSTER 1996[68] und KARAM et al. 1995[149]). Mit dem für 2000 geplanten Start des europäischen ENVISAT-1 wird erstmals ein multipolarisiertes System operationell auf einer Satellitenplattform zur Verfügung stehen (ASAR, Advanced SAR). Die ERS-Satelliten arbeiten mit einer VV-Polarisation.

2.4.2.2 Oberflächenparameter und Rückstreuverhalten

Neben den beschriebenen systemeigenen Parametern und dem Relief, nehmen verschiedene objektspezifische Parameter Einfluß auf die Interaktionen der elektromagnetischen Wellen mit der Oberfläche. Es sind dies im wesentlichen die Oberflächenrauigkeit und die dielektrischen Materialeigenschaften (HOCHSCHILD 1995[139]).

Streuung von Mikrowellen

Grundsätzlich lassen sich an der Grenzfläche zweier unterschiedlicher dielektrischer Medien zwei Arten von Streumechanismen unterscheiden: Die Oberflächenstreuung und die Volumenstreuung (BAYER 1990[17]). Als Oberflächenstreuung bezeichnet man Streuung und Reflexion von Wellen an der Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen, aber jeweils homogenen dielektrischen Eigenschaften (ULABY et al. (1982[286]). Die Energie einer auftreffenden Welle wird im unteren Medium teilweise absorbiert. Der nicht absorbierte Teil wird je nach Rauigkeit der Grenzfläche zu unterschiedlichen Anteilen spiegelnd reflektiert oder diffus gestreut. Einen Spezialfall der Oberflächenstreuung stellt die „Corner“-Reflexion (auch Double Bounce-Reflexion) dar. Hierbei wird durch zweifache spiegelnde Reflexion, z.B. an Straße und Hauswand, eine Rückreflexion großer Energieanteile zum Sensor bewirkt. Im Intensitätsbild entsteht ein leicht zu identifizierendes, starkes Signalecho. Derartige Erscheinungen finden sich häufig in urbanen Gebieten (RICHARDS 1994[244]).

Volumenstreuung entsteht wenn das untere Medium dielektrisch inhomogen ist. Die elektromagnetischen Wellen können eindringen und streuen teilweise an den Inhomogenitäten innerhalb des unteren Mediums. Abbildung 2.2 verdeutlicht diesen Effekt. Die Penetrationstiefe und der Volumenstreuungsanteil werden

von Wellenlänge, der Geometrie und den dielektrischen Eigenschaften des Materials bestimmt. Wie Abbildung 2.1 zeigt, können z.B. L-Band-Wellen tief in Bestände eindringen, die Reflexion hat daher einen hohen Anteil an Volumenstreuung. Ähnliches gilt bei langen Radarwellen für trockene Böden (ALBERTZ 1991[6], HOCHSCHILD 1995[139]).

Oberflächenrauigkeit

Die Beurteilung der Rauigkeit einer Oberfläche hängt vom zugrundegelegten Skalenbereich, im Falle von elektromagnetischer Strahlung, von deren Wellenlänge ab. Generell gilt, daß, je rauher sich eine Grenzschicht für Wellen einer bestimmten Länge darstellt, der Anteil diffuser Streuung steigt und sich somit auch der Strahlungsanteil, der, aufgrund des Seitensichtverfahrens zum Sensor zurückgelangt, erhöht. Abbildung 2.3 visualisiert für einen konstanten Einfallswinkel θ die relativen Anteile diffuser und kohärenter Streuung bei glatten (a), rauhen (b) und sehr rauhen (c) Oberflächen (BAYER 1990[17], HOCHSCHILD 1995[139]).

Der maximale Phasenunterschied $\Delta\phi$ der reflektierten Wellen ist ein Maß für die Rauigkeit der Oberfläche in Bezug auf eine bestimmte Wellenlänge. Er hängt von den relativen Höhendifferenzen pro Fläche ab und berechnet sich wie folgt:

$$\Delta\phi = 4 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot h \cdot \cos\theta \quad (2.2)$$

mit:

- λ : Wellenlänge,
- h : relative Höhendifferenz zwischen zwei benachbarten Punkten,
- θ : Einfalls-, bzw. Reflexionswinkel.

Physikalisch/mathematisch kann eine Abgrenzung von glatten und rauhen Oberflächen durch das Raleighkriterium, bzw. das Fraunhoferkriterium vollzogen werden. In Bezug auf die einfallende Wellenlänge ist demnach eine Oberfläche als glatt zu bezeichnen, wenn für h aus Gleichung 2.2 gilt:

$$\underbrace{h < \frac{\lambda}{8 \cdot \cos\theta}}_{\text{Raleighkriterium}} \quad \underbrace{h < \frac{\lambda}{32 \cdot \cos\theta}}_{\text{Fraunhoferkriterium}} \quad (2.3)$$

Neben der Rauigkeit selbst, bestimmt der Einfallswinkel der Strahlung auf eine raue Oberfläche die Intensität der Rückreflexion zum Sensor. Bei kleinen Einfallswinkeln findet hauptsächlich spiegelnde oder stark gerichtete diffuse Reflexion statt, deren Intensität mit zunehmendem Einfallswinkel abnimmt. Zur Beschreibung derartiger Reflexion wird in der Praxis häufig das Facettenmodell benutzt. Bei größeren Einfallswinkeln (ab ca. 30°) beeinflussen kleinräumige Oberflächenrauigkeiten im Größenordnungsbereich der Wellenlänge in hohem Maße die Rückstreuung, da es durch sich regelmäßig wiederholende Rauigkeitsmuster zu Interferenzerscheinungen mit Phasenverschiebungem bis zu 360° kommt. Hier findet häufig das Bragg-Modell Anwendung (ULABY et al. 1982[286], BAYER 1990[17]). Der Einfallswinkel der ERS-Satelliten beträgt im mid-range ca. 23°. Bei der Modellierung der Reflexionsintensität muß der lokale Einfallswinkel der Strahlung betrachtet werden, der vom Relief bestimmt wird und sich zwischen der Oberflächennormalen des Bildelements und dem Einfallswinkel θ aufspannt.

Dielektrische Objekteigenschaften

Die Dielektrizitätskonstante ist eine komplexe Materialkonstante und stellt ein Maß für Ladungsverschiebungen dar, die sich innerhalb einer Materie als Reaktion auf das Anlegen eines elektrischen Feldes ergeben. Sie beschreibt die Fähigkeit eines Materials, durch Ladungstrennung elektrische Energie zu speichern und zu reflektieren. Je größer die Unterschiede der Dielektrizitätskonstanten zweier Medien ausfallen, desto stärker interagieren Mikrowellen in deren Grenzbereich. Mathematisch wird die Dielektrizitätskonstante in komplexem Zahlenformat, d.h. mit einem Real- und einem Imaginärteil angegeben (BAYER 1990[17], HOCHSCHILD 1995[139]).

Der Realteil stellt ein Maß für den Grad der Ladungstrennung dar und bestimmt wesentlich den Reflexionsanteil beim Übergang von einem Medium ins andere. Er ist für das Vakuum per Definition 1, für Wasser 81.6 (BAYER 1990[17]). Daher bestimmt in natürlichen Medien vor allem deren Wassergehalt die dielektrischen Eigenschaften. Je nach Feuchtegehalt und Aggregatzustand kann der Wert der Dielektrizitätskonstante tonig/schluffiger Böden zwischen 3 und 25 schwanken (TSANG et al. 1985[284], zitiert aus BAYER 1990[17]).

Bei der Interpretation von SAR-Intensitätsbildern ist zu beachten, daß sich die potentielle Eindringtiefe von Mikrowellen mit zunehmendem Feuchtegehalt eines Substrats verringert. Ein trockener Boden hat daher einen größeren Volumenstreuungsanteil als ein feuchter, der im wesentlichen oberflächlich streut.

Speckle

Für Intensitätsbilder abbildender Radarsensoren ist eine körnige Textur typisch. Dieses, auch als „Salz- und Pfeffer-Effekt“ oder „Speckle“ bezeichnete, Phänomen ist Folge der kohärenten Natur der ausgesandten Strahlung. Nach einer Interaktion mit Oberflächenmaterialien streuen Wellenanteile mit gleicher Frequenz, jedoch phasenverschoben zurück. Es kommt daher durch die unterschiedlichen Rückstreuer innerhalb eines räumlichen Mittelungsfensters zu konstruktiven oder destruktiven Interferenzerscheinungen, die auch in homogenen Flächen die beschriebene Textur erzeugen (RICHARDS 1994[244], ALBERTZ 1991[6]). Das Auftreten von Speckle ist somit aufnahmesystembedingt und nicht zu verhindern, sein Einfluß kann lediglich mit verschiedenen Verfahren eingeschränkt werden. Mathematisch/physikalisch stellt sich der Speckle im SAR-Intensitätsbild als multiplikatives, nicht stationäres Rauschen dar.

Der Speckle trägt zwar auch Information über kleinräumige Objekteigenschaften unterhalb der Größe einer Auflösungszelle, diese sind aber kaum zu extrahieren (BAYER 1990[17]). Im allgemeinen verschlechtert der Effekt die visuelle Interpretierbarkeit der Daten und erschwert die Anwendung automatisierter Klassifikationsverfahren. Daher ist man in der Regel bestrebt den Einfluß des Speckle zu minimieren (SMITH 1996[265]).

Zur Specklereduktion existieren verschiedene methodische Ansätze. Während der Datenprozessierung können Multi Look-Verfahren angewendet werden. Dabei wird die synthetische Apertur aufgeteilt, so daß mehrere unabhängige Aperturen entstehen für die eine getrennte Kompression durchgeführt wird. Durch eine anschließende Mittelung der einzeln aufsummierten Phasenanteile reduziert sich der Speckle, die verkürzte Apertur führt allerdings auch zu einer abnehmenden geometrischen Auflösung (LEE et al. 1994[181]). Die ERS PRI-Daten sind mit drei Looks prozessiert, die SLC-Daten 1-Look verarbeitet (vgl. Kap. 2.4.1.2 und 2.4.1.2).

In der Praxis werden nach der Prozessierung häufig adaptive Filter angewendet, um den Speckle zu reduzieren. Bei diesen Verfahren konkurrieren je nach Filtergröße und Methodik räumliche Auflösung und Speckle verringering (LEE et al. 1994[181]). Besonders die Erosion von Kanten und linearen sowie punkthaften Strukturen ist in diesem Zusammenhang problematische Folge der adaptiven Verfahren. Die fortgeschrittensten Filtertechniken arbeiten mit sich auf Grundlage der Umgebungsstatistik selbständig ändernden Filtergrößen (HAGG & STIES 1996[132]) oder beziehen Information aus der Frequenzdomäne mit in die Erkennung und Eliminierung ein (z.B. durch Waveletanalysen, vgl. hierzu beispielsweise GAGNON & JOUAN 1997[112]).

Schließlich kann der Speckleeinfluß auch durch die Fusion von Daten unterschiedlicher Wellenlängen und Polarisationen (NEZRY et al. 1998[220]), sowie unter Verwendung von Hauptkomponententransformationen (HENEGBRY 1997[134]) eingeschränkt werden.

Reliefeinfluß

Das Seitensichtverfahren von SAR-Sensoren bedingt erhebliche geometrische und radiometrische Verzerrungen im resultierenden Datenprodukt. Die geometrischen Verzerrungen können mit Hilfe von Digitalen Geländemodellen weitestgehend korrigiert werden. Radiometrische Verzerrungen, d.h. Intensitätsschwankungen auf Grund reliefinduziert-unterschiedlicher lokaler Einfallswinkel und Expositionen, sind demgegenüber nur unter Anwendung von Streuungs- und Reflexionsmodellen zu verringern. Zwar steht mittlerweile eine Vielzahl derartiger Modelle zur Verfügung (WANG & DONG 1997[294], CHAMPION 1996[43],

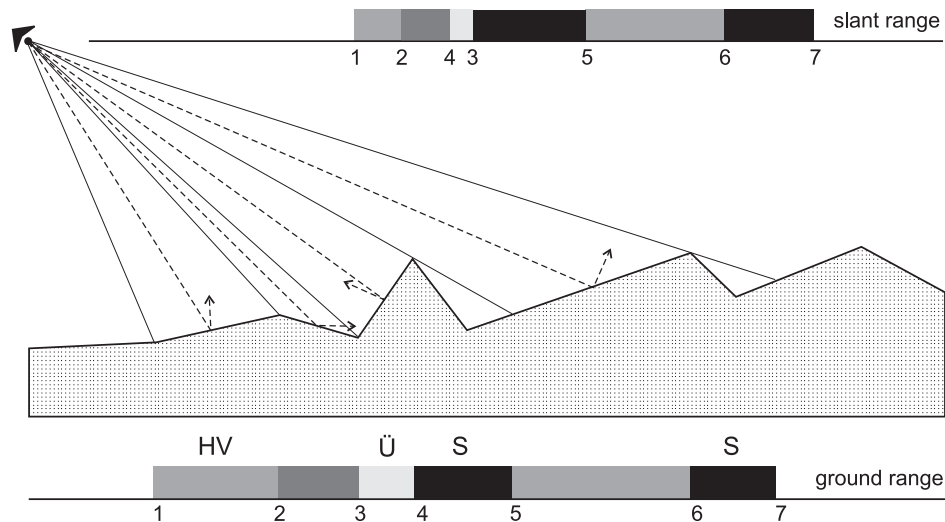


Abbildung 2.4: Geometrische und radiometrische Effekte im SAR-Bild (verändert nach BAYER 1990[17]).

DONG et al. 1995[70], RICHARDS 1990[243]), die extreme Komplexität und Variation von natürlichen Oberflächen (Vegetation, Feuchtezustand, Substrate) gestaltet eine angemessene Anwendung im Rahmen anwendungsbezogener Fragestellungen allerdings weiterhin schwierig. Die fortgeschrittenen Modellansätze sind in der Regel nutzungsspezifisch und somit nur in bekanntem Gelände anwend- und validierbar. Soll Landnutzung mit dem SAR erfasst werden, ist der inhaltlich abzuleitende Parameter zur gleichen Zeit für die Vorverarbeitung nötig. Der hier entstehende Widerspruch ist bislang nicht zufriedenstellend aufgelöst, so daß in der Praxis verschiedene Herangehensweisen existieren. Für die Erfassung der Landnutzung sind folgende Ansätze zu trennen:

- Vernachlässigung der reliefinduzierten, radiometrischen Verzerrungen,
- Klassifikationsansätze die für gleiche Nutzungen verschiedene Neigungs- und Expositionsclassen ausweisen, diese getrennt bestimmen und nach der Klassifikation vereinigen,
- Die Anwendung eines allgemeinen Strahlungsmodells für den gesamten Bildausschnitt,
- Die Nutzung von Zusatzinformation um so detailliert wie möglich nutzungsspezifische Streuungsmodelle anzuwenden. Hier wäre beispielsweise eine Kohärenzanalyse denkbar, mit der zunächst eine „Wald/Nicht-Wald“-Trennung erfolgt, auf deren Grundlage dann eine verfeinerte nutzungsspezifische Bearbeitung der radiometrischen Verzerrungen denkbar wäre. Ähnliches gilt für die Ausweisung von Siedlungsbereichen mittels texturanalytischen Verfahren. Derartige Arbeiten sind mir allerdings bislang nicht bekannt.

Alle genannten Ansätze haben spezifische Stärken und Schwächen, die Anwendung muß sich auch an der Physiographie des Untersuchungsgebiets, sowie der Fragestellung und deren Genauigkeitsansprüchen orientieren. In der vorliegenden Arbeit wird der Versuch unternommen, den radiometrischen Reliefeffekt mit Hilfe von Hauptkomponentenanalysen zu isolieren (vgl. Kap. 5.3.3.2).

Abbildung 2.4 faßt die geometrischen und radiometrischen Effekte im SAR-Bild zusammen. In der Sensorebene sind Radiometrie und Geometrie des Schrägenfernungsbilds (slant range) dargestellt, das die Rückstreuwerte pro Bildzeile nach ihrer, aus der Pulslaufzeit berechneten Distanz zum Sensor darstellt. Es ist, im Gegensatz zu der im unteren Bildteil dargestellten Ground Range Geometrie erkennbar, daß Hänge, die dem Sensor zugeneigt sind verkürzt dargestellt werden, da die Pulslaufzeitunterschiede Hangfuß–Sensor (Punkt 1), Hangspitze–Sensor (Punkt 2) geringer sind, als es ihrer Entfernung in der ebenen Projektion entspricht. Diese Hangverkürzungseffekte werden auch als „Foreshortening“ bezeichnet. Das Gegenteil ist bei vom Sensor abgeneigten Hängen der Fall (zwischen Punkt 2 und Punkt 3 in Abb. 2.4). Einen Extremfall des Foreshortening stellen Überlagerungen dar („Layover“). Sie entstehen wenn die Hangneigung den Einfallswinkel gegen die Vertikale übersteigt. Das Rückstreusignal von der Hangspitze erreicht vor

dem Signal des Fußes den Sensor (erkennbar an der Anordnung der Punkte 3 und 4 in Ground Range- und Slant Range-Geometrie). Layover-Bereiche sind hinsichtlich ihrer Intensitätswerte nicht interpretierbar. Gleiches gilt für die Schattenbereiche („Shadow“, S in Abb. 2.4), die vom Sensor nicht beleuchtet werden. Unterscheiden lassen sich aktive und passive Layover- und Shadow-Bereiche. Aktive Bereiche verursachen den Effekt (P3–P4, P4–Relieftiefpunkt zwischen P4 und P5), passive werden lediglich in Mitleidenschaft gezogen (Hang vor P3, in den die Hangspitze P4 „hineinkippt“, Fußbereiche der dem Sensor zugeneigten Hänge vor P7 und P5).

An den Grauwerten von Slant- und Ground Range-Darstellung in Abbildung 2.4 sind qualitativ die radiometrischen Effekte des Reliefs erkennbar, dem Sensor zugeneigte Flächen streuen einen höheren Anteil zurück als vom Sensor abgeneigte und erzeugen somit höhere Grauwerte. Bei der quantitativen Beurteilung der Intensitätseffekte ist der variierende lokale Einfallswinkel auch im Zusammenhang mit dem weiter oben beschriebenen Rauigkeitseinfluß zu sehen (BAYER 1990[17]).

2.4.2.3 Interferometrische Verarbeitung und Kohärenz

Der Begriff Radar-Interferometrie umschreibt eine Reihe von Methoden, die auf der Analyse der Phase als zusätzlicher Information komplexer Radardaten aufsetzt. Die theoretische Formulierung und praktische Umsetzung geht in die sechziger Jahre zurück und wurde zunächst in der extraterrestrischen Fernerkundung bei der Untersuchung der Oberflächen von Venus und Mond eingesetzt (ROGERS & INGALLS 1969[248]). Zur topographischen Erfassung der Erdoberfläche wurden Methoden der SAR-Interferometrie erstmals 1974 eingesetzt (GRAHAM 1974[125]). Neue Impulse gingen in den achtziger Jahren von Forschungen des Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena aus (GENS & VAN GENDEREN 1996[117]). Dabei wurden zunächst Daten flugzeuggetragener Sensoren, später auch Daten von Orbitalplattformen (z.B. SEASAT) interferometrisch ausgewertet (ZEBKER & GOLDSTEIN 1986[307], GOLDSTEIN et al. 1988[124], ZEBKER et al. 1992[306]). Die in jüngerer Zeit stark ansteigende Zahl interferometrischer Anwendungen hängt eng mit dem Erfolg der ERS-1/2 Tandem Mission (DUCHOSSOIS 1995[76]) und der SIR-C/X-SAR Kampagne (EVANS et al. 1997[91], WERNER et al. 1996[300]) zusammen, die eine umfangreiche Datengrundlage für interferometrische Auswertungen lieferten.

Hinsichtlich der Anwendung interferometrischer Methoden lassen sich drei Hauptgebiete trennen:

- Erstellung Digitaler Geländemodelle (LUCA et al. 1996[189], COULSON 1996[52], HERLAND 1996[136], RUFINO et al. 1996[252], FERRETTI et al. 1998[94]),
- Auswertung der Kohärenzinformation (BORGEAUD & WEGMÜLLER 1996[35], PAPATHANASSIO et al. 1996[231]), STEBLER et al. 1996[271], WEGMÜLLER & WERNER 1996[298]),
- Erfassung von Höhenänderungen und Massenbewegungen im Bereich eines Bruchteils der genutzten Wellenlänge mit differentieller Interferometrie (MASSONNET et al. 1993[196], GOLDSTEIN et al. 1993[123]).

Das interferometrische Aufnahmeprinzip, dargestellt am Beispiel der ERS-1/2 Tandemkonfiguration, zeigt Abbildung 2.5.

Die Weglängendifferenzen Δr , $\Delta r'$ der Signale können über eine Phasendifferenzmessung bestimmt werden (vgl. SCHWÄBISCH 1997[260]):

$$\psi_{ERS-1} - \psi_{ERS-2} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (2.4)$$

Es gilt Gleichung 2.4 mit:

ψ_{ERS} : Phaseneinzelmessung,
 λ : Radarwellenlänge.

Für die Geländehöhe h gilt in erster Näherung

$$h \approx \frac{\lambda r \sin \theta}{4\pi B_{\perp}} (\psi_{ERS-1} - \psi_{ERS-2}) \quad (2.5)$$

wobei:

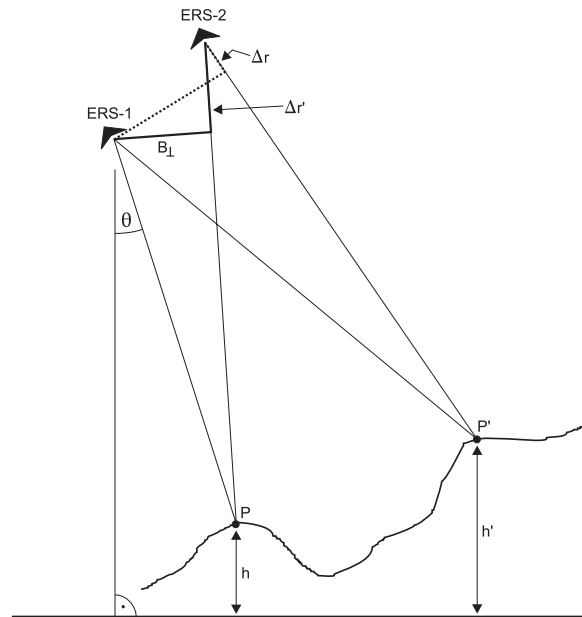


Abbildung 2.5: Interferometrisches Aufnahmeprinzip (verändert nach SCHWÄBISCH 1997[260]).

- B_{\perp} : Orthogonalkomponente der Basislänge,
 θ : Blickwinkel des Sensors.

Eine korrekte Höhenableitung ist nur möglich, wenn das Rückstreuverhalten der Bodenelemente um die Punkte in beiden Aufnahmen gleich ist, da die Phasendifferenz in Gleichung 2.4 nur in diesem Fall eine eindeutige Funktion der Weglänge ist. Hier ergibt sich ein limitierender Faktor für nicht-gleichzeitige Aufnahmesysteme. Das Problem vergrößert sich mit dem zeitlichen Abstand der Messungen. Bislang sind Aufnahmesysteme mit zwei Antennen nur auf flugzeuggetragenen Plattformen zum Einsatz gekommen. Im Orbit wird eine derartige Konstellation erstmals im Rahmen der „Shuttle Radar Topography Mission“ (SRTM) getestet, die derzeit für September 1999 avisiert ist (Stand September 1998).

Der Grad der Korrelation der interferometrischen Datensätze wird auch als Kohärenz bezeichnet und kann aus Gleichung 2.6 durch räumliche Mittelung geschätzt werden.

$$\hat{\gamma} = \frac{\sum_{n=1}^N c_1^{(n)} \cdot c_2^{(n)}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |c_1^{(n)}|^2 \cdot \sum_{n=1}^N |c_2^{(n)}|^2}} \quad (2.6)$$

mit:

- $c_1^{(n)}, c_2^{(n)}$: komplexwertige Daten der Szene 1, bzw. 2,
 N : Größe des Mittelungsfensters,
 $\hat{\gamma}$: Schätzwert der Kohärenz.

Neben ihrem Wert zur Abschätzung der Güte von extrahierter Höheninformation, bietet die Kohärenz auch inhaltliches Interpretationspotential, da unterschiedliche Oberflächenmaterialien im zeitlichen Verlauf unterschiedliches Kohärenzverhalten zeigen. Nutzungen mit hohem Anteil an Volumenstreuung, z.B. Wälder, zeigen bei nicht-gleichzeitiger Aufnahme geringere Kohärenzen als Objekte mit statischer Geometrie und einem hohen Anteil an Oberflächenstreuung. Wasserflächen sind normalerweise durch totale interferometrische Dekorrelation gekennzeichnet, während bestimmte ackerbauliche und Grünlandnutzungen häufig hohe Kohärenzen zeigen. Insgesamt spielen auch Witterungsbedingungen (Feuchteänderungen von Substraten,

Änderung von Windrichtung oder -stärke bei Wäldern), sowie der zeitliche Abstand der Aufnahmen eine Rolle beim Verlust interferometrischer Kohärenz. Trotz ihres Informationspotentials wird Kohärenzinformation bislang nur in geringem Umfang in thematische Klassifikationsverfahren einbezogen. SCHWÄBISCH (1997[260]) führt dies u.a. darauf zurück, daß sich die Erscheinung von Kohärenzbildern unterschiedlicher Szenenpaare durch die komplexen Einflüsse auf das Kohärenzverhalten zumeist stark und wenig vorhersehbar unterscheiden. Somit lassen sich kaum allgemeingültige Interpretationsrichtlinien geben. Hieraus folgt auch, daß Kohärenzbilder unterschiedlicher Paare kaum vergleichbar und multitemporal auswertbar sind. Zwar existieren mittlerweile Methoden zur Kalibrierung von Kohärenzwerten, diese sind aber komplex und erfordern eine aufwendige Prozessierung (SCHWÄBISCH 1997[260]).

2.4.3 Multispektralklassifikationen

Im folgenden Abschnitt werden einige allgemeine Erläuterungen zu Begriffen gegeben, die im Zusammenhang mit den durchgeführten Klassifikationen in den Kapiteln 5.2 und 5.3 wiederkehren. Damit sollen Mißverständnisse vermieden und die durchgeführten Arbeiten möglichst nachvollziehbar zusammengefaßt werden.

Unter dem Begriff *Multispektralklassifikation* wird im allgemeinen ein Vorgang gefaßt, bei dem Pixel aufgrund ihrer Grauwerte in eine endliche Anzahl von Klassen oder Kategorien unterteilt werden (SMITH et al. 1995[264]). Der Klassifikationsprozeß läßt sich formal in *unüberwachte* und *überwachte Ansätze* gliedern, allerdings lassen sich beide in der Praxis nur schwer scharf voneinander abgrenzen und fließen häufig ineinander.

Überwachte Verfahren sind in hohem Maße von Erfahrung und Geländekenntnis des Bearbeiters abhängig. Vor dem eigentlichen Klassifikationsprozeß trainiert der Bearbeiter den Klassifikator, indem z.B. Gebiete abgegrenzt werden, in denen die Landnutzung oder je nach Fragestellung andere Entitäten bekannt sind. Man ist bestrebt, die gewünschte Klassenhierarchie in den Trainingsgebieten abzubilden und so die unterschiedlichen spektralen Ausprägungen verschiedener Nutzungen, Vegetationsklassen, etc. vor dem Hintergrund des gewünschten Ergebnisses in den Klassifikationsprozeß einfließen zu lassen. Die eingehenden Zusatzinformationen können aus Geländekampagnen, Luftbildern, Karten u.ä. stammen.

Unüberwachte Verfahren sind demgegenüber stärker automatisiert, zwar kann der Interpret verschiedene, das Ergebnis beeinflussende, Einstellungen und Parameter setzen, im großen und ganzen wird aber die den Daten inhärente Statistik zur Klassifikation herangezogen (LARK 1995[171], [172]). Im Ergebnis entstehen voneinander abgegrenzte Flächen mit jeweils nach bestimmten Kriterien einheitlichen spektralen Charakteristika. Diese müssen im Sinne der Fragestellung nicht zwangsläufig sinnvoll interpretierbar sein. Unüberwachte Verfahren finden vor allem Anwendung wenn wenig über die Daten und das Untersuchungsgebiet bekannt ist. Sie eignen sich aber auch, um einen Überblick über den spektralen Informationsgehalt von Daten zu gewinnen, ohne von vornherein zuviel eigene, möglicherweise unzutreffende, Annahmen in den Klassifikationsprozeß einfließen zu lassen. So wird die Abschätzung dessen erleichtert, was in einer Szene aufgrund der spektralen Eigenschaften überhaupt trennbar ist. Überwachte Verfahren liefern demgegenüber im Ergebnis die Klassen die man isolieren möchte. Bei fachgerechter Anwendung lassen sich hohe Klassifikationsgüten erzielen.

Das Ergebnis eines Trainings zur überwachten Klassifikation ist ein Satz von *Signaturen* der die spektrale Charakteristik der Trainingsgebiete beschreibt und dem Klassifikator als Entscheidungshilfe übergeben wird. Jedes Trainingsgebiet einer Klasse wird im Idealfall von einer Signatur beschrieben, die im n-dimensionalen Merkmalsraum klar von den Signaturen der anderen Klassen trennbar ist. Formal lassen sich *parametrische* und *nicht-parametrische* Signaturen unterscheiden. Erstere basieren auf statistischen Parametern der Pixel in den Trainingsgebieten (Mittelwerte, Streuungen, etc.). Parametrische Signaturen sind die Grundlage von auf Statistik basierenden Klassifikatoren (z.B. dem in der Praxis häufig angewendeten Maximum Likelihood-Klassifikator). Eine nicht-parametrische Signatur basiert auf diskreten Objekten im Merkmalsraum. Diese Objekte, im zweidimensionalen Fall als Polygone im Merkmalsraum vorstellbar, dienen zur Definition der Grenzen der verschiedenen Klassen.

In der Praxis werden häufig beide Arten von Signaturen in den Klassifikationprozeß einbezogen, um deren jeweilige Vorteile zu nutzen. Es besteht außerdem die Möglichkeit, nicht-parametrische Signaturen in parametrische umzuwandeln, um diese schließlich einem statistischen Klassifikator zu übergeben. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß im Normalfall eine annähernde Normalverteilung der Daten Voraussetzung für

die Anwendung von solchen Klassifikatoren ist (RICHARDS 1994[244]). Der Interpret hat im Hinblick auf Fragestellung und gewünschtes Ergebnis zu entscheiden, welcher Weg mathematisch vertretbar, sinnvoll und gangbar erscheint. Verschiedene Studien belegen z.B. die Robustheit des ML-Klassifikators auch für von der Normalverteilung abweichende Grauwertmuster.

Wie bei den Signaturen, so lassen sich auch bei den Klassifikations-Algorithmen parametrische und nicht-parametrische unterscheiden. Ein parametrischer Klassifikator wird von parametrischen Signaturen trainiert. Diese sind ausschließlich definiert durch Hauptvektor und Kovarianz-Matrix der Pixelwerte in den Trainingsgebieten über die einbezogenen Kanäle. Da der parametrische Merkmalsraum kontinuierlich ist, können sämtliche Pixel einer Klasse zugeordnet werden. Ein nicht-parametrischer Klassifikator ist unabhängig von der Grauwertstatistik. Er stellt lediglich fest ob ein Pixel innerhalb der Grenzen einer nicht-parametrischen Signatur liegt, oder nicht.

Kapitel 3

Zielsetzung der Arbeit und methodisches Vorgehen

3.1 Arbeitsziele

Die vorliegende Arbeit verfolgt, entsprechend dem formulierten Forschungsbedarf, sowohl inhaltlich/anwendungsbezogene, als auch methodisch orientierte Zielsetzungen. Im Mittelpunkt steht der Aufbau einer GIS-Datenbank für das Einzugsgebiet der Sieg (vgl. Kap. 4.1). Als Vorbereitung für distributive, hydrologische Modellierungsverfahren ist eine Parameterisierungs- und Validierungsbasis zu erstellen. FLÜGEL (1996[98]) unterstreicht die Bedeutung der Landnutzung für die hydrologische Systemantwort im Einzugsgebiet der Bröl, eines Teileinzugsgebiets der Sieg. Dementsprechend bildet die Bestimmung der Flächennutzung im Siegeinzugsgebiet den inhaltlichen Kern der vorliegenden Arbeit. Beim Regionalisierungsschritt vom Bröl- auf das Siegeinzugsgebiet findet ein Skalensprung statt, der die Nutzung von Fernerkundungsdaten zur Landnutzungserfassung nahelegt. Zu diesem Zweck werden optische Satellitendaten des Landsat TM ausgewertet. Im Einklang mit der Resolution II.5 des 18. IGPF-Kongresses in Wien (vgl. Kap. 2.3), stützt sich die Analyse auf gängige Softwarekomponenten und operationelle Algorithmen und paßt diese in bestimmten Bereichen an die spezifische Fragestellung an. Die TM-Datenauswertung bildet den ersten von zwei Schwerpunkten der vorliegenden Arbeit.

Neben der Landnutzung werden aus externen Datenquellen zusätzlich folgende Informationsschichten in das Siegeinzugsgebiets-GIS integriert (vgl. Kap. 4):

- Digitale Geländemodelle des gesamten Siegeinzugsgebiets und verschiedener Teileinzugsgebiete in unterschiedlichen Rasterauflösungen und Höhengenaugigkeiten,
- Vektorinformation zu Landnutzung und Böden in verschiedenen Teileinzugsgebieten,
- Klimadaten von DWD-Stationen und aus eigenen Meßreihen,
- Daten zu Bodentemperatur und -feuchtigkeit von eigenen Meßstationen.

Ein Teil dieser Zusatzdaten stammt aus verschiedenen, im Rahmen des Teilprojekts B1 des SFB 350, an der Universität Bonn durchgeführten Studien (vgl. Kap. 4.2).

Den zweiten, stärker methodisch ausgerichteten Schwerpunkt der Arbeit stellt die nutzungsspezifische Auswertung von SAR-Daten der ERS-Satelliten dar. Wegen der Fähigkeit, bei nahezu allen Witterungsbedingungen auswertbare Aufnahmen zu liefern, bieten sie für Monitoring und aktuelle Informationsextraktion bessere Voraussetzungen als die optischen Satellitendaten. Damit ergeben sich für die regionale hydrologische Modellierung innovative Anwendungsperspektiven. Die in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Probleme bei der Auswertung, sollen durch synergetische Nutzung von Rückstreuintensitäts- und interferometrischer Kohärenzinformation bewältigt werden. Im einzelnen sind folgende Fragen zu klären:

- Eignen sich Radardaten für eine Landnutzungsbestimmung in hügeligem Relief, deren Genauigkeit und Klassenauflösung den Ansprüchen einer anschließenden HRU-Ableitung genügt?
- Wo liegen die landnutzungsspezifischen Probleme und Stärken von Intensitäts- und Kohärenzanalysen?
- Lassen sich die unterschiedlichen Informationsebenen in eine weitgehend standardisierte Klassifikationsmethodik einbinden und ist diese gegebenenfalls mit gängiger Software zu realisieren?

Insgesamt umfaßt die Arbeit somit geowissenschaftlich-hydrologisch und fernerkundlich-methodisch ausgerichtete Fragestellungen, wobei auch letztere von einem anwendungsbezogenen Standpunkt aus bearbeitet werden.

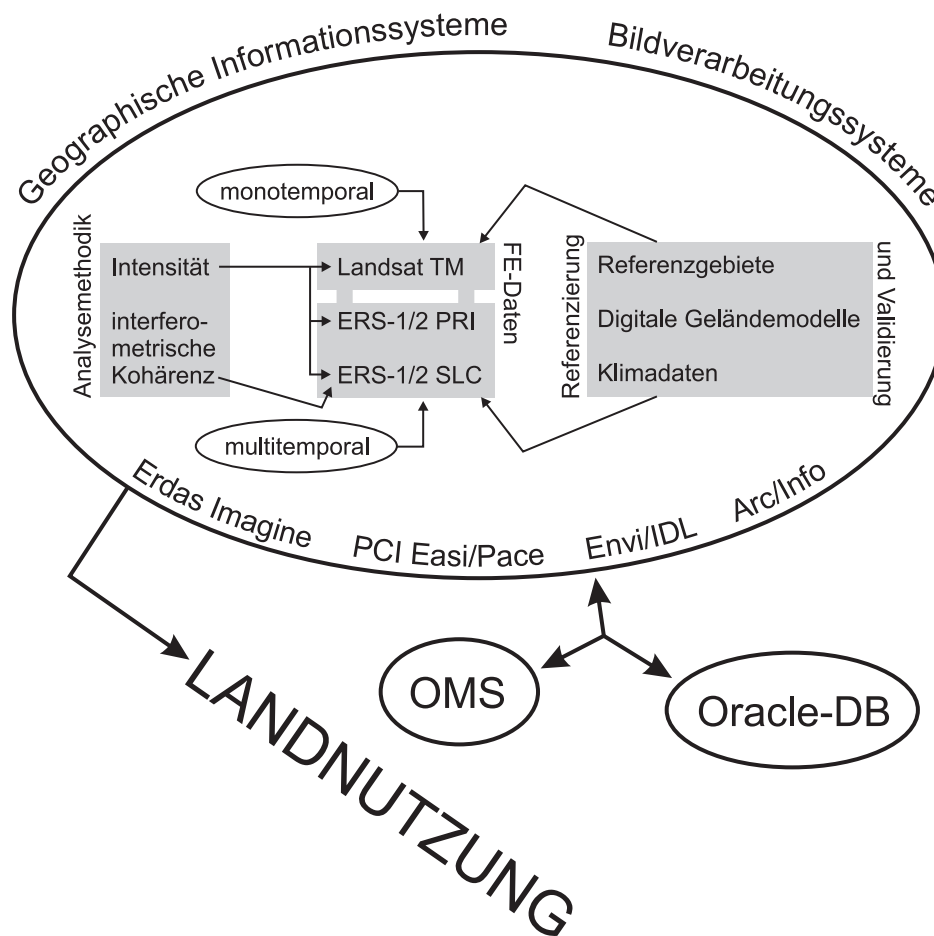


Abbildung 3.1: Organigramm der Fernerkundungsdatenauswertung.

Abbildung 3.1 faßt in einem Flußdiagramm Datenquellen, Methoden und Analyseinstrumente zusammen.

3.2 Methodisches Vorgehen

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Stand der Forschung (2), Forschungsbedarf (2.3) und einige theoretische Grundlagen (2.4) sowie die wesentlichen Zielsetzungen der Arbeit (3.1) vorgestellt. Das folgende Kapitel 4 leitet zu den Ergebnissen über, die in Kapitel 5 zusammengefaßt werden.

Zunächst werden die Physiographie des Untersuchungsgebiets (4.1), bisher dort durchgeführte hydrologische Arbeiten (4.2), sowie die genutzten Datenprodukte (4.3) vorgestellt. Abschließend werden einige Vorarbeiten zum Aufbau der GIS-Datenbank beschrieben (4.5). Die Arbeits- und Ergebnisdarstellung gliedert

sich in drei Teile: Den Aufbau der Höhenmodelle (5.1), die Verarbeitung der optischen Fernerkundungsdaten (5.2) und die Analyse der Mikrowellendaten (5.3).

In Abschnitt 5.1 wird die Datenaufbereitung zur Erstellung der Digitalen Geländemodelle zusammengefaßt. Ausgangsdaten waren ASCII-Dateien des Landesvermessungsamts Nordrhein-Westfalen, die in ein verarbeitbares Rasterformat überführt, mosaickiert und in ein anderes geodätisches Bezugssystem transformiert wurden. Es standen Höhendaten in zwei Qualitäten zur Verfügung: Für das gesamte Sieg-Einzugsgebiet ein auf 50 m gerastertes DGM mit einer Höhengenaugkeit von 2 m bis 5 m, sowie für verschiedene Teileinzugsgebiete ein auf 10 m gerastertes DGM mit einer Höhengenaugkeit im Dezimeterbereich. Im GIS Arc/Info wurden auf Grundlage des 50 m DGMs Teileinzugsgebiete und das Flußnetz abgeleitet.

Methodisch richtet sich die Relieffanalyse anwendungsorientiert an der folgenden Auswertung der Satellitendaten aus. Ein zusammenhängendes Höhenmodell ist Grundlage der Topographischen Normalisierung der optischen Satellitenszenen. Die Radardatenauswertung ist in verschiedenen Verarbeitungen auf DGMs hoher Qualität angewiesen. Die aus den Höhenmodellen abzuleitenden Hangneigungs- und Expositionskarten sind wesentlicher Bestandteil der HRU-Ableitung.

Abschnitt 5.2 beschreibt die Arbeiten zur Klassifikation der Landnutzung im Einzugsgebiet der Sieg aus Daten des Landsat Thematic Mapper. Im einzelnen werden zunächst die Vorverarbeitungsschritte der

- Atmosphärenkorrektur,
- Georeferenzierung und
- Topographischen Normalisierung,

beschrieben. Anschließend wird der Klassifikationsablauf dargestellt, der, einem hybriden Ansatz folgend, unüberwachte und überwachte Verfahren beinhaltet. Die wesentlichen Arbeitsschritte sind

- ISODATA-Klassifikationen,
- Signaturanalysen,
- Trainingsgebietsausweisung,
- Überwachte ML-Klassifikation und
- Nachbearbeitung des Klassifikationsergebnisses.

Die Nachbearbeitungsschritte beinhalten

- Die Zurückweisung der mit hoher Wahrscheinlichkeit falsch klassifizierten Bildelemente,
- Die umgebungsbezogene Reklassifikation der zurückgewiesenen Pixel,
- Die Eliminierung bestimmter Mischpixelerscheinungen und
- Eine auf Testgebieten basierende Qualitätsabschätzung auf allen Stufen des Nachbearbeitungsprozesses.

Abschließend werden die Ergebnisse der optischen Fernerkundungsdaten-Analysen zusammenfassend dargestellt.

Bei der Auswertung der optischen Satellitendaten findet eine Methodik Anwendung, die sich auf die Nutzung operationeller Bildverarbeitungssysteme stützt und deren Funktionalität in bestimmten Bereichen erweitert. Inhaltlich stehen die Schritte der Vorverarbeitung, Klassifikation und Nachbearbeitung auf einer Stufe und werden gleichberechtigt diskutiert. Insgesamt bildet der Verfahrensablauf eine geschlossene Verarbeitungskette, die sich am zu erstellenden Ergebnis orientiert.

Im letzten Teil von Kapitel 5 werden die Auswertungen der ERS-1/2 Mikrowellendaten zusammengefaßt. Regional beschränken sich die Analysen auf einen Teil des Einzugsgebiets der Bröl, da die ERS Daten nicht das ganze Siegeinzugsgebiet abdecken und für das Bröleinzugsgebiet sowohl die beste Referenzdatenlage, als auch die größte Erfahrung hinsichtlich der hydrologischen Dynamik vorhanden ist. Auf dem Fundament der in Kapitel 2.4.2 beschriebenen theoretischen Grundlagen, werden die Vorverarbeitungsschritte, sowie die verschiedenen Klassifikationsansätze beschrieben. Die Vorverarbeitung der PRI-Daten umfaßt folgende Schritte:

- Specklereduktion,
- Berechnung des Radarrückstreukoeffizienten σ^0 ,
- Geometrische Referenzierung unter Berücksichtigung des DGMs.

Die interferometrische Vorverarbeitung der SLC-Daten beinhaltet:

- Bild zu Bild Registrierung der Tandempartner,
- Kohärenzberechnung,
- *Slant Range* zu *Ground Range* Konvertierung und
- Geometrische Referenzierung.

Die sich anschließenden Klassifikationsverfahren berücksichtigen Rückstreuintensitäts- und Kohärenzinformation. Die Ergebnisse werden abschließend zusammenfassend beschrieben und bewertet.

Die Auswertung der Radardaten ist somit vor allem methodisch ausgerichtet. Im Gegensatz zu den DGM-Analysen und optischen Auswertungen, geht es weniger um ein Ergebnis im Sinne einer flächenhaften Landnutzungskarte, als vielmehr um die Einschätzung der Leistungsfähigkeit der genutzten Sensoren und Methoden, sowie um den Aufbau einer Verarbeitungskette, die das Informationspotential der Daten im Sinne der formulierten Fragestellung optimal ausschöpft. Insbesondere die für interferometrische Untersuchungen geeignete Konstellation der ERS-1/2 Tandem-Konfiguration (DUCHOSSOIS 1995[76]) ist, mit Ausnahme der Arbeiten zum Aufbau von Digitalen Geländemodellen, bislang kaum in den Bereich geowissenschaftlicher und hydrologischer Fragestellungen vorgedrungen. Gerade solche Pilotstudien sind jedoch von Bedeutung, um im Umgang mit den Daten eine Sicherheit zu erlangen, die später auch eine Anwendung unter weniger optimalen Bedingungen erlaubt.

Kapitel 6 diskutiert die Ergebnisse der optischen und Mikrowellenverfahren vergleichend und stellt sie in den Gesamtzusammenhang der Arbeit.

In Anhang A finden sich die farbigen Abbildungen. Den detaillierten Arbeitsgang einer relativen Referenzierung zweier ERS-Tandempartner beschreibt in tabellarischer Form Anhang B. Anhang C faßt die im Text enthaltenen Abkürzungen zusammen. Den Abschluß der Arbeit bildet das Verzeichnis der genutzten Literatur.

Kapitel 4

Untersuchungsgebiet, Datenquellen und Vorarbeiten

Im folgenden Kapitel werden das Untersuchungsgebiet und dort bisher durchgeführte Arbeiten mit hydrologischem Schwerpunkt, die bei der Auswertung genutzten Sensoren und deren Datenprodukte, sowie die Vorarbeiten zum Aufbau einer GIS-Datenbank „Sieg“ vorgestellt.

4.1 Physische Ausstattung des Untersuchungsgebiets

Die geographische Lage der Einzugsgebiete von Sieg und Bröl, die im folgenden Gegenstand der Untersuchungen sind, verdeutlicht Abbildung 4.1. Das Siegeinzugsgebiet besitzt, bei einer Nord-Süd Ausdehnung von ca. 60 km und einer Ost-West Ausdehnung von etwa 85 km, eine Fläche¹ von 2853.4 km². Es liegt innerhalb der Grenzen eines Rechtecks, daß sich zwischen einer nordwestlichen Ecke mit den Koordinaten 07°03'38" östlicher Länge, 51°06'16" nördlicher Breite und einer südöstlichen Ecke in 08°16'54" öL, 50°34'47" nB aufspannt.

Die Sieg entspringt östlich von Siegen, durchfließt das Siegerland und mündet nördlich von Bonn in den Niederrhein. Der Flußlauf hat eine Länge von 131 km (DORNBERG 1992[73]). Administrativ gehört der Großteil des Einzugsgebiets zum Bundesland Nordrhein-Westfalen, kleinere Teile im Süden und Osten reichen in die Länder Rheinland-Pfalz und Hessen.

Das Siegeinzugsgebiet liegt im zentralen, osth rheinischen Teil des Rheinischen Schiefergebirges. Abbildung 4.2 liefert eine generalisierte Darstellung der Landschaftseinheiten. Das gesamte Untersuchungsgebiet gehört zur Mittelgebirgsschwelle des Rheinischen Schiefergebirges. Große Teile werden naturräumlich unter dem Begriff Süderbergland subsumiert. Es sind dies die Rumpfbirgsmassive des Siegerlands, Bergischen Lands, Sauerlands und Wittgensteiner Lands. Geologisch finden sich im wesentlichen stark gefaltete, devonische Gesteine, vor allem Grauwacken und Schiefer, sowie lokal tertiäre vulkanische Decken (Westerwald). In Höhenlagen zwischen 300 m und 700 m sind tertiäre Rumpfflächenreste vorhanden, in den Niederungen finden sich quartäre Flußterassen (DORNBERG 1992[73]). Insgesamt sind im Einzugsgebiet der Sieg sowohl Anteile von Bergland, als auch Hügelland- und Mittelgebirgsreliefanteile vorhanden. Morphographisch dominieren ausgedehnte, flachwellige Hochflächen mit steil eingeschnittenen Tälern (SEMMELE 1972[261]). Eine Ausnahme bildet das sanftwellige Basaltrelief des Westerwalds im Südosten des Einzugsgebiets.

Die Geländehöhen variieren zwischen 680 m üNN im Quellgebiet der Sieg und ca. 45 m im Bereich der Mündung in den Rhein. Das Gefälleprofil der Sieg zeichnet sich durch einen recht gleichmäßigen Höhenabfall in ost-westlicher Richtung aus.

Wald und Grünland sind die dominierenden Nutzungsformen in weiten Teilen des Einzugsgebiets. Ackerbau spielt nur eine untergeordnete Rolle. Der Waldanteil ist in den bergigen Lagen im Osten und Norden des Einzugsgebiets besonders hoch. Im Rahmen der Grünlandwirtschaft werden Standweiden, Mähweiden und

¹Die Einzugsgebietsfläche wurde im Rahmen der GIS-Analysen aus den Digitalen Geländemodellen abgeleitet (vgl. Kap. 5.1.3.1).

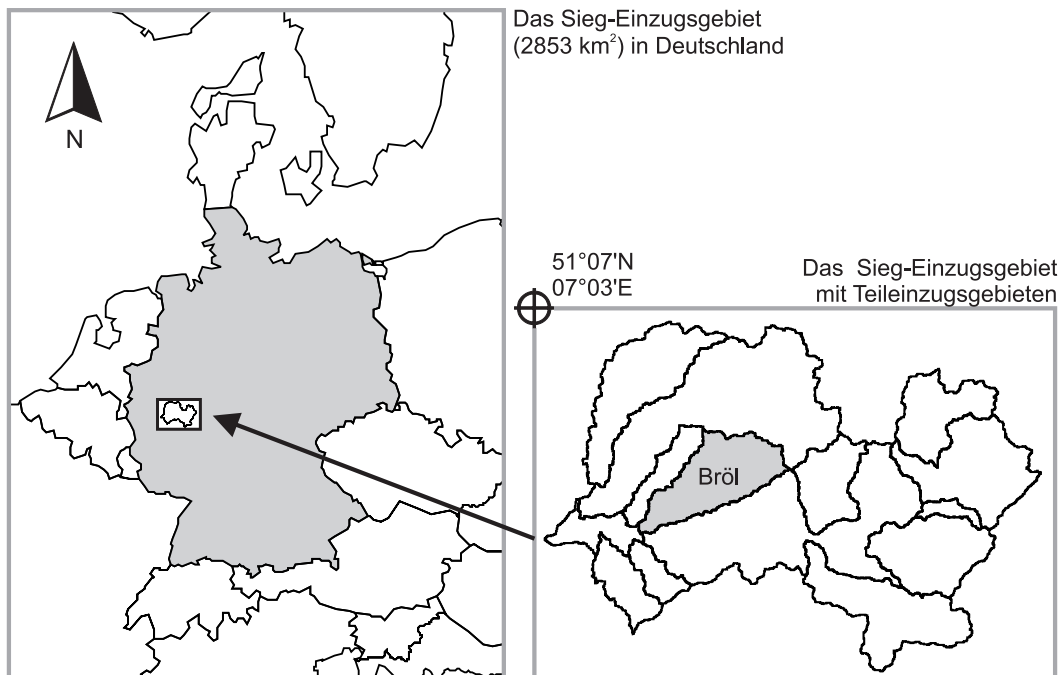


Abbildung 4.1: Lage der Einzugsgebiete von Sieg und Bröl.

Mähwiesen unterhalten. Die Standweiden liegen zumeist dicht bei den Höfen, die Weidestücke werden häufig in Dreier-Portionen gehalten, auf denen das Vieh im Laufe eines Jahres rotiert. Da die Effizienz über das Jahr und im Laufe der Jahre abnimmt, werden die Gebiete von Zeit zu Zeit ausgeweitet. Das Vieh steht in der Regel von März bis Oktober im Freien. Mähweiden liegen gewöhnlich etwas weiter von den Höfen entfernt. Im Lauf des Jahres werden zunächst ein bis zwei Schnitte genommen, dann folgt Beweidung. In den Peripherien der Hofgebiete finden sich Mähwiesen. Die Schnitzzahl nimmt entsprechend der klimatischen- und Höhenverhältnisse von West nach Ost ab. Im Westen können normalerweise vier Schnitte pro Jahr genommen werden, im östlichen Hoch- und Bergland lediglich drei.

Klimatisch wird das Siegeinzugsgebiet vom atlantisch-ozeanischen Klimabereich beeinflusst. Typisch sind hohe jährliche Niederschlagsmengen mit Maximum im Winter, starke Bewölkung, hohe Luftfeuchtigkeit und geringe jährliche Temperaturschwankungen, d.h. relativ milde Winter und nicht zu heiße Sommer (MEYNEN et al. 1962[208]). Die Niederschläge variieren im Einzugsgebiet im wesentlichen mit der Höhenlage. Sie bewegen sich im langjährigen Mittel zwischen 640 mm/a (DWD²-Station Bonn) und über 1300 mm/a in den Höhenlagen. DORNBERG (1992[73]) analysiert für die Jahre 1970–1989 Daten zahlreicher DWD-Stationen im und um das Untersuchungsgebiet. Der Autor schätzt den Jahresgebietsniederschlag für das Einzugsgebiet der Sieg auf 1083 mm. Der Monat April ist mit 72.1 mm am trockensten, der Dezember mit 112.4 mm am feuchtesten. Die Jahresmitteltemperatur beträgt in Bonn 10.2°C.

Das Einzugsgebiet der Bröl erstreckt sich in nord-südlicher Richtung ca. 18 km und in west-östlicher etwa 26 km. Die Fläche beträgt 216.5 km² und macht somit knapp 8 % der Siegeinzugsgebietsfläche aus. Die Reliefhöhen bewegen sich zwischen 64 m üNN im Mündungsbereich und 400 m üNN im Quellgebiet. Geologisch wird das Bröleinzugsgebiet von devonischen Ablagerungen dominiert. Im westlichen Teil finden sich über dem Grundgebirge unterdevonische Tonschiefer und Sandsteine, die weiter östlich teilweise von mitteldevonischen Ablagerungen überlagert sind. Vereinzelt treten im Osten des Untersuchungsgebiets auch Kalksteine auf. Tertiäre und quartäre Ablagerungen sind kaum vorhanden. Insgesamt ist das Einzugsgebiet von starker Schollenzerstückelung geprägt, doch kann der Untergrund als relativ wasserundurchlässig angesehen werden. Die klimatischen Schwankungen im Pleistozän führten, in Verbindung mit Zeiten ausgeprägter tektonischer Dynamik, zu einer starken Zertalung des Einzugsgebiets. Neben den großen Talsystemen prägen Riedel und Siefen das Landschaftsbild (DAAMEN 1993[57], BENDE 1994[24], FLÜGEL 1995[97]).

²Deutscher Wetterdienst

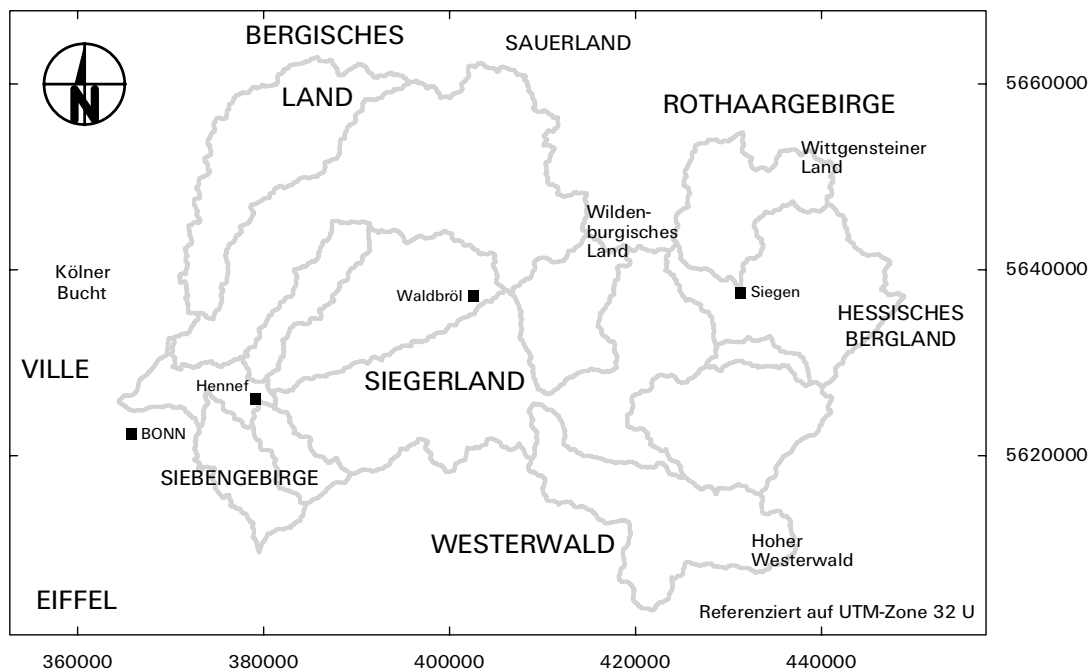


Abbildung 4.2: Landschaften des Siegeinzugsgebiets.

Die Bodenverhältnisse lassen sich als recht homogen charakterisieren. Auf 93% der Einzugsgebietsfläche findet sich als Bodenart schluffiger Lehm. Bei den Bodentypen überwiegen auf den Hochflächen Braunerden und Parabraunerden, vereinzelt finden sich auch Pseudogleye. In den Talauen dominieren Auenböden, Gleye und Naßgleye. Die Topographie beeinflusst die Mächtigkeit der Profile, so sind die meist pseudovergleyten (Para-) Braunerden in den Ober- und Mittelhangbereichen der Riedel in der Regel weniger mächtig ausgeprägt als jene im Unterhangbereich der Siefen und Mulden (DAAMEN 1993[57], KEMPKE 1994[153]).

Für die Landnutzung gilt, was weiter oben bereits für die Sieg festgestellt wurde: Wald und Grünlandwirtschaft (Milchviehhaltung) dominieren. Ackerbau spielt eine untergeordnete Rolle, er wird vor allem zur Produktion von Silomais und Getreide als Futtermittel betrieben und folgt gewöhnlich einer zwei- bis dreijährigen Fruchtwechselfolge von:

- Silomais,
- Wintergetreide (Gerste, Roggen, Weizen, Hafer, Triticale) und einer
- Zwischenfrucht (Kleegras, Raps, Gelbsenf).

Die Flächen sind kleinräumig parzelliert (BENDE 1994[24]).

DAAMEN (1993[57]) wertet Informationen des StAWA-Nordrhein-Westfalen aus, das auf Grundlage von Daten des Zeitraums 1974–1990 für den mittleren Jahresgebietsniederschlag über der Bröl 1088 mm ansetzt. Eigene Berechnungen des Autors ergeben für den selben Zeitraum auf Grundlage von fünf DWD-Stationensätzen 1097 mm. Die Niederschlagsmaxima werden im Winter erreicht (Januar/Februar). Insgesamt unterscheiden sich die Niederschlagsmengen im Sommer und Winter nur geringfügig (Sommer: 513 mm, Winter: 575 mm). Die Jahresmitteltemperatur für die Jahre 1970–1990 beträgt an der, westlich des Einzugsgebiets gelegenen, Klimahauptstation Neunkirchen-Seelscheid-Meisenbach 10.3°C, für das im Mittel etwas höher gelegene Bröleinzugsgebiet ist sie etwas niedriger anzusetzen.

Die besondere Eignung des Siegeinzugsgebiets für Modellierungen des hydrologischen Prozeßgefüges begründen FLÜGEL et al. (1991[100]) wie folgt:

- Topographisch heterogenes Einzugsgebiet mit Anteilen an Flachland-, Hügelland- und Mittelgebirgsrelief.

Tabelle 4.1: Hydrologische Arbeiten im Siegeinzugsgebiet

Autor	Titel	Jahr
Mülders, R.	Anwendung des NASIM-Modells zur hydrologischen Modellierung im Bröleinzugsgebiet[214]	1992
Dornberg, P.	Ermittlung des Gebietsniederschlags im Einzugsgebiet der Sieg[73]	1992
Daamen, K.-H.	Das hydrologische Flußeinzugsgebietsmodell HSPF und seine Anwendung im Einzugsgebiet der Bröl[57]	1993
Lüllwitz, T.	Vergleichende Hydrologische Modellierung mit dem Modell PRMS unter Anwendung von Geographischen Informationssystemen[190]	1993
Petersen, B.	Untersuchungen zur Abgrenzung geohydrologisch homogener Bodenklassen im Einzugsgebiet des Pleisbachs unter Verwendung eines geographischen Informationssystems[234]	1993
Behl, T.	Untersuchungen zur Stoffverlagerung in der Siegtalaue bei Hennef[20]	1994
Dörffler, C.	Landnutzungsklassifikation auf der Grundlage von multispektralen und -temporalen Bilddaten für das Bröleinzugsgebiet zur Weiterverarbeitung in einem GIS[72]	1994
Herpertz, D.	Einfluß regionaler Flächendifferenzierungen auf die Ergebnisgenauigkeit des Flußeinzugsgebietsmodells ACRU. - Detailstudien im Einzugsgebiet der Bröl[137]	1994
Kempke, S.	Limnologische Untersuchungen zur Gewässergüte und ihre Abhängigkeit von der Landnutzung in den Einzugsgebieten der Bröl und des Hanfbaches[153]	1994
Michl, C.	Modellierung der Grundwasserdynamik im Einzugsgebiet des Wasserwerks Meindorf mit dem Modell MODFLOW[209]	1994
Bende, U.	Abgrenzung von landnutzungsspezifischen „Chemical Response Units (CHRU's)“ unter Verwendung eines GIS zur Regionalisierung der Stoffdynamik im Einzugsgebiet der Bröl[24]	1994
Eick, M.	Grundwassermodellierung mit dem Modell GWMOBR im Einzugsgebiet des Grundwasserwerks Meindorf[81]	1995
Krawulsky, T.	Bodenwasserdynamik und Stoffverlagerung im Hennefer Siegbogen[163]	1995
Bongartz, K.	Geohydrologische Niederschlags-Abflußmodellierung eines Teileinzugsgebietes der Sieg (Sülz) mit dem Modell MMS/PRMS unter Verwendung eines GIS[34]	1996
Märker, M.	Bodenchemische und bodenphysikalische Untersuchungen an ausgewählten Hangstandorten als Mittel für die Interpretation der reliefgesteuerten Hangwasserdynamik[194]	1996
Schmidt, T.	Die Abschätzung der Bodenerosion auf landwirtschaftlich genutzten Flächen des Rhein-Sieg Kreises mit dem Computersimulationsmodell OPUS[257]	1996
Teymouri, P.	Geohydrologische Wasserhaushaltsuntersuchungen in Teileinzugsgebieten der Sieg[279]	1996

- Hohe Emissionen im Luv der Kölner Bucht.
- Heterogenes Niederschlagsregime (am Rhein um 600 mm/a, im Quellgebiet um 1400 mm/a).
- Engmaschiges hydrometeorologisches Meßnetz vorhanden und nutzbar.
- Die zuständigen Fachbehörden sind an derartigen Fragestellungen interessiert und stellen ihre Daten zur Verfügung.

4.2 Hydrologische Arbeiten in Teileinzugsgebieten der Sieg

Im folgenden soll nicht der Versuch unternommen werden, alle im Einzugsgebiet der Sieg durchgeführten Untersuchungen mit hydrologischem Hintergrund zu erfassen. Vielmehr soll ein Überblick der im Teilprojekt B1 des SFB 350 der Universität Bonn entstandenen Untersuchungen gegeben werden, in dessen Rahmen auch die vorliegende Arbeit eingebettet ist.

In diesem Teilprojekt (Titel: „Wasserbilanzen, Stoffeintrag, und -transport im Einzugsgebiet der Sieg: Regionale Modellierung des hydrologischen Prozeßgefüges“) wurden in den Jahren 1992–1997 umfang-

Tabelle 4.2: Ausgewertete TM-Daten

Aufnahmedatum	Produkt	Orbit	Frame
01.05.86	sys.korr. II, Vollszene	196	24/25
17.11.89	sys.korr. II, Vollszene	196	24/25
05.08.92	sys.korr. II, Vollszene	196	24/25

reiche Untersuchungen zum Wasser- und Stoffhaushalt im Siegeinzugsgebiet durchgeführt (FLÜGEL et al. 1991[100]). Dabei wurde folgender, interdisziplinärer Arbeitsansatz verfolgt:

- (i) Methoden der Geohydrologie,
- (ii) Die Analysetechniken von Geographischen Informationssystemen und
- (iii) Die Techniken der Satellitenbildverarbeitung mit mathematisch-physikalischen, sowie empirisch-statistischen Modellansätzen für die Prozeßsimulation des Flußeinzugsgebietssystems zu einem integrativen, systemanalytischen Untersuchungsansatz zu verknüpfen.

Voraussetzung für die Realisierung eines solchen Ansatzes war die Verwendung eines skalenunabhängigen Konzepts für die Regionalisierung. Von FLÜGEL (1995[97], 1996[98]) wurde hierfür das Konzept der „Response Units (RUs)“ weiterentwickelt (vgl. Kap. 2.1.2), die je nach Fragestellung als „Hydrological Response Units (HRUs)“ (FLÜGEL 1995[97], 1996[98]) oder „Chemical Hydrological Response Units (CHRUs)“ (BENDE et al. 1995[25]) definiert und im GIS ausgewiesen werden. In ihnen werden die hydrologische Dynamik und Prozesse der Stoffverlagerung in den verschiedenen Komponenten des RU-Systems, wie im Grundwasser (MICHL 1995[209]), dem Bodensubstrat von Hängen (Interflowdynamik: FLÜGEL 1993[101], FLÜGEL et al. 1997[99]), und Talauen (Nitratdynamik: BEHL et al. 1996[21]) oder in der Topographie (Niederschlagsverteilung: DORNBERG 1992[73]) analysiert und mit Hilfe des deterministischen, regionalen Flußeinzugsgebietsmodells MMS/PRMS (BONGARTZ 1996[34], FLÜGEL 1995[97], 1996[98]) flächendistributiv simuliert.

Tabelle 4.1 faßt die wesentlichen Untersuchungen in chronologischer Reihenfolge zusammen. In der Arbeit von DÖRFFLER (1994[72]) wurden Fernerkundungsdaten und -methoden im Siegeinzugsgebiet genutzt. Die Autorin klassifiziert die Landnutzung im Einzugsgebiet der Bröl mit Hilfe eines multitemporalen Landsat TM-Datensatzes aus dem Jahr 1991.

4.3 Ausgewertete Fernerkundungsdaten

Im folgenden werden die im Laufe der Arbeiten genutzten Datensätze in tabellarischer Form beschrieben. Weitergehende Informationen zu den Sensorsystemen und Datenprodukten finden sich in Abschnitt 2.4.1.

Für die optischen Auswertungen im Einzugsgebiet der Sieg standen drei nahezu wolkenfreie Landsat TM-Szenen zur Verfügung. Tabelle 4.2 enthält Aufnahme- und Orbitdaten. Die TM-Rohdaten sind in der vorliegenden Form (Produktspezifikation *systemkorrigiert II*) auf ihre innere Geometrie und Radiometrie hin überprüft und vorprozessiert.

In Tabelle 4.3 sind die, im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausgewerteten, ERS-1 und ERS-2 Datensätze zusammengefaßt. Es handelt sich um Aufnahmen aus der ERS-1/2 Tandem Mission (DUCHOSSOIS 1995[76]).

4.4 Höhendaten

Für die gesamte Landesfläche Nordrhein-Westfalens hält das Landesvermessungsamt das Digitale Geländemodell DGM 25 vor. Es beschreibt die Geländeformen durch ein regelmäßiges Punktraster mit einer Rasterweite von 50 m. Die Höhengenaugigkeit beträgt ± 2 m bis ± 5 m. Für Teile Nordrhein-Westfalens existiert

Tabelle 4.3: Ausgewertete ERS-Daten

Aufnahmedatum	Satellit	Produkt	Orbit	Frame
20.09.95	ERS-1	PRI	21868	2583
29.11.95	ERS-1	PRI	22870	2583
30.11.95	ERS-2	PRI	3197	2583
13.03.96	ERS-1	PRI	24373	2583
14.03.96	ERS-2	PRI	4700	2583
17.04.96	ERS-1	PRI	24874	2583
18.04.96	ERS-2	PRI	5201	2583
20.09.95	ERS-1	SLC	21868	2583
21.09.95	ERS-2	SLC	2195	2583
29.11.95	ERS-1	SLC	22870	2583
30.11.95	ERS-2	SLC	3197	2583
13.03.96	ERS-1	SLC	24373	2583
14.03.96	ERS-2	SLC	4700	2583
17.04.96	ERS-1	SLC	24874	2583
18.04.96	ERS-2	SLC	5201	2583

außerdem das DGM 5 mit einer Rasterweite von 10 m und einer Höhengenaugigkeit von ± 30 cm bis ± 50 cm (LANDESVERMESSUNGSAMT NORDRHEIN-WESTFALEN 1996[169]). Die Daten werden als ASCII-Dateien auf unterschiedlichen Medien ausgeliefert und sind dreispaltig aufgebaut: Gauß-Krüger-Rechtswert (Spalte 1), Gauß-Krüger-Hochwert (Spalte 2), Höhe über NN (Spalte 3). Eine Zeile lokalisiert damit einen Höhenwert im dreidimensionalen Raum.

Für die vorliegende Arbeit standen zwei Datensätze des DGM 25 zur Verfügung, die zusammengenommen nahezu das gesamte Siegeinzugsgebiet abdecken: Ein westlicher Teil im Bereich der Gauß-Krüger Zone 2 und ein östlicher mit dem 3. GK-Meridian (9°öL) als Bezug. Für die drei Teilgebiete (i) Bröl, (ii) Hanf- und Pleisbach, (iii) Obere Sieg wurden zusätzlich Ausschnitte des DGM 5 verarbeitet. Diese Daten werden in den Blattsnitten der TK 1:5000 ausgeliefert. Für das Gebiet der Bröl mußten 76 DGM-Ausschnitte zusammengefügt werden, für Hanf- und Pleisbach 53 und für die Obere Sieg elf. Abbildung 4.3 zeigt die Grenzen der jeweiligen DGM-Schnitte. Auf die durchgeführten Bearbeitungsschritte wird in Kapitel 5.1 weitergehend eingegangen.

4.5 Aufbau eines Datenpools für das Siegeinzugsgebiet

Zu Referenzierungs- und Validierungszwecken wurde eine GIS-Datenbank „Sieg“ erstellt, in der Zusatzinformationen, wie Kartierergebnisse zur Landnutzung verschiedener Teileinzugsgebiete, Klimadaten usw., zusammengefaßt wurden. Hierzu mußten heterogene Datenbestände in einheitliche Formate überführt werden, um die Information im GIS konsistent zur Verfügung zu stellen. Als GI-System wurde die Kombination Arc/Info–Erdas/Imagine gewählt.

Die Vektordaten wurden als Arc-Coverages abgelegt, die direkt in Imagine zu verwenden sind, Rasterdaten wurden im Imagine .img Format vorgehalten, das bei Bedarf problemlos in das Arc-Grid-, bzw. beliebige andere Rasterformate, zu konvertieren ist. Die punktbezogenen meteorologisch/klimatologischen, hydrologischen und bodenphysikalischen Parameterwerte und Zeitreihen wurden im ASCII-Format vorgehalten, so daß sie von verschiedenen Analyseinstrumenten, wie IDL und Splus, problemlos importiert werden konnten. Die wesentlichen Datenreihen wurden in eine Oracle-Datenbank überführt, die Standorte der verschiedenen Meßstationen wurden als Punkt-Coverages in Arc/Info abgelegt und mit Metainformation zu Art und Umfang der Messungen hinterlegt.

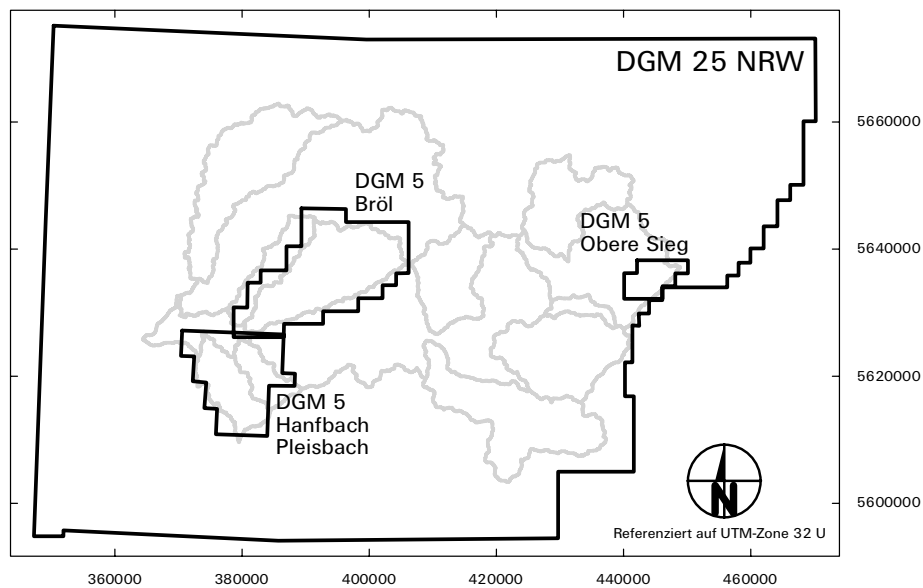


Abbildung 4.3: Höhenmodelle für das Siegeinzugsgebiet.

4.5.1 Landnutzung und Böden

Im Rahmen physiogeographischer Geländepraktika der Universität Bonn, sowie im Vorfeld verschiedener Diplomarbeiten (vgl. Tab. 4.1), wurde die Landnutzung von Teileinzugsgebieten der Sieg auf Grundlage ähnlicher Kartierschlüssel durch Geländebegehungen detailliert aufgenommen. Die Informationen wurden im Gelände in Kopien Topographischer Karten eingezeichnet, später von den Bearbeitern digitalisiert und im GIS SPANS attribuiert und abgelegt. Die Geländearbeiten fanden im wesentlichen in den Jahren 1991 bis 1995 statt. Zur Integration in die Projektdatenbank der vorliegenden Arbeit, wurden die SPANS-Vektordaten in das Arc/Info-Vektorformat konvertiert. Im einzelnen liegen damit digitale Landnutzungsinformationen aus den Teileinzugsgebieten (vgl. Abb. 5.2) Sülz, Bröl, Hanfbach, Pleisbach, Ferndorf und Nister vor. Weiterhin existieren für kleinere Gebiete Kartiererergebnisse in noch nicht digital aufgearbeiteter Form.

Aus Bodenkarten digitalisierte Information zu Bodenarten und -typen wurde, für die Teileinzugsgebiete Bröl, Pleisbach und Sülz, von SPANS nach Arc/Info überführt.

4.5.2 Klima- und Bodendaten

Meteorologische Daten (Tageswerte) von 20 DWD-Klimastationen standen zur Auswertung zur Verfügung. Für die fernerkundlichen Untersuchungen wurden die Jahrgänge von vier Stationen für 1992 (TM-Szene) und 1995/96 (ERS Tandem Mission), sowie Wochengänge von sieben Stationen für die Zeiträume vor den Überflügen ausgewertet. Im einzelnen wurden Informationen zu

- Temperatur (Tagesmittel, Minima, Maxima),
- Niederschlag (Höhe und Art),
- Windrichtung (3 Termine täglich) und -stärke,
- Luftdruck und
- Sonnenscheindauer

in die Projektdatenbank übernommen.

Von einer projekteigenen Klimastation im Einzugsgebiet der Bröl (FLÜGEL et al. 1997[99]) wurden zusätzlich meteorologische Parameter in Stundenaufösung integriert. Außerdem wurden dort im Rahmen eines DFG-Projekts zur reliefgesteuerten Hangentwässerung (FL 141/6–3 und 6–4) entlang zweier Hangcatenen an sechs Stationen Bodentemperaturen und Bodenfechtigkeiten in verschiedenen Tiefen gemessen. Diese Daten wurden für den Zeitraum der ERS Tandem-Überflüge aufgearbeitet und in die Projektdatenbank überführt.

Kapitel 5

Arbeiten und Ergebnisse

Das folgende Kapitel stellt die Datenverarbeitung, sowie die Ergebnisse der Arbeit vor. Einleitend wird der Aufbau von Höhenmodellen für das Gesamteinzugsgebiet und Teileinzugsgebiete beschrieben (Abschnitt 5.1). Die Digitalen Geländemodelle sind Voraussetzung für verschiedene Vorverarbeitungen der Satellitendaten, sowie zur Erstellung von reliefbeschreibenden GIS-Datenschichten, die in die Ableitung der HRUs eingehen.

Im Anschluß wird in Abschnitt 5.2 die Klassifikation der Landnutzung im Einzugsgebiet der Sieg aus Landsat TM-Daten behandelt. Als Ergebnis liegt eine thematische Rasterdatei vor, welche die Flächennutzung im Siegeinzugsgebiet am 05.08.1992 in acht Klassen beschreibt. Diese kann, als wesentliche Informationsschicht, in die GIS-gestützte Ableitung der HRUs, als Voraussetzung für die distributive, physikalisch basierte Flußeinzugsgebietsmodellierung, eingehen.

Im Abschnitt 5.3 wird schließlich die Verarbeitung der Mikrowellendaten beschrieben. Gemäß den in Kapitel 3 ausgeführten Arbeitszielen, werden in diesem Abschnitt methodische Zielsetzungen in den Vordergrund gestellt. Dementsprechend wird nicht mehr auf der Gesamteinzugsgebietsebene gearbeitet, sondern in einem kleineren räumlichen Ausschnitt, in dem eine gute Referenzdatenlage gegeben ist. Diese ist für eine erfolgreiche Bearbeitung und Interpretation der Mikrowellendaten von entscheidender Bedeutung.

5.1 Aufbau und Analyse der Digitalen Geländemodelle

Die Erstellung und Integration der Digitalen Geländemodelle in die GI-Systeme Arc/Info und Erdas/Imagine erfolgte im wesentlichen auf Grundlage von Daten der Landesvermessungsämter Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz. In Abschnitt 4.4 wurde das Format der Ausgangsdateien beschrieben. Die DGMs sind notwendig zur

- Generierung von Neigungs-, Expositions- und Höhenschichtenkarten und -klassen für die Ableitung der HRUs,
- Charakterisierung der flächenspezifischen Einstrahlung (von Bedeutung z.B. bei Evapotranspirationsabschätzungen),
- Topographischen Normalisierung der optischen Fernerkundungsdaten,
- Georeferenzierung der Mikrowellendaten unter Berücksichtigung des Reliefs.

Neben diesen, sich auf die Fernerkundungsarbeiten beziehenden, Funktionen, sind die Höhenmodelle für die hydrologische Modellierung von Bedeutung, da das Relief einen, die hydrologische Prozeßdynamik eines Einzugsgebiets steuernden, Kernparameter darstellt. DONKER (1992[71]) liefert verschiedene Beispiele der Nutzung Digitaler Geländemodelle in der Hydrologie, BEVEN & MOORE (1993[31]) beschreiben detailliert die Anwendungsmöglichkeiten von DGMs in der hydrologischen Modellierung.

5.1.1 Erstellung eines Höhenmodells für das Siegeinzugsgebiet

Die ASCII-Rohdaten des DGM 25 (Rasterweite 50 m, vgl. Kap. 4.4) wurden in zwei Dateien geliefert: Eine auf die Gauß-Krüger-Zone zwei referenzierte, die den westlichen Teil des Einzugsgebiets abdeckt, sowie eine auf GK-Zone drei bezogene Datei für den östlichen Teil. Das dreispaltige Dateiformat (vgl. Kap. 4.4) ist als äußerst unzweckmäßig zu bezeichnen. Da die Daten die Höhenwerte in einem rechtwinkligen, regelmäßigen Gitternetz beschreiben, wäre pro Datei eine Koordinatenangabe, zzgl. der Information des horizontalen Abstands der einzelnen Punkte, ausreichend. Mit einer derartigen Formatierung ließe sich, ohne weitere Komprimierungsverfahren, das Dateivolumen um ca. 3/4 reduzieren. Aus dem Datenformat resultierte die Problematik, daß die am Lehrstuhl vorhandenen GI-Systeme, in ihrer damaligen Version, nicht in der Lage waren, ASCII-Dateien mit 1,5, bzw. über 2 Millionen Zeilen zu importieren. Es wurde daher der Umweg über die Software IDL genommen. Die ASCII-Dateien wurden in IDL importiert, in ein für Envi zu verarbeitendes, binäres Rasterformat überführt und so in Envi importiert. Dieses Vorgehen führte zum Verlust der Georeferenz, die anschließend in Envi wieder hergestellt wurde.

Da das Siegeinzugsgebiet von einem GK-Grenzmeridian geschnitten wird, erschien eine Referenzierung auf das deutsche Gauß-Krüger-System wenig sinnvoll. Als Geodätisches Bezugssystem für die Höhenmodelle, sowie die Satelliten- und Zusatzdaten wurde daher das UTM-System gewählt, dessen Zone 32 U das gesamte Siegeinzugsgebiet umspannt. Die beiden Einzugsgebietsteilstücke wurden von GK-2, bzw. GK-3 nach UTM transformiert und anschließend mit Envi mosaickiert. Als Umrechnungsmodell fanden Polynomtransformationen 2. Grades und *Nearest Neighbor Resampling* Verwendung. Referenzierungsgrundlage waren 14, bzw. 17 gleichmäßig über das Bild verteilte Paßpunkte. Die durchschnittlichen RMS-Fehler (*Root Mean Square*) lagen an den Punkten bei 0.13 (= 6.5 m), bzw. 0.01 (= 0.5 m).

Im Ergebnis lag in Envi ein DGM des gesamten Siegeinzugsgebiets mit einer Rasterweite von 50 m vor. Dieses wurde, für die sich anschließenden GIS-Operationen, in das Arc/Info Grid-Format konvertiert.

5.1.2 Aufbau von Höhenmodellen für verschiedene Teileinzugsgebiete

Wegen der, für verschiedene Verarbeitungen nicht hinreichenden, Auflösung und Qualität des DGM 25, wurden für Teile des Siegeinzugsgebiets die genaueren DGM 5 Daten bestellt (vgl. Kap. 4.4). Bei der Konvertierung in ein GIS-Rasterformat konnte zu diesem Zeitpunkt bereits auf die Erdas/Imagine Version 8.3 zurückgegriffen werden, in der über die *Data Preparation, Create Surface* Funktionalität, ein direkter Import möglich war. Da die Daten in Blattschnitten der TK 1:5000 geliefert werden, mußten für das Einzugsgebiet der Bröl 76 DGM-Teile, für die Einzugsgebiete des Hanf- und Pleisbach 53 Teile und für ein kleineres Gebiet im Oberlauf der Sieg 11 DGM-Ausschnitte mosaickiert werden. Der Arbeitsablauf umfaßte im einzelnen:

- Import der Ausschnitte in Imagine,
- Getrennte Georeferenzierung und Mosaickierung der GK-2- und GK-3-Gebiete,
- Transformation in das UTM-System und Gesamtmosaickierung der zusammenhängenden Gebiete.

Die Ausschnitte Bröl, Hanf- und Pleisbach, sowie Obere Sieg wurden weiterhin in getrennten Dateien vorgehalten. Das DGM 5 des Bröleinzugsgebiets war für die spätere Verarbeitung der Radardaten (vgl. Kap. 5.3.1.3) von Bedeutung. Die Ausschnitte der übrigen DGM 5-Gebiete fanden im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine weitere Verwendung.

5.1.3 Hydrologische GIS-Operationen

Um die Konsistenz der Datenschichten zu gewährleisten, wurde die Sieg-Einzugsgebietsgrenze aus dem DGM 25 abgeleitet. Hierzu wurde die hydrologische Funktionalität des Arc/Info Grid-Moduls genutzt. Abbildung 5.1 zeigt das Ablaufschema der wesentlichen Arbeitsschritte, die im Folgenden erläutert und zusammengefaßt werden.

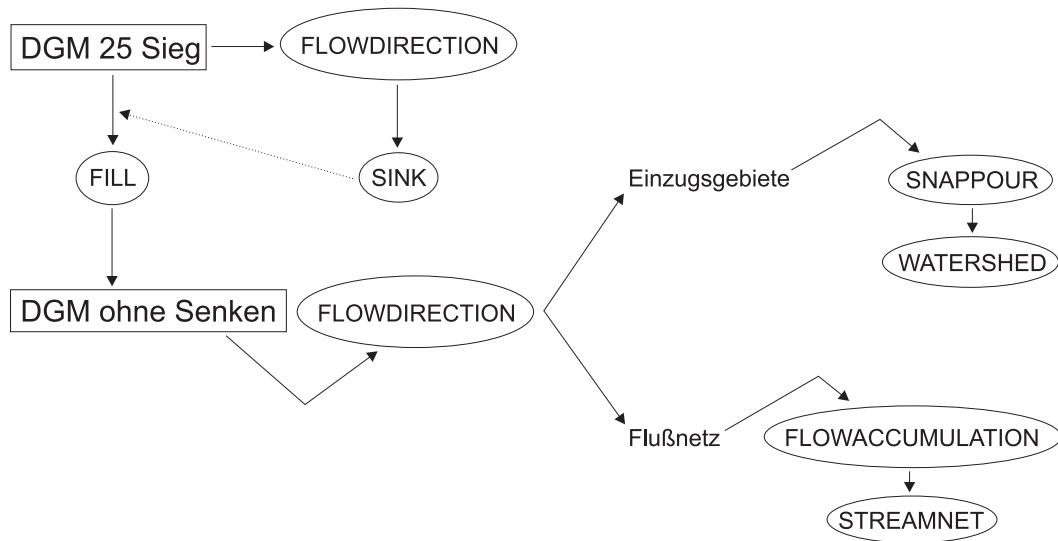


Abbildung 5.1: Arbeitsschritte der GIS-Analyse des Siegeinzugsgebiet-DGMs.

5.1.3.1 Ableitung von Einzugsgebietsgrenze und Teileinzugsgebieten

Sämtliche hydrologischen GIS-Funktionalitäten gehen von der Annahme aus, daß oberflächlicher Abfluß in der Richtung des höchsten Gefälles stattfindet. Kennt man die Flußrichtung einer jeden Zelle in ihre Nachbarzellen, so ist es möglich, Einzugsgebietsgrenzen und Flußnetzwerke aus einem digitalen Rasterhöhenmodell zu berechnen.

Um die Ausflußrichtung für jede Zelle des DGMs zu bestimmen, steht im Grid-Modul die Funktion *flowdirection* zur Verfügung. Die Vorgehensweise basiert auf einem von JENSON & DOMINGUE (1988[146]) publizierten Verfahren. Jedes Pixel wird in Beziehung zu seinen acht Nachbarzellen gesetzt. Der Fluß geht in Richtung des größten Gefälleindexwerts (GIW), der sich folgendermaßen berechnet: $GIW = \text{Höhenänderung} / \text{Distanz} \cdot 100$. Die Distanz wird zwischen den Zellenmittelpunkten berechnet, bei einer Rastergröße von einem Meter haben zwei orthogonal benachbarte Zellen eine Distanz von 1 m und zwei diagonal benachbarte eine Distanz von 1.414 m. Ist der Gefälleindexwert für alle benachbarten Zellen gleich, so wird die Nachbarschaftsumgebung vergrößert, bis sich eine eindeutige Ausflußrichtung ergibt. Hat eine Zelle nur höhere Nachbarn, so wird sie bis zur Höhe des niedrigsten benachbarten Pixels aufgefüllt und fließt in dessen Richtung aus. Falls zwei benachbarte Zellen ineinander entwässern, werden sie als Senken eingestuft und die Ausflußrichtung bleibt undefiniert. Ergibt sich für eine Zelle, die Teil einer Senke ist, derselbe GIW in mehrere Richtungen, so wird für den neuen Pixelwert die Summe dieser Richtungen (s.u.) erzeugt, die *flowdirection* bleibt ebenfalls undefiniert. Ist die Zelle nicht Teil einer Senke, wird nach einem Verfahren von GREENLEE (1987[126]) die Richtung der höchsten Abflußwahrscheinlichkeit bestimmt. Mit *flowdirection* wird eine neue 8 bit Rasterdatei erzeugt, die nicht den Höhenwert jeder Zelle, sondern deren Ausflußrichtung nach dem folgenden Schema enthält (vgl. Tab. 5.1):

32	64	128
16	↑	1
8	4	2

Entwässert das Zentralpixel z.B. in das direkt darüberliegende Bildelement, so würde es im Ausflußrichtungsdatensatz den Wert 64 zugewiesen bekommen.

Die Berechnung der Ausflußrichtung ist der erste notwendige Schritt für die Mehrzahl hydrologischer GIS-Funktionalitäten. Insofern kommt einer konsistenten, fehlerfreien Bestimmung der *flowdirection* besondere Bedeutung zu. Eine wesentliche Fehlerquelle bei der Bestimmung, stellen abflußlose Senken dar, denen kein Richtungswert zugeordnet werden kann. Derartige Senken treten in interpolierten Raster-DGMs häufig als Prozessierungsfehler auf, können aber auch tatsächlich in Landschaften vorhanden sein. Um Senken zu identifizieren und aufzufüllen stehen in Grid die Funktionen *sink* und *fill* zur Verfügung. Mit *sink* lassen

sich Senken identifizieren und markieren, *fill* erlaubt diese dann aufzufüllen. Beide Funktionen erlauben die Definition bestimmter Parameter zur Steuerung des Prozesses, um zu vermeiden, daß tatsächlich im Gelände vorhandene Senken fehlerhaft aufgefüllt werden. In jedem Fall ist die Eliminierung der Senken zu empfehlen, wenn später auf Grundlage der Ausflußrichtung Einzugsgebiete abgeleitet und Flußnetze berechnet werden sollen.

Für das DGM des Siegeinzugsgebiets wurde zunächst die *flowdirection* berechnet. Die Ausgabedatei diente als Eingabe für die *sink* Funktion, die zahlreiche Senken identifizierte. Diese wurden daraufhin in einem iterativen Prozeß mit der Funktion *fill* aufgefüllt. Im Ergebnis lag ein neues, konsistent senkenfreies, DGM vor. Aus diesem konnte anschließend mit *flowdirection* eine fehlerfreie und lückenlose Ausflußrichtungsdatei erzeugt werden, auf deren Grundlage die weiteren Verarbeitungen durchgeführt wurden.

Zunächst wurde mit *watershed* das Einzugsgebiet der Sieg aus dem senkenfreien Höhenmodell abgeleitet. Der Ausflußpunkt der Sieg in den Rhein wurde mit *snappour* bestimmt. Die *snappour*-Funktion ermittelt innerhalb eines gegebenen Ausschnitts den Punkt maximaler Fließakkumulation (vgl. Kap. 5.1.3.2), dieser stellt einen sinnvollen Ausgangspunkt für die Einzugsgebietsableitung dar. Die erzeugte Einzugsgebietsgrenze erwies sich an zwei Stellen als fehlerhaft, zum einen im Bereich der Siegmündung, wo nahezu kein Gefälle mehr vorhanden ist, hier reichen Rasterweite und Höhengenaugigkeit des DGM 25 nicht aus, zum anderen im äußersten Osten des Einzugsgebiets, wo das DGM in zwei kleinräumigen Gebieten nicht bis an die Einzugsgebietsgrenze heranreichte.

Für die fehlenden Gebiete im Osten wurden zunächst die TK25-Blätter 5114 und 5214 gescannt. Nach der Erstellung der Georeferenz, konnten die Höhenlinien auf dem Bildschirm digitalisiert werden. Aus den erstellten Vektoren wurden mit Arc/Info zwei Raster-DGMs mit 50 m Pixelgröße interpoliert und mit dem Gesamt-DGM mosaickiert. Die Einzugsgebietsgrenze wurde daraufhin erneut mit *watershed* berechnet.

Ein ähnliches Verfahren fand im Bereich der Siegmündung Anwendung. Zunächst wurde die entsprechende TK25 (Blatt 5208) gescannt und georeferenziert, anschließend die Einzugsgebietsgrenze auf dem Bildschirm digitalisiert und die korrekte Grenze in die von *watershed* generierte Datei übertragen.

Abschließend wurden mit *watershed* 14 Teileinzugsgebiete der Sieg abgeleitet. Die jeweiligen Ausflußpunkte konnten aus dem mit *streamnet* erzeugten Flußnetz übernommen werden (vgl. Kap. 5.1.3.2). Abbildung 5.2 zeigt die Grenzen der abgeleiteten Teileinzugsgebiete.

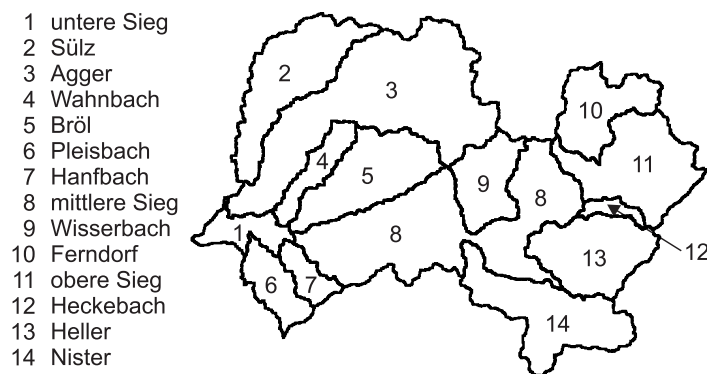


Abbildung 5.2: Teileinzugsgebiete der Sieg.

5.1.3.2 Berechnung des Flußnetzes

Die Ableitung eines Netzwerks von Tiefenlinien aus einem Raster-DGM basiert auf der Bestimmung der Fließakkumulation für jede Zelle. Diese ist als Summe der in eine Rasterzelle entwässernden Zellen definiert. In Arc/Info wird die Fließakkumulation auf Grundlage der Ausflußrichtung (*flowdirection*) mit *flowaccumulation* bestimmt. Die Funktion erzeugt eine neue Rasterdatei, die für jede Rasterzelle die Anzahl der in sie entwässernden Zellen enthält. Zellen mit hohem Fließakkumulationswert stellen Bereiche potentieller Abflußkonzentration dar, bei Zellen mit einer Fließakkumulation von Null handelt es sich um topographische Kammbereiche.

Tabelle 5.1: Ableitung von Ausflußrichtung und Fließakkumulation aus einem Raster-DGM

Höhenwerte						Ausflußrichtung						Fließakkumulation					
78	72	69	71	58	49	002	002	002	004	004	008	00	00	00	00	00	00
74	67	56	49	46	50	002	002	002	004	004	008	00	01	01	02	02	00
69	53	44	37	38	48	001	001	002	004	008	004	00	03	07	05	04	00
64	58	55	22	31	24	128	128	001	002	004	008	00	00	00	20	00	01
68	61	47	21	16	19	002	002	001	004	004	004	00	00	00	01	24	00
74	53	34	12	11	12	001	001	001	001	004	016	00	02	04	07	35	01

(Nach Beispielen aus der Arc/Info Online-Dokumentation)

Tabelle 5.1 verdeutlicht die Ableitung von Ausflußrichtung und Fließakkumulation aus einem Raster-DGM anhand eines konkreten Beispiels. Die in der Höhenwertetabelle in Fettdruck gehaltene Zelle (37) entwässert in die direkt unterhalb gelegene Zelle mit dem Höhenwert 22 und bekommt daher in der Ausflußrichtungstabelle den Wert 4 (Fettdruck). Vergegenwärtigt man sich die Ausflußrichtungswerte der Nachbarzellen, so stellt man fest, daß insgesamt fünf Zellen in die Zelle mit dem Höhenwert 37 entwässern (Zellen mit kursiven Ausflußrichtungswerten). In der Fließakkumulationstabelle erhält diese Zelle daher den Wert 5 (Fettdruck). Bei den Ausflußrichtungen ist zu berücksichtigen, daß die Entwässerung nicht zwangsläufig in die Nachbarzelle mit dem niedrigsten absoluten Höhenwert erfolgt, da über die, der Ausflußrichtungsbestimmung zugrundeliegenden, Berechnung des Gefälleindexwerts (vgl. Kap. 5.1.3.1) die Horizontalentfernungen der Zellenmitten einbezogen werden.

Um aus der Fließakkumulationsdatei ein Flußnetz zu erzeugen, muß lediglich ein Schwellenwert gesetzt werden, bei dessen Unterschreitung den entsprechenden Zellen der Wert Null, bei Überschreitung der Wert Eins zugeordnet wird. Je nach Höhe des Schwellenwerts, lassen sich unterschiedlich fein verästelte Tiefenliniennetze erzeugen. Für das Siegeinzugsgebiet wurden Netze in verschiedenen Auflösungen ausgewiesen, Abbildung 5.3 zeigt ein Flußnetz, daß die Sieg und wesentliche Vorfluter enthält.

Die Qualität und hydrologische Aussagekraft der generierten Netzwerke wird durch die Subjektivität der Schwellenwerthöhe und die starke Abhängigkeit von der Güte der Fließakkumulationsmatrix eingeschränkt (MEIJERINK et al. 1994[205]). Eine typische Erscheinung, v.a. in DGM-Bereichen mit geringen Gradienten, sind parallele Fließakkumulationslinien, die in der Realität keine Entsprechung finden. Diese sind Ergebnis der Schwächen der angewandten Methodik, vor allem der Generalisierung des Reliefs in Rasterzellen und den idealisierenden Annahmen zur Generierung der Fließakkumulation. Sie können mit unterschiedlichen Verfahren ausgedünnt werden, lassen sich aber nicht gänzlich eliminieren.

Die im Siegeinzugsgebiet aus dem DGM 25 abgeleiteten Netzwerke erwiesen sich, beim Vergleich mit TK25-Information, in den stärker reliefierten Bereichen des Untersuchungsgebiets als durchaus akkurat. Probleme bestanden erwartungsgemäß in den gering reliefierten Gebieten, z.B. im Unterlauf der Sieg. Die Konfluenzen der Sieg und ihrer Hauptnebenarme wurden zur Ableitung der Teileinzugsgebiete herangezogen (vgl. Kap. 5.1.3.1).

Die Grid-Rasterdateien der Gesamteinzugsgebietsgrenze und der Teileinzugsgebiete wurden schließlich mit *gridpoly* zu Arc/Info Polygon-Coverages vektorisiert. Die Tiefenliniennetze wurden mit *streamline* ins Vektorformat überführt, hierbei wurden die Linien als hangabwärts gerichtete Arcs attribuiert.

5.1.4 Reliefklassifikationen

Für die hydrologische Charakterisierung und Modellierung von Einzugsgebieten lassen sich aus dem Digitalen Geländemodell weitere Informationsschichten extrahieren. Für die Ableitung von HRUs sind vor

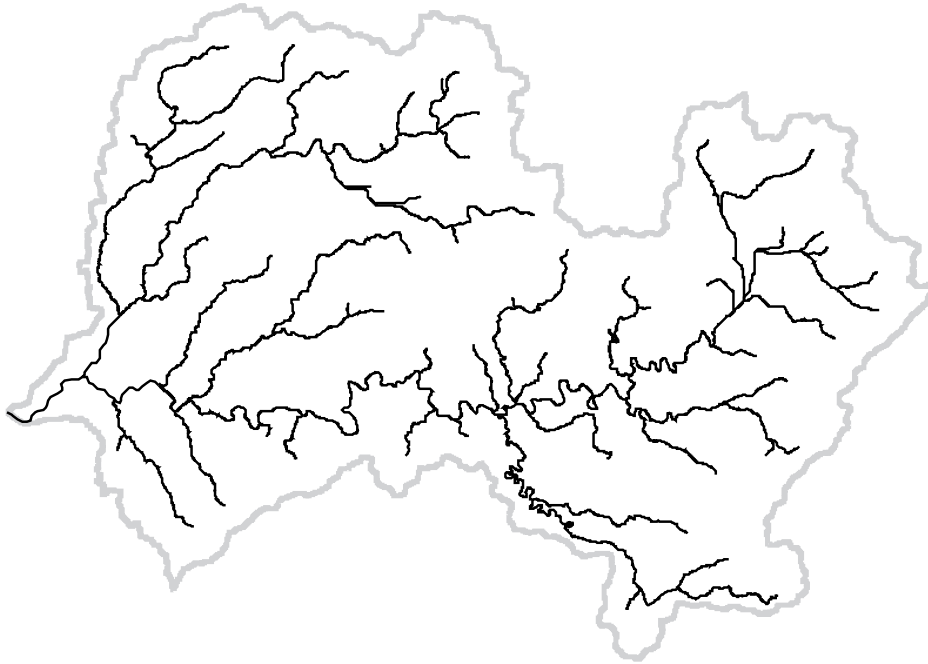


Abbildung 5.3: Die Sieg und ihre Hauptnebenarme abgeleitet aus dem DGM 25.

allem

- Mittlere Höhenlage der Flächen,
- Hangneigung und
- Exposition

wesentliche Eingangsparameter (FLÜGEL 1996[98], BONGARTZ 1996[34], STAUDENRAUSCH 1996[269]). Abbildung A.1 in Anhang A zeigt eine geschummerte Reliefdarstellung des Siegeinzugsgebiets. Grundlage sind die in den Abschnitten 4.4 und 5.1.3.1 beschriebenen Höhendaten. Weiterhin wurde aus den DGMs die Hangneigung in folgenden fünf Klassen (vgl. FLÜGEL 1996[98]) abgeleitet:

- $0^\circ - <2^\circ$,
- $2^\circ - <5^\circ$,
- $5^\circ - <10^\circ$,
- $10^\circ - <20^\circ$ und
- $\geq 20^\circ$.

Die Bestimmung erfolgte für das Gesamteinzugsgebiet auf Grundlage der DGM 25-Daten, für das Einzugsgebiet der Bröl wurden die Hangneigungen mit den genaueren DGM 5-Daten bestimmt. Abbildung A.2 zeigt beispielhaft die Hangneigungskarte für den Ausschnitt des Bröleinzugsgebiets.

Analog zu FLÜGEL (1996[98]) wurden, zur Vorbereitung der HRU-Ableitung, schließlich die Expositionen im Siegeinzugsgebiet in vier Klassen (N, E, S, W¹) aus den Höhenmodellen abgeleitet. Die Expositionskarte für das Bröleinzugsgebiet zeigt Abbildung A.3.

Mit Höhenschichten-, Neigungs- und Expositionsinformation liegen somit die zur Ableitung der HRUs notwendigen, reliefgesteuerten Parameter in aufbereiteter Form vor.

¹N = NW→NE = $315^\circ - 360^\circ - 45^\circ$
 E = NE→SE = $45^\circ - 135^\circ$
 S = SE→SW = $135^\circ - 225^\circ$
 W = SW→NW = $225^\circ - 315^\circ$.

Tabelle 5.2: Allgemeine Bandstatistik der TM-Szene vom 05.08.1992

Kanal	Min. [DN [†]]	Max. [DN]	μ	σ
1	45	255	60.12	7.25
2	15	255	25.25	5.27
3	11	255	23.06	8.03
4	9	255	74.92	22.99
5	3	255	61.21	23.29
7	0	255	20.68	10.42

[†] Digital Number: 8 bit Wert im Ausgangsdatensatz

5.2 Landnutzungserfassung mit Landsat TM-Daten

Bei der Erfassung der Landnutzung im Siegeinzugsgebiet aus optischen Landsat TM-Daten fand eine dreistufige Methodik Anwendung, die sich in Vorverarbeitung der Datensätze, Klassifikationsläufe und Nachbearbeitung der Ergebnisse zusammensetzte. Die Gliederung des folgenden Kapitels lehnt sich an diese Methodik an: Zunächst werden in Abschnitt 5.2.1 die Vorverarbeitungsschritte der (i) Atmosphärenkorrektur, (ii) Geometrischen Korrektur und Referenzierung sowie der (iii) Topographischen Normalisierung beschrieben. Abschnitt 5.2.2 widmet sich dem Ablauf der Klassifikation, Abschnitt 5.2.3 faßt die Nachbearbeitungen des Klassifikationsergebnisses zusammen. Abbildung 5.4 beschreibt die Arbeitsabläufe in Form eines Flußdiagramms.

Insgesamt erfolgt die Darstellung im wesentlichen am Beispiel der Landsat TM-Szene vom 05.08.1992, die später zur Landnutzungsklassifikation herangezogen wurde. Die übrigen Szenen (vgl. Kap. 2.4.1.1, Tab. 4.2) finden lediglich Erwähnung, wenn auf ihnen abweichende Verarbeitungen durchgeführt wurden.

Die Bearbeitung der optischen Satellitendaten erfolgte im wesentlichen mit den Systemen Erdas/Imagine 8.2 und Envi 2.0.

5.2.1 Vorverarbeitung der optischen Satellitenszenen

Um sich einen ersten Überblick über die spektrale Charakteristik der optischen Kanäle der TM-Szene vom 05.08.1992 zu verschaffen, wurden aus den Daten kanalspezifische Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ) berechnet. Tabelle 5.2 faßt die Ergebnisse zusammen. Insgesamt wird die 8 bit Datentiefe von den Infrarotkanälen vier und fünf am breitesten genutzt. Von Bedeutung für den spektralen Informationsgehalt ist hierbei weniger die absolute Höhe der Mittelwerte, als vielmehr die Breite der Grauwertvarianz, die sich in der Höhe der Standardabweichung ausdrückt. Im Vorfeld der Untersuchung ist weiterhin die Korrelation der Kanäle untereinander von Bedeutung. Im späteren Klassifikationsprozeß ist man bestrebt, die Einbeziehung redundanter Information zu vermeiden, da diese den Rechenaufwand erhöht und unter Umständen das Klassifikationsergebnis negativ beeinflussen kann.

Mit Imagine wurden für Tabelle 5.3 die Kovarianzen (E) der Kanäle berechnet, aus denen dann durch einfache Normierung der Korrelationskoeffizient r bestimmt wurde (vgl. z.B. BASLER 1968[14]). Auffällig sind die hohen Korrelationen der Kanäle im Bereich des sichtbaren Lichts (1, 2, 3). Die Infrarotkanäle korrelieren demgegenüber wesentlich schwächer und bieten sich somit, in erster, grober Näherung, für die direkte Einbeziehung in eine Multispektralklassifikation an. Insbesondere der Kanal vier, im Bereich des nahen Infrarots, stellt spektral in den anderen Kanälen wenig repräsentierte Information zur Verfügung und streut relativ breit über das 8 bit Sensorspektrum. Dies ist eine in von Vegetation bedeckten Landschaften typische Erscheinung, da die maximale Chlorophyll-Reflexion im Bereich des nahen Infrarots liegt. Reflexionswerte im NIR-Bereich sind daher für Vegetationsanalysen in jedem Skalenbereich, vom CIR-Luftbild bis zu NOAA-Radiometerdaten, von besonderem Interesse.

Die Korrelationswerte betreffend, muß einschränkend die Limitierung von r erwähnt werden, der lediglich ein Maß dafür darstellt, wie gut sich die gegenseitige Abhängigkeit als linearer, funktionaler Zusammenhang darstellen läßt. Daraus folgt, daß sich zwar aus einer statistischen Unabhängigkeit zweier Kanäle ein r von

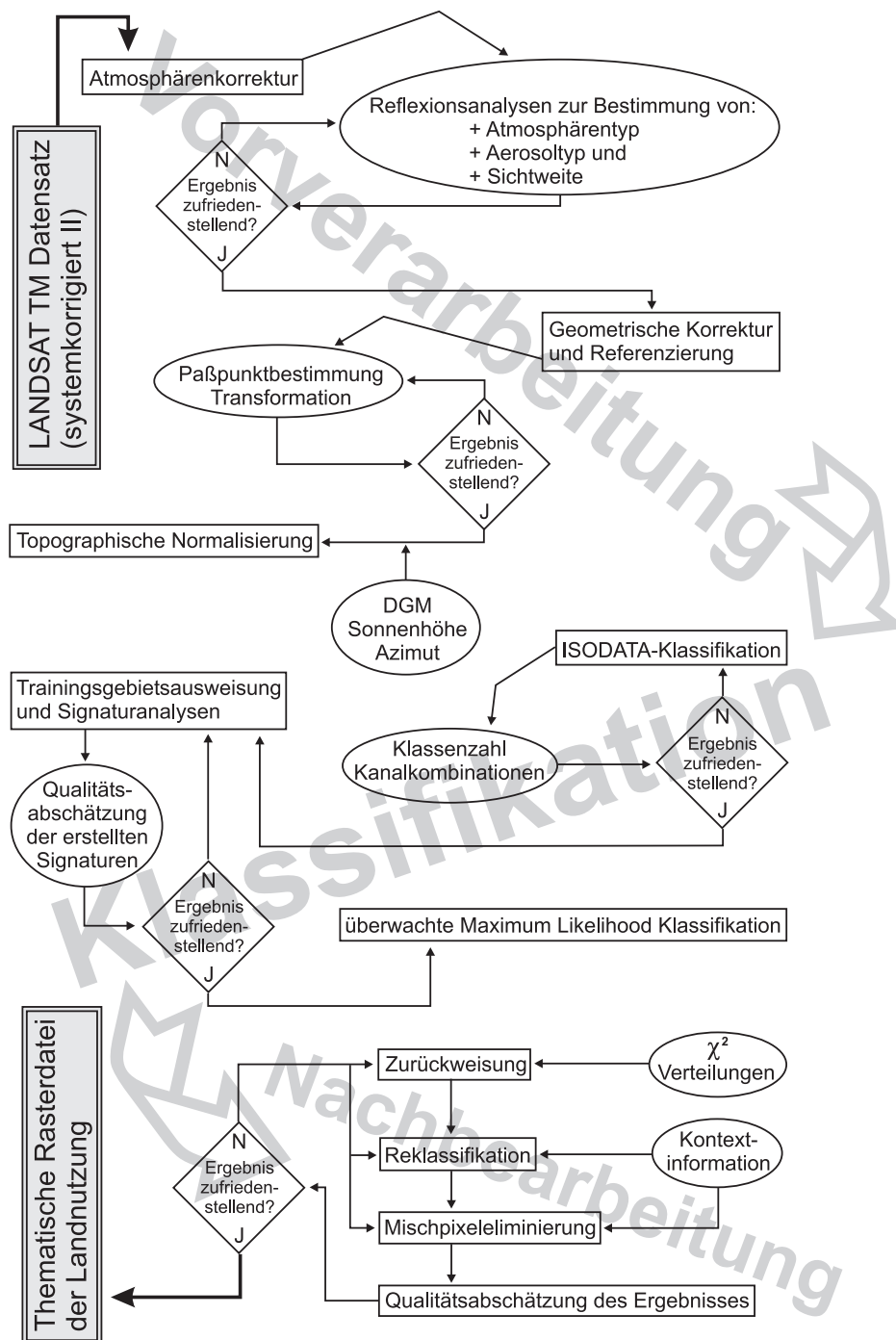


Abbildung 5.4: Organigramm der TM-Datenauswertung.

null ergibt, demgegenüber aber aus $r = 0$ nicht unbedingt eine statistische Unabhängigkeit zu folgern ist. Dennoch ist der Koeffizient für eine erste Beurteilung des Bildmaterials von Nutzen.

In der 1989er Novemberszene mußte im Vorfeld der Arbeiten ein einzeliger Scanlinienausfall des Sensors im nordwestlichen Quadranten der Szene eliminiert werden. Hierzu wurde ein 5·5 Median-Filter verwendet. Die TM-Szenen von 1986 und 1992 waren fehlerfrei und konnten den Vorverarbeitungen unverändert übergeben werden.

Tabelle 5.3: Kovarianzen (E) und Korrelationen (r) der TM-Kanäle

Kanal		1	2	3	4	5	7
1	E	52.57	35.41	53.05	25.39	107.78	61.82
	r	1.00	0.93	0.91	0.15	0.64	0.82
2	E	*	27.63	39.76	39.36	94.99	49.03
	r	*	1.00	0.94	0.33	0.78	0.90
3	E	*	*	64.49	17.79	129.42	74.82
	r	*	*	1.00	0.10	0.69	0.89
4	E	*	*	*	528.66	351.51	80.29
	r	*	*	*	1.00	0.66	0.34
5	E	*	*	*	*	542.57	215.82
	r	*	*	*	*	1.00	0.89
7	E	*	*	*	*	*	108.59
	r	*	*	*	*	*	1.00

5.2.1.1 Atmosphärenkorrektur

Die Atmosphäre beeinflusst die, von flugzeug- und satellitengetragenen Sensoren gemessene, Reflexionsintensität im Spektralbereich von $0.4 \mu\text{m}$ bis $2.5 \mu\text{m}$ entscheidend: Sie fügt einen Signalanteil hinzu, der unabhängig von der Reflexionsoberfläche ist und sie absorbiert und streut Reflexionsanteile je nach Charakter der Moleküle und Aerosole, die zwischen der reflektierenden Oberfläche und dem Sensor liegen. Insbesondere die Streuung in benachbarte Pixel stellt ein Problem dar, das sich, v.a. in hochauflösenden, optischen Satellitendaten, in Form von Kontrastminderung und Schärfeverlust manifestiert.

Neben der Atmosphäre stellt die Sonnenhöhe einen die Reflexion entscheidend beeinflussenden Parameter dar, der mit einer Atmosphärenkorrektur normalisiert werden kann. Insbesondere bei multitemporalen Betrachtungen ist eine Eliminierung des atmosphärischen Einflusses und eine Normalisierung des von Aufnahme zu Aufnahme unterschiedlichen Sonnenstands zwingend erforderlich (RICHTER 1996[247]).

Dem Einfluß der Atmosphäre in Fernerkundungsdaten und den Möglichkeiten, diesen zu verringern widmet sich ein breites Spektrum physikalisch ausgerichteter Literatur. Einen Überblick liefern EYMARD & TACONET (1995[92]). CONEL (1990[50]) beschreibt eine umfangreiche Studie zur Quantifizierung atmosphärischer Einflüsse und deren Korrektur in Landsat TM-Daten. RICHTER (1990[246]) nutzt einen Vorläufer des in dieser Arbeit genutzten Atcor-Programms um TM-Daten zu korrigieren.

Die Atmosphärenkorrektur wurde mit dem Programm Atcor2 V1.0 für Imagine durchgeführt. Kernstück der Software ist ein Katalog, der eine Vielzahl atmosphärischer Korrekturfunktionen für unterschiedlichste Anwendungsbedingungen in Form von *look up tables* vorhält. Im einzelnen stehen neun Standardatmosphären zur Verfügung, die jeweils durch bestimmte Höhenprofile von Luftdruck, Temperatur, Wasserdampfgehalt und Ozon-Konzentration charakterisiert sind:

1. Midlatitude Summer Atmosphere,
2. US Standard Atmosphere 1976,
3. Tropical Atmosphere,
4. Arid Atmosphere,
5. Humid Atmosphere,
6. Subarctic Summer Atmosphere,
7. Fall (Autumn) Atmosphere,
8. Midlatitude Winter Atmosphere,
9. Subarctic Winter Atmosphere.

Tabelle 5.4: Reflexion in den Referenzpixeln, TM vom 05.08.1992

λ [μm]	wald2	wald1	wass	grlnd	agr	bod	bbng
0.486	0.203	0.624	0.832	1.361	1.703	6.175	4.181
0.570	2.047	2.690	2.493	4.673	5.824	11.938	7.014
0.661	1.422	1.685	1.370	2.445	2.954	15.950	7.077
0.838	15.543	36.970	3.043	59.345	55.537	32.168	16.849
1.676	6.280	16.505	1.227	22.126	15.125	38.776	16.222
2.216	2.33	6.230	0.146	8.966	5.290	28.322	14.374

Diese können mit den vier Aerosoltypen *rural*, *urban*, *desert* und *maritime* kombiniert werden. Weiterhin läßt sich die Aerosolkonzentration über den Parameter der Sichtweite berücksichtigen, der sich zwischen 4 km und 120 km bewegen kann. Damit ist der Bereich von dunstigen bis zu sehr klaren Sichtverhältnissen abgedeckt. Die Höhe über NN kann sich zwischen 0 km und 1.5 km bewegen, unterschiedliche Höhen haben unterschiedliche Druckverhältnisse zur Folge. Schließlich geht die Sonnenhöhe zum Aufnahmezeitpunkt in die Korrektur mit ein, sie kann sich zwischen 30° und 90° bewegen.

Im Rahmen der Atmosphärenkorrektur werden die relativen Grauwerte der Ausgangsdaten in physikalische Quantitäten umgerechnet. Atcor erzeugt Oberflächenreflexionswerte (*Ground Reflectance Values*), die in Prozent angegeben werden.

Die Korrekturfunktionen müssen die unterschiedlichen Arbeitsweisen der Aufnahmesysteme berücksichtigen und sind daher für jeden Sensor und jeden Spektralkanal speziell kalibriert. Die von mir genutzte Version Atcor 2V1.0 unterstützt die LANDSAT Sensoren TM und MSS, Spot HRV, MOMS-02 und verschiedene IRS-LISS Instrumente.

Die Arbeitsschritte im Vorfeld der eigentlichen Atmosphärenkorrektur dienen der Festlegung eines angemessenen Atmosphären- und Aerosoltyps und der Schätzung der Sichtweite aus der Szene heraus, wenn diesbezüglich keine Zusatzinformationen vorhanden sind. Hierzu stehen das *Spectra*-Modul und Referenztabellen typischen Reflexionsverhaltens für unterschiedliche atmosphärische Bedingungen und verschiedene reflektierende Objekte zur Verfügung. *Spectra* erlaubt die graphische Darstellung von spektraler Ausgangscharakteristik eines Pixels und seiner näheren Umgebung über beliebige Kanäle und die Simulation der Wirkung einer Atmosphärenkorrektur mit den eingestellten Parametern für Atmosphäre, Sichtweite und Aerosoltyp. Durch Vergleich der Wirkung verschiedener Einstellungen auf Objekte unterschiedlichen spektralen Reflexionsverhaltens und Referenzreflexionstabellen, nähert man sich in einem iterativen Prozeß sinnvollen Ausgangsparametern für die sich anschließende Atmosphärenkorrektur.

In die Abschätzung gingen, für die Szene vom 05.08.1992, Auswertungen der DWD-Daten zur Luftfeuchtigkeit und Temperatur ein (vgl. Kap. 4.5.2). Die Tests verschiedener Atmosphären- und Aerosoltypen sowie Sichtweiten ergaben eine optimale Korrektur bei *Midlatitude Summer Atmosphere*, *Urban Aerosol* und einer Sichtweite von 40 km. Nachdem diese Eingangsparameter bestimmt sind folgt der weitgehend automatisierte Prozeß der Atmosphärenkorrektur. Man kann zwischen zwei Modulen wählen, die im wesentlichen dieselben Abläufe initiieren, sich aber in der räumlichen Behandlung des Bildmaterials unterscheiden: Ein Modul ist bei, über dem Bildausschnitt einheitlichen atmosphärischen Verhältnissen anwendbar, das andere erlaubt die Definition unterschiedlicher Szenensegmente, die mit verschiedenen Parametern besetzt und getrennt korrigiert werden können. Letzteres war in keiner der drei korrigierten TM-Szenen notwendig. Beide Module können bei Vorkommen von Dunst dessen Einfluß mit unterschiedlichen Methoden, die ein unterschiedlich starkes Maß an Anwenderinteraktion erfordern, minimieren. Eine Dunstkorrektur war bei der 1986er Maiszene im südwestlichen Bildausschnitt notwendig. Als Nebenprodukt der Dunstkorrektur erlaubt Atcor die Erstellung von Binär-Masken der Dunst- und Wolkengebiete.

Zur Bestimmung des geeigneten Atmosphären- und Aerosoltyps wurden im *Spectra*-Modul die Reflexionskurven von sieben Oberflächen mit unterschiedlichen spektralen Reflexionseigenschaften erzeugt: Nadelwald (*wald2*), Laub- und Mischwald (*wald1*), Wasser (*wass*), Grünland (*grlnd*), Boden (*bod*), Ackerbau (*agr*) und überbaute Bereiche (*bbng*). Tabelle 5.4 zeigt die Reflexionswerte in den Referenzpixeln für die Einstellungen mit denen die Atmosphärenkorrektur der 1992er TM-Szene durchgeführt wurde.

Die wesentlichen Eingangsparameter für die Atmosphärenkorrektur der drei TM-Szenen faßt Tabelle 5.5 zu-

Tabelle 5.5: Parameter der Atmosphärenkorrektur

TM-Szene vom	01.05.1986	17.11.1989	05.08.1992
Sensorkalibrierungs-Datensatz	sm.cal	sm.cal	sm.cal
Atmosphärenmodell	Midl. Sum. Atm.	Midl. Wint. Atm.	Midl. Sum. Atm.
Aerosoltyp	Rural	Urban	Urban
Low Pass Filtergröße [Pixel]	33	33	33
Winkel Sonne–Zenith [°]	43.10	70.00 (73.70)	42.50
Sichtweite [km]	20.00	25.00	40.00
mittl. Geländehöhe [km]	0.29	0.29	0.29
Dunstkorrektur	ja	nein	nein
c1	0.3	*	*
c2	4.0	*	*
c3	8.0	*	*
Dunst-Grenzalgorithmus	Histogr. Match	*	*

sammen. Zur Sensorkalibrierung wurden die Koeffizienten der DLR SM-Gruppe verwendet. Diese lieferten bei den Vergleichen unterschiedlicher Ausgangsparameter die besten Anpassungen an die Referenzreflexionswerte. Die 1986er Maiszene wurde mit Midlatitude Summer Atmosphere, Rural Aerosol und einer Sichtweite von 20 km korrigiert. Zur Reduzierung des Streuungseffekts wird standardmäßig ein Low Pass Filter verwendet. Die Reichweite des Streuungseinflusses liegt normalerweise zwischen 500 m und 1000 m, kann aber bei starker atmosphärischer Streuung und bestimmten Oberflächen auch bis zu 3 km betragen. Die Größe des Filters sollte daher bei normalen Bedingungen zwischen 1000 m und 2000 m liegen. Für alle drei Szenen wurde eine Matrixgröße von 33 Pixeln (entsprechend $990 \cdot 990 \text{ m}^2$) gewählt. Als durchschnittliche Höhe des Einzugsgebiets wurden 290 m angegeben.

Wie weiter oben bereits erwähnt, mußte im südöstlichen Bereich der 1986er Szene eine Dunstkorrektur vorgenommen werden. Die Bestimmung von Dunst- und Wolkengebieten basiert auf einem halbautomatischen Verfahren. Der Anwender kann durch die Einstellung von zwei Koeffizienten die Erkennung und Markierung von Dunstpixeln steuern, ein Koeffizient dient der Ausmaskierung von Wolkengebieten. Um von Dunst beeinflusste Pixel zu erfassen, wird zunächst aus den Ausgangsdaten der TM-Kanäle 1 (tmk1) und 3 (tmk3) für jedes Pixel der Wert der Dunstkomponente (TC) der Tasseled Cap-Transformation (CRIST & CIGONE 1984[55]) nach folgender Formel berechnet:

$$TC = 0.846 \cdot tmk1 - 0.464 \cdot tmk3. \quad (5.1)$$

Anschließend werden Pixel als dunstbeeinflusst ausgewiesen, wenn sie folgender Bedingung genügen:

$$DN > \mu_{TC} + c1 \cdot \sigma_{TC} \quad (5.2)$$

wobei μ_{TC} und σ_{TC} als Mittelwert und Standardabweichung der TC-Werte und $c1$ als der vom Anwender einzusetzende Schwellenwert definiert sind (DN steht für Digital Number und meint den Wert des entsprechenden Pixels im Ausgangsdatensatz). Da städtische Agglomerationen häufig hohe Reflexionswerte im Bereich der Blaureflexion (TM-Band 1) haben, wird mit $c2$ ein weiterer Schwellenwert definiert, um zu vermeiden, daß diese Gebiete fälschlich als Dunst ausgewiesen werden. Hierbei findet folgende Formel Anwendung:

$$DN > \mu_{red} + c2 \cdot \sigma_{red} \quad (5.3)$$

μ_{red} und σ_{red} beschreiben Mittelwert und Standardabweichung von TM-Kanal 3. Pixel die der Bedingung genügen, z.B. urbane Räume mit erhöhten Reflexionswerten im roten Spektralbereich, werden nicht als Dunst ausgewiesen. Zur Erkennung von Wolken muß vom Anwender der Koeffizient $c3$ gesetzt werden. Mit Hilfe der folgenden Formel werden Wolkengebiete auf Grundlage ihrer hohen Reflexion im blauen Spektralbereich ausgewiesen (μ_{blue} , σ_{blue} : Mittelwert und Standardabweichung im TM-Kanal 1):

$$DN > \mu_{blue} + c3 \cdot \sigma_{blue} \quad (5.4)$$

Die zur Korrektur der 1986er TM-Szene eingesetzten Werte für $c1$, $c2$ und $c3$ finden sich ebenfalls in Tabelle 5.5. Nach der Bestimmung der von Dunst betroffenen Gebiete werden die Grauwertverteilungen

in den Dunstregionen an die der dunstfreien Gebiete über ein *Histogram Matching* angepaßt. Für die Modellierung der Übergangsregionen stehen in Atcor verschiedene Verfahren zur Verfügung. Der in dieser Arbeit verwendete Algorithmus definiert um die Dunstgebiete eine 77 Pixel große Übergangszone, die in fünf Ringe aufgeteilt wird. Die Grauwertverteilungen dieser Ringzonen werden getrennt an die Histogramme der dunstfreien Regionen angepaßt. Dieses Vorgehen garantiert „sanfte“ Übergänge zwischen den von Dunst beeinflussten und den klaren Regionen.

Die Novemberszene von 1989 wurde mit den Einstellungen Midlatitude Winter Atmosphere, Urban Aerosol und einer Sichtweite von 25 km korrigiert. Die Sonnenhöhe ($90^\circ - \text{Winkel Sonne/Zenith}$) ist mit 16.3° extrem niedrig (vgl. Kap. 5.2.1.3), was die Informationsextraktion, vor allem in den stärker reliefierten Teilen des Siegeinzugsgebiets, erheblich einschränkt. Für die Atmosphärenkorrektur wurde Atcor der programmintern höchst zulässige Sonnen-/Zenithwinkel von 70° übergeben. Die Sonnenhöhen wurden mit einem astronomischen Analysepaket individuell für die Aufnahmezeitpunkte bestimmt.

Die atmosphärenkorrigierten Daten wurden in neuen 8 bit-Dateien abgelegt und anschließend geometrisch korrigiert und referenziert.

5.2.1.2 Georeferenzierung

Für die Referenzierung der TM-Szene vom 05.08.1992 wurden zunächst 46 Paßpunkte im Satellitenbild und den entsprechenden Topographischen Karten 1:25.000 identifiziert. Abbildung 5.5 zeigt die Lage der Paßpunkte im Verhältnis zum Siegeinzugsgebiet. Die Punkte decken das gesamte Einzugsgebiet gleichmäßig ab, ihre Anzahl ist für die Gebietsgröße hinreichend. Die Gauß-Krüger-Werte (Bessel-Ellipsoid) aus den TKs wurden anschließend in UTM-Koordinaten (Clarke 1866-Ellipsoid) umgerechnet. Mit einer Polynomialtransformation 2.ten Grades wurde die Szene im Nearest Neighbor Resampling-Verfahren auf das UTM-System georeferenziert. Die Nearest Neighbor-Methode wurde gewählt, um die aus der Atmosphärenkorrektur stammenden Reflexionswerte ohne räumliche Mittelung zu erhalten. Die TM-Szenen von 1986 und 1989 wurden im Bild zu Bild-Verfahren auf die referenzierte Szene von 1992 geokodiert.

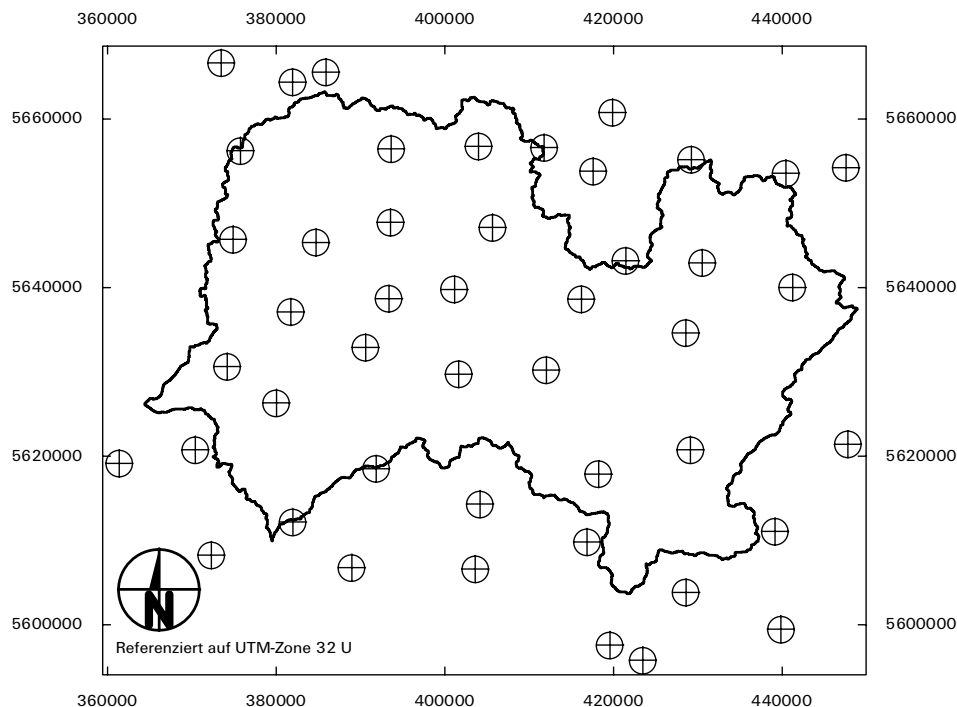


Abbildung 5.5: Paßpunkte auf der TM-Szene vom 05.08.1992.

Tabelle 5.6 faßt die für die Georeferenzierung der drei TM-Szenen wesentlichen Parameter zusammen. In allen Fällen fanden Polynomialtransformationen 2.ten Grades und Nearest Neighbor Resampling Verwendung. In die Korrektur der 1986er Szene gingen 40 Paßpunkte, in die der 1989er Szene 45 Paßpunkte ein.

Tabelle 5.6: Parameter und Fehler der Georeferenzierung

	01.05.86	17.11.89	05.08.92
Methode	Bild zu Bild	Bild zu Bild	Bild auf Karte
Transformation	Polynomial	Polynomial	Polynomial
Grad	2.	2.	2.
Resampling	Nearest Neighbor	Nearest Neighbor	Nearest Neighbor
Paßpunkte	40	45	46
Mittl. RMS-Fehler	0.41	0.36	0.42

Die durchschnittlichen RMS-Fehler an den Paßpunkten bewegen sich zwischen 10.8 m (0.36) und 12.6 m (0.42) und damit im akzeptablem Subpixelbereich.

5.2.1.3 Topographische Normalisierung

In flachem Gelände ist die LANDSAT-Bildgeometrie durch eine konstante Beobachtungs- und Beleuchtungswinkelkonstellation gekennzeichnet, d.h. jedes Bildelement wird, wegen des großen Abstands der Beleuchtungsquelle, aus derselben Richtung beleuchtet. Reflexionswerte von Pixeln in unterschiedlichen Teilen eines Bildes sind somit direkt vergleichbar. Dies trifft in unduliertem Gelände nicht zu. Die Topographie erzeugt vielmehr eine mehr oder weniger große Variation von Ein- und Ausfallswinkeln, die sich in der radiometrischen Charakteristik durch Grauwertvariationen bemerkbar macht. Zur Eliminierung des Reliefeinflusses können unterschiedliche Methoden zur Anwendung kommen (COLBY 1991[49]). Die einfachste besteht in der Anwendung eines Modells, das auf Grundlage eines DGMs die lokalen Einfallswinkel für jedes Pixel berechnet und den topographischen Effekt mit Hilfe eines Lambert'schen Strahlungsmodells normalisiert. Der Lambert'sche Ansatz geht davon aus, daß einfallende Strahlung gleichmäßig in alle Richtungen reflektiert wird, somit Reflexionsintensitätsunterschiede durch den, mit dem lokalen Einfallswinkel variierenden, Strahlungsgewinn pro Flächeneinheit verursacht werden.

Zahlreiche Studien kommen zu dem Ergebnis, daß die Lambert'sche Annahme nicht generell gültig, sondern nur unter bestimmten Voraussetzungen mit Erfolg anwendbar ist (LEPRIEUR et al. 1988[184], CIVCO 1989[48]). SMITH et al. (1980[266]) stellen für Kiefernbestände fest, daß die Anwendung eines Lambert'schen Strahlungsmodells bei Hangneigungen unter 25° und bei lokalen Einfallswinkeln unter 45° angemessene Ergebnisse liefert. Im Siegeinzugsgebiet sind die stärker geneigten Flächen in der Regel ebenfalls bewaldet, es kommen allerdings auch Laubwaldgesellschaften vor. Die formulierte Voraussetzung hinsichtlich des lokalen Einfallswinkels ist in den 1980er und 1992er TM-Szenen weitgehend gegeben. Eine DGM-Analyse der Hangneigungen im Siegeinzugsgebiet ergab, daß nur 1.04% aller Hänge stärker als 25° geneigt sind.

Die Topographische Normalisierung der Bilddaten erfolgte daher auf Grundlage eines Lambert'schen Strahlungsmodells. Der lokale, reliefbedingte Einfallswinkel für ein beliebiges Pixel ist definiert als

$$\cos(i) = \cos(90 - \Theta_s) \cos(\Theta_n) + \sin(90 - \Theta_s) \sin(\Theta_n) \cos(\Phi_s - \Phi_n) \quad (5.5)$$

mit

- i : Winkel zwischen einfallender Strahlung und Oberflächennormale,
- Θ_s : Sonnenhöhe,
- Φ_s : Azimutwinkel der Sonne,
- Θ_n : Neigung eines Oberflächenelements,
- Φ_n : Aspekt eines Oberflächenelements.

Die normalisierten Reflexionswerte entstehen aus (vgl. SMITH et al. 1995[264]):

$$R_{\lambda_{normal}} = \frac{R_{\lambda_{beob}}}{\cos(i)} \quad (5.6)$$

wobei

Tabelle 5.7: Parameter der Topographischen Normalisierung

Ubeflug	Uhrzeit [GMT]	Azimuth [°]	Sonnenhöhe [°]
01.05.86	09:27	135.3	46.9
05.08.92	09:27	131.3	47.5

- $R_{\lambda_{normal}}$: Normalisierter Reflexionswert,
 $R_{\lambda_{beob}}$: Beobachteter Reflexionswert,
 $\cos(i)$: Kosinus des lokalen Einfallswinkels.

Beträgt die Oberflächenneigung 0° bleibt der Aspekt undefiniert und es gilt $i = 90 - \Theta_s$.

Die Normalisierung wurde für alle drei TM-Datensätze durchgeführt, lieferte allerdings für die 1989er Novemberszene wegen des extrem niedrigen Sonnenstands erwartungsgemäß keine zufriedenstellenden Ergebnisse und wurde daher für diesen TM-Datensatz zurückgewiesen. Da die Szene für die Klassifikation der Landnutzung nur geringe Bedeutung hat, wurde auf die Anwendung eines komplizierteren Verfahrens zur Topographischen Normalisierung verzichtet. Tabelle 5.7 faßt die Eingangsparameter der Prozedur zusammen.

5.2.1.4 Visuelle Interpretation der vorhandenen Szenen

Die visuelle Annäherung an die spektrale Charakteristik der Szenen stellt einen bedeutenden Schritt zur Vorbereitung der Klassifikation dar, indem eine Grundlage für die Signaturausweisung gelegt wird und ein Eindruck entsteht, welche Nutzungen erfolgversprechend trennbar erscheinen und welche Szenen im Hinblick auf welche Nutzungen die beste Informationsgrundlage bieten. Die visuelle Interpretation wurde im wesentlichen anhand von RGB-Kompositen der TM-Kanäle 4(R), 5(G) und 3(B) durchgeführt.

In allen drei Szenen ist nutzungsmäßig eine in ost-westlicher Richtung verlaufende Dreiteilung augenfällig:

- Im äußersten Westen die im wesentlichen ackerbaulich genutzten Bereiche der Rheinischen Tiefebene, die nutzungsmäßig in die nördlichen Bereiche der Teileinzugsgebiete von Hanf- und Pleisbach ausstrahlen,
- Im Zentrum ein breiter Gürtel überwiegender Grünlandnutzung mit eingestreuten Wald- und Ackerbaugebieten und
- In den östlichen Hochlagen des Einzugsgebiets überwiegend forstliche Nutzung.

Ausnahmen bilden das nördliche Aggereinzugsgebiet mit überwiegender Waldnutzung und das südöstlich gelegene Nistereinzugsgebiet in dem die Grünlandnutzung wieder an Bedeutung gewinnt. Nenneswerte ackerbauliche Nutzungsanteile sind lediglich im Bereich des Siegunterlaufs und an einigen Stellen im Südosten des Einzugsgebiets erkennbar.

Diese Grundstruktur wird in allen drei TM-Szenen deutlich, die visuelle Charakteristik unterscheidet sich jedoch durch die zu den Aufnahmezeitpunkten unterschiedliche phänologische Entwicklung erheblich.

Die Szene vom 01.05.1986 ist durch eine phänologische Zweiteilung gekennzeichnet: In den tiefergelegenen westlichen Teilen des Einzugsgebiets sind vor allem die Grünlandnutzungen bereits gut entwickelt und stehen vor dem ersten Schnitt. In den östlichen Hochlagen ist das Grünland noch kaum entwickelt, der Belaubungszustand ermöglicht eine scharfe Trennung von Laub- und Nadelwaldgebieten. Im Unterlauf der Sieg finden sich an einigen Stellen bereits gut entwickelte Feldfruchtarten.

In der Novemberszene von 1989 steht auf der Mehrzahl der Ackerflächen im Mündungsgebiet der Sieg in den Rhein nackter Boden an. Die weiter östlich gelegenen Grünland- und Ackernutzungen sind mit Zwischenfrüchten oder Gräsern mit geringer Biomasse bestanden. Eine Trennung der Nutzungen Wintergetreide, bzw. Zwischenfrüchte (häufig Luzernearten, Feldgras oder Klee) erscheint nicht erfolgversprechend. In den geringer reliefierten Gebieten ist eine sehr gute Abgrenzung von Laub- und Nadelwald möglich, wegen des

extrem tiefen Sonnenstands kommt es allerdings in den steileren östlichen Bereichen des Siegeinzugsgebiets zu starken Schattenwürfen, die eine Interpretation nahezu unmöglich machen.

Die aktuellste und im Hinblick auf die Erfassung der Landnutzung vielversprechendste TM-Szene wurde am 05.08.1992 aufgenommen. Aufgrund der phänologischen Entwicklung lassen sich verschiedene Grünlandnutzungen, ackerbauliche Nutzungen und Waldarten unterscheiden. Der für die anderen TM-Szenen charakteristische Ost/Westunterschied, 1986 durch die unterschiedliche phänologische Entwicklung, 1989 durch die starken Schattenwürfe bedingt, ist in der Augustszene nicht vorhanden, das gesamte Bild macht visuell einen homogenen Eindruck. In Bezug auf die Ackernutzungen liegt der Termin in einer Übergangszeit, zahlreiche Feldfruchtarten sind kürzlich abgeerntet, auf diesen Flächen dominiert der Einfluß nackten Bodens, andere sind voll entwickelt und stehen vor der Ernte.

Bereits in diesem Stadium der Auswertung wurde von dem Vorhaben einer multitemporalen Analyse und Klassifikation auf Grundlage aller vorhandenen TM-Szenen Abstand genommen. Der große zeitliche Abstand der Aufnahmen und die damit einher gehenden Probleme von Flächenrotationen und Umwidmungen, sowie die geschilderten Probleme im Hinblick auf den Schattenwurf in der Novemberszene machten ein derartiges Vorgehen wenig erfolgversprechend.

5.2.2 Klassifikation der Landnutzung

Die im folgenden beschriebene Klassifikation der Landnutzung im Siegeinzugsgebiet basiert auf der Landsat TM-Szene vom 05.08.1992. Eine multitemporale Auswertung war wegen der weiter oben geschilderten Probleme nicht erfolgversprechend (vgl. Kap 5.2.1.4). Die TM-Szenen vom 01.05.1986 und 17.11.1989 wurden bei der Auswahl der Trainingsgebiete inhaltlich verwertet, jedoch nicht in den Klassifikationsprozeß mit aufgenommen. Die Novemberszene (1989) lieferte aufgrund des Belaubungszustands Hinweise zur Abgrenzung von Laub- und Nadelwäldern in der 1992er Szene. Vor allem in den bergigen Bereichen des Einzugsgebiets waren wegen des niedrigen Sonnenstands aber kaum zusätzliche Informationen zu gewinnen. Die Maiszene (1986) zeigte, aufgrund der unterschiedlichen phänologischen Entwicklung, vor allem bei den Grünland- und Ackerbaubereichen ein, im Vergleich zur 1992er Augustszene, völlig anderes Erscheinungsbild. Dennoch konnte die Trainingsgebietsauswahl, vor allem bei der Trennung von lockerer Bebauung und Wald, sowie Grünland und Wald, unterstützt werden. Generell war bei diesem Vorgehen wegen des großen Zeitraums zwischen den Überflügen und damit möglicherweise verbundenen Nutzungsänderungen Vorsicht geboten. Allerdings wurde bereits zu diesem Zeitpunkt qualitativ deutlich, daß die Landnutzung, abgesehen von Ackerbau- und Grünlandflächenrotationen, im Siegeinzugsgebiet zwischen 1986 und 1992 relativ geringen Änderungen unterworfen war.

Eine weitere Schwierigkeit stellte die Tatsache dar, daß zum Überflugtermin kein fernerkundungsspezifischer *ground check* durchgeführt wurde. Auf diese Problematik wird im Abschnitt 5.2.2.3 ausführlicher eingegangen.

5.2.2.1 Statistische Bildanalyse

Die Tabelle 5.8 gibt einen Überblick über die Grauwertstatistik der TM-Szene vom 05.08.1992 nach den Vorverarbeitungsschritten. Im Gegensatz zu den Originalwerten in Tabelle 5.2 handelt es sich, nach der Atmosphärenkorrektur, nun um absolute Reflexionswerte. Die grundlegenden Strukturen sind auch nach den Vorverarbeitungen erkennbar: Die Infrarotkanäle streuen breiter als die Kanäle im Bereich des sichtbaren Lichts und liegen im absoluten Reflexionsniveau deutlich höher. Der Streuungsbreitenunterschied zwischen VIS- und IR-Kanälen vergrößert sich noch zugunsten der IR-Kanäle. Veränderungen ergeben sich in der Verteilung der Streuungen auch im IR-Bereich, auffällig ist vor allem, daß die Streuung von Kanal 5 gegenüber Kanal 4 durch die Vorverarbeitung gestaucht wird.

Bei der Betrachtung von Tabelle 5.9 wird ein weiterer Effekt der Vorverarbeitungen deutlich: Die Korrelation der Spektralkanäle untereinander nimmt in der Mehrzahl der Kombinationen ab. Ausnahme bilden die Paare 4/5 und 4/7 deren lineare Abhängigkeit geringfügig steigt. Im Falle von 4/3 bleibt die Abhängigkeit auf einem niedrigen Niveau (0.1) konstant. Die Vorverarbeitung und hier im wesentlichen der Vorgang der Atmosphärenkorrektur hat somit, in Bezug auf die sich anschließende Klassifikation der Landnutzung, einen positiven Nebeneffekt. Die VIS-Kanäle korrelieren, gegenüber den IR-Bändern, weiterhin recht hoch.

Tabelle 5.8: Bandstatistik nach den Vorverarbeitungsschritten

Kanal	Min. [%]	Max. [%]	μ	σ
1	0.00	61.00	1.665	1.909
2	0.00	69.00	5.619	2.666
3	0.00	66.00	4.523	3.022
4	0.00	159.00	43.877	14.873
5	0.00	112.00	22.552	8.702
7	0.00	132.00	11.014	6.102

5.2.2.2 Unüberwachte Klassifikationen

Methodisch wurde ein *hybrider* Klassifikationsansatz gewählt, d.h. es wurden zunächst verschiedene unüberwachte Klassifikationen durchgeführt, deren Ergebnis dann in die Konstruktion von Klassensignaturen für die überwachte Klassifikation einfließen konnte. So wurden Trainingsgebiete mit unimodalen Spektraleigenschaften ausgewiesen, eine für die erfolgreiche Anwendung eines Maximum Likelihood-Klassifikators zwingende Voraussetzung (RICHARDS 1994[244]).

Unüberwachte Klassifikationsverfahren sind generell gut geeignet um Klassen aufgrund der szeneninhärenten Statistik zu formulieren und wenn bewußt kein Vorwissen in die Klassifikation einfließen soll (LARK 1995[171]). Das Ergebnis solcher Verfahren erlaubt in der Regel eine realistische Einschätzung der, aus dem Bildmaterial erfolgversprechend trennbaren, Klassen. Ist der Interpret nicht von vornherein auf eine bestimmte Klassenhierarchie festgelegt, kann er auf Grundlage der Ergebnisse unüberwachter Klassifikationsverfahren eine Struktur aufbauen, die im Hinblick auf Fragestellung und Qualität des Ergebnisses einer anschließenden überwachten Klassifikation größtmöglichen Erfolg verspricht.

Als Verfahren wurde Erdas/Imagine ISODATA-Clustering verwendet. Der Algorithmus arbeitet iterativ. Zunächst werden vor dem ersten Lauf für die gewünschte Klassenzahl „willkürliche“ Mittelwerte aufgrund der Standardabweichungen und Mittel der einbezogenen Kanäle berechnet. In der folgenden Iteration wird für jedes Bildelement die spektrale Distanz zu den festgelegten Klassenmitteln bestimmt (SMITH et al. 1995[264]). Die Bildelemente werden der Klasse zugeordnet, zu deren Mittel sie die geringste Entfernung aufweisen. Nach einer Iteration werden die Klassenmittel auf Grundlage der Spektralcharakteristik der, den jeweiligen Klassen zugewiesenen, Pixel neu berechnet. Diese neuen Klassenmittel gehen als Ausgangswerte in die nächste Iteration ein. Der Vorgang wird abgebrochen, sobald eine vom Anwender festzulegende Prozentzahl der Bildelemente ihre Klassenzugehörigkeit zwischen zwei Iterationen nicht mehr ändert. Neben der Information bezüglich der einzubeziehenden Spektralkanäle, gehen in die Berechnung lediglich die im Ergebnis gewünschte Klassenzahl und der Schwellenwert ein, der den Abbruch des iterativen Prozesses steuert.

Tabelle 5.9: Kovarianzen (E) und Korrelationen (r) nach der Vorverarbeitung

Kanal		1	2	3	4	5	7
1	E	3.66	4.38	4.97	2.88	9.22	8.78
	r	1.00	0.86	0.86	0.10	0.55	0.75
2	E	*	7.11	7.29	12.76	16.99	13.95
	r	*	1.00	0.91	0.32	0.73	0.86
3	E	*	*	9.13	4.49	16.92	15.75
	r	*	*	1.00	0.10	0.64	0.85
4	E	*	*	*	221.20	88.13	33.35
	r	*	*	*	1.00	0.68	0.37
5	E	*	*	*	*	75.72	46.80
	r	*	*	*	*	1.00	0.70
7	E	*	*	*	*	*	37.24
	r	*	*	*	*	*	1.00

Um sich dem spektralen Informationsgehalt der Szene zu nähern, wurden verschiedene ISODATA-Klassifikationen durchgeführt. Im einzelnen wurde mit unterschiedlichen Klassenzahlen und unterschiedlichen Kanalkombinationen experimentiert. Die Ergebnisse bestätigten den visuellen Eindruck des Datensatzes, acht Nutzungsklassen schienen erfolgversprechend trennbar zu sein:

- Dichte Bebauung (*bbng1*),
- Lockere Bebauung (*bbng2*),
- Ackerbaulich genutzte Flächen mit entwickeltem Bewuchs (*agr*),
- Kürzlich abgeerntete, bzw. gemähte Flächen auf denen der Boden die Spektralcharakteristik dominiert (*bod*),
- Flächen mit Grünlandnutzung (Wiesen, Weiden, Mähweiden; *grlnd*),
- Laub- und Mischwald (*wald1*),
- Nadelwald (*wald2*),
- Wasserflächen (*wass*).

Eine derartige Klassenauflösung erschien im Hinblick auf die Ableitung von HRUs im Vorfeld einer distributiven, physikalisch-basierten Flußeinzugsgebietsmodellierung als ausreichend (LÜLLWITZ 1993[190], BONGARTZ 1996[34], FLÜGEL 1996[98], STAUDENRAUSCH 1996[269]). Sie wurde daher als Grundlage der weiteren Signaturanalysen verwendet. Verschiedene Klassensignaturen wurden aus geeigneten ISODATA-Klassifikationen extrahiert und zur späteren Verwendung beim Training des ML-Klassifikators archiviert.

5.2.2.3 Signaturanalysen und Trainingsgebietsausweisung

Die im vorigen Kapitel ausgewiesenen acht Landnutzungsklassen bildeten die Grundlage der im folgenden beschriebenen Signaturanalysen und Trainingsgebietsausweisungen. Grundsätzlich wäre auch die Trennung fruchtspezifischer Ackernutzungen, sowie verschiedener Grünlandnutzungen denkbar gewesen, hier bestand die Schwierigkeit, daß zum Überflugtermin kein fernerkundungsspezifischer *ground check* durchgeführt wurde. Für die Trainingsgebietsausweisung standen im wesentlichen Kartiererergebnisse aus Geländepraktika der Universität Bonn zur Verfügung. Diese wurden vor dem Hintergrund einer möglichst flächenhaften Kartierung von Teileinzugsgebieten im Vorfeld hydrologischer Modellierungsverfahren erstellt und genügten damit nicht immer den Genauigkeitsansprüchen einer fernerkundlich orientierten Kartierung. Desweiteren war nur in einigen Teilen des Siegeinzugsgebiets Information aus dem Sommerhalbjahr 1992 vorhanden. Diesen, bei Fernerkundungsanalysen typischen, Problemen wurde begegnet indem, wie weiter oben bereits beschrieben, die Klassenzahl eingeschränkt wurde um die Ergebnisgüte zu maximieren. Dieses Vorgehen erschien auch vor dem Hintergrund angemessen, daß detaillierte Landnutzungsinformation vor dem Eingang in hydrologische Modellierungsverfahren häufig auf eine geringere Klassenzahl generalisiert wird, u.a. um die absolute Zahl der eingehenden Parameter so klein wie möglich zu halten.

Der Arbeitsablauf der Signaturanalysen ist der aufwendigste und für das Ergebnis bedeutendste Teil einer überwachten Klassifikation und gliedert sich in die Ausweisung von Trainingsgebieten für alle gewünschten Klassen, die Extraktion der Signaturen aus diesen Gebieten und deren Archivierung, sowie die Beurteilung der Trennbarkeit der Signaturen unterschiedlicher Klassen mit geeigneten Separabilitätsmaßen. Anschließend werden in kleineren Szenenausschnitten überwachte Klassifikationen durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit der erstellten Signaturen in der Praxis zu testen. Auf Grundlage der Klassifikationsergebnisse und Separabilitätsmaße werden schließlich ungeeignete Trainingsgebiete verworfen oder verändert und erneut Signaturen extrahiert. Dieser Vorgang wird iterativ solange wiederholt, bis ein geeignet erscheinender, konsistenter Signatursatz vorhanden ist, auf dessen Grundlage dann die eigentliche, überwachte Klassifikation durchgeführt wird.

Die Ausweisung der Trainingsgebiete erfolgte unter Zuhilfenahme sämtlicher vorhandener Zusatzinformation. Für das Siegeinzugsgebiet lagen Kartiererergebnisse zur Landnutzung in digitaler Form, sowie in Kartenform vor (vgl. Kap. 4.5). Weiterhin waren SW-Orthophotos, Luftbildkarten und Topographische

Tabelle 5.10: Trainingsgebiete

Nutzung	Teilflächen	Pixelzahl	Fläche [km ²]
bbng1	4	1046	0.9414
bbng2	6	1077	0.9693
agr	14	377	0.3393
bod	16	1055	0.9495
grlnd	18	1718	1.5462
wald1	8	1739	1.5651
wald2	8	840	0.7560
wass	6	1413	1.2717

Karten verschiedener Maßstäbe vorhanden. Wie weiter oben bereits erwähnt, unterstützten auch die TM-Szenen von 1986 und 1989 die Trainingsgebietsauswahl für bestimmte Klassen. Die Trainingsgebiete wurden in Imagine als AOs (*Areas of Interest*) digitalisiert. Die Reflexionswerte in den Gebieten wurden dann dem *Signature Editor* übergeben, der verschiedene Hilfsmittel zur Manipulation und Qualitätsanalyse zur Verfügung stellt. Auf die Möglichkeiten des *Region Growing* auf Grundlage spektraler „Eichpixel“ (Imagine Seed-Funktionalität) wurde verzichtet, da die aus solchen Verfahren extrahierten Trainingsgebiete die tatsächliche Klassenvarianz häufig unterschätzen.

Bei der Auswahl der Trainingsgebiete ist auf eine möglichst gleichmäßige Verteilung über den zu klassifizierenden Bildausschnitt zu achten. Es sollten daher für jede Klasse mehrere Trainingsflächen ausgewiesen werden. Wichtig ist weiterhin die Berücksichtigung der spektralen Heterogenität bestimmter Klassen, die von den Signaturen abgedeckt werden muß. Besonders bedeutend ist dies im Falle von Nutzungen, die bereits per Definition Mischklassen darstellen, z.B. lockere Bebauung. Die nötige Anzahl von trainierenden Bildelementen hängt von der spektralen Charakteristik der Szene und der zu extrahierenden Klassen, sowie der Anzahl der einbezogenen Kanäle ab. Eine Faustregel besagt, daß die Anzahl der Trainingspixel für jede Klasse mindestens das zehn- bis hundertfache der Anzahl der einbezogenen Kanäle betragen soll (SWAIN & DAVIS 1978[276]). Nach oben sind bei der Trainingspixelzahl keine, das Klassifikationsergebnis negativ beeinflussenden, Grenzen gesetzt, allerdings ist ab einer bestimmten Grenze nicht mehr mit einer Verbesserung der Klassifikationsleistung zu rechnen.

Im folgenden werden lediglich die zur Klassifikation herangezogenen Trainingsgebiete und deren Signaturen beschrieben. Auf die Zwischenschritte der Signaturanalysen wird nicht weiter eingegangen, da sie auf das Ergebnis keinen Einfluß haben. Insgesamt wurden in einem iterativen Prozeß für die acht Landnutzungsklassen 80 über die Szene verteilte Trainingsgebiete mit einer Gesamtfläche von 8.3 km² ausgewiesen. Tabelle 5.10 beschreibt die Anzahl der Teilflächen und Pixel pro Klasse, sowie die Gesamtflächen pro Klasse. Jede Nutzung wird durch mehrere, über das Einzugsgebiet verteilte, Flächen beschrieben. Die Gesamtzahl der Trainingspixel liegt für alle Nutzungen im Bereich der weiter oben formulierten Faustregel, bzw. darüber.

Tabelle 5.11 faßt einige statistische Kenngrößen der Klassensignaturen zusammen. Insgesamt werden die Reflexionsmaxima in den IR-Kanälen 4 und 5 erreicht. Die *agr*-, *grlnd*- und *wald1*-Flächen reflektieren im NIR-Bereich besonders stark, die *bod*-Klasse ist durch ein, auch im Bereich des sichtbaren Lichts hohes Reflexionsniveau gekennzeichnet und die einzige Signatur, in der die MIR-Reflexion (Kanal 5) über dem Niveau der NIR-Reflexion liegt. Die Waldsignaturen haben im Bereich des sichtbaren Lichts Reflexionsmaxima im Grün und im Infrarotbereich im NIR. Das Reflexionsniveau der Nadelwaldgebiete liegt dabei generell unter dem des Laub- und Mischwalds. Die Bebauungsklassen sind vor allem durch ein hohes Reflexionsniveau im VIS- und ein relativ gleichmäßiges im IR-Bereich gekennzeichnet. In der Tendenz findet sich bei dichter, gegenüber lockerer Bebauung, das höhere Reflexionsniveau im VIS-Bereich, im IR-Bereich liegt dagegen das Reflexionsniveau lockerer Bebauung höher.

Einen graphischen Eindruck der Lage der Signaturnittelwerte vermittelt Abbildung 5.6. Auf der Abszisse sind die Kanäle des TM aufgetragen, die Ordinate beschreibt die Reflexionsintensität. Die gepunkteten Linien in dieser und der folgenden Abbildung (5.7) dienen lediglich zur Vereinfachung der visuellen Orientierung in der Graphik und haben keine inhaltliche Bedeutung. Es wird deutlich, daß die Infrarotkanäle 4 und 5 über die Klassen gut trennbare Signaturnittel aufweisen. Kanal 4 trennt alle Signaturen mit Ausnahme

Tabelle 5.11: Allgemeine Signaturstatistik

Signatur		Kanal 1	Kanal 2	Kanal 3	Kanal 4	Kanal 5	Kanal 7
agr	μ	2.67	7.33	4.90	66.16	23.30	9.76
	σ	1.36	2.15	1.68	7.72	2.38	2.12
	min	0	4	3	35	20	7
	max	9	17	14	87	40	26
bod	μ	6.51	13.42	16.53	38.79	43.11	32.24
	σ	1.84	2.43	3.61	5.67	4.98	4.95
	min	1	6	4	27	24	13
	max	12	22	24	72	58	42
wass	μ	0.83	3.18	1.42	4.68	1.39	0.19
	σ	0.67	1.16	1.21	3.31	1.60	0.69
	min	0	1	0	1	0	0
	max	3	8	6	39	14	6
grlnd	μ	2.32	7.18	5.05	65.09	33.62	16.30
	σ	1.40	1.65	1.40	12.14	5.12	4.64
	min	0	4	3	32	19	6
	max	9	16	15	98	51	32
wald1	μ	0.63	3.92	2.78	45.10	20.29	7.93
	σ	0.69	0.75	0.65	5.09	2.59	1.49
	min	0	1	1	25	11	3
	max	2	9	6	64	31	15
wald2	μ	0.58	3.34	2.50	25.13	9.70	3.61
	σ	0.61	1.01	0.82	5.22	2.37	1.36
	min	0	1	0	16	5	1
	max	2	6	4	41	20	11
bbng1	μ	5.36	8.84	8.98	20.16	17.26	14.64
	σ	2.45	2.91	2.82	5.62	3.83	3.59
	min	0	4	3	9	8	4
	max	22	26	26	50	44	51
bbng2	μ	3.31	6.86	6.44	30.36	20.33	13.95
	σ	1.62	1.81	2.02	5.57	3.79	3.78
	min	0	2	2	12	10	6
	max	17	22	21	52	41	39

von *agr/grlnd* befriedigend. Dieses Signaturpaar ist in den Kanälen 5 und 7 gut separierbar. Wasserflächen sind über alle Kanäle durch eine geringe Reflexion gekennzeichnet.

Eine andere Sichtweise des gleichen Sachverhalts bietet Abbildung 5.7. Auf der Abszisse sind die ausgewiesenen Trainingsklassen aufgetragen. Auch hier wird die besondere Bedeutung der IR-Kanäle deutlich, deren Reflexionswerte im Niveau hoch liegen und für nahezu alle Klassen charakteristische „Fingerabdrücke“ erzeugen. Die geringste Reflexionsintensität findet sich über alle Klassen im blauen Bereich. Die spektrale Eigenart der Boden-Klasse mit hoher Reflexion im MIR-Kanal 5 und der höchsten Rot-, Grün- und Blaureflexion aller Klassen wird auch in dieser Abbildung deutlich.

Beispielhaft beschreibt Abbildung 5.8 die Verteilung der Grauwerte der Signaturklasse *wald1* (Laub- und Mischwald) in den Infrarotkanälen. Die Reflexionsintensitäten und Streubreiten nehmen vom nahen zum mittleren Infrarot hin ab. Wichtiger ist jedoch die Symmetrie und Form der Verteilungen, die sich optisch an eine Normalverteilung annähern und somit methodisch eine Maximum Likelihood-Klassifikation rechtfertigen. Sämtliche Histogramme wurden zusätzlich mit χ^2 -Tests auf ihre Annäherung an die Normalverteilung getestet.

Abbildung 5.9 spannt einen zweidimensionalen Merkmalsraum zwischen TM-Kanal 4 und TM-Kanal 5 auf. In der Grauwertwolke sind die Mittelwerte der Reflexion in den verschiedenen Trainingsgebietsklassen und Ellipsen vom Umfang 1.5 Standardabweichungen aufgetragen. Die Mittelwerte decken in dieser Kanalkom-

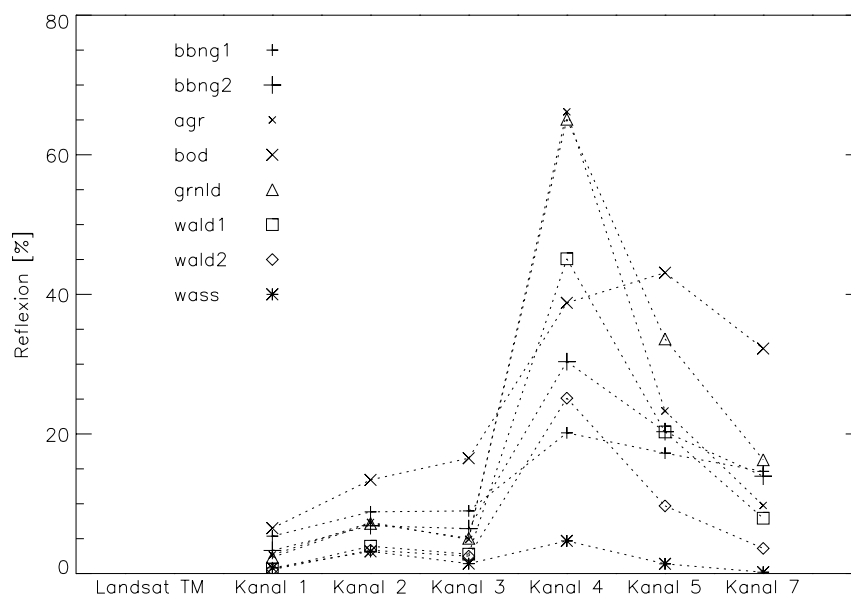


Abbildung 5.6: Nutzungsspezifische Reflexionsmittelwerte der Trainingsgebiete.

bination den Kernbereich der Grauwerte gut ab. Spektral sehr einheitliche und gut abgegrenzte Signaturen besitzen die Klassen *wass*, *wald1* und *wald2*. Die spektral breiteste Streuung besitzt das Grünland, das mit seiner 1.5σ -Ellipse bereits das Signaturmittel der bestandenen Ackerflächen erreicht. Hier kommt zum Ausdruck, daß Wiesen und Weiden in unterschiedlichen Wuchsstadien in der Grünlandklasse zusammengefaßt wurden. Die Trennung von Grünland und einigen Feldfruchtarten in bestimmten Wuchsstadien ist ein typisches Problem bei der Auswertung optischer Satellitendaten. Die Bodenflächen setzen sich von den übrigen Nutzungen gut ab, sie werden lediglich von der spektralen Breite der Grünlandbereiche beeinflusst.

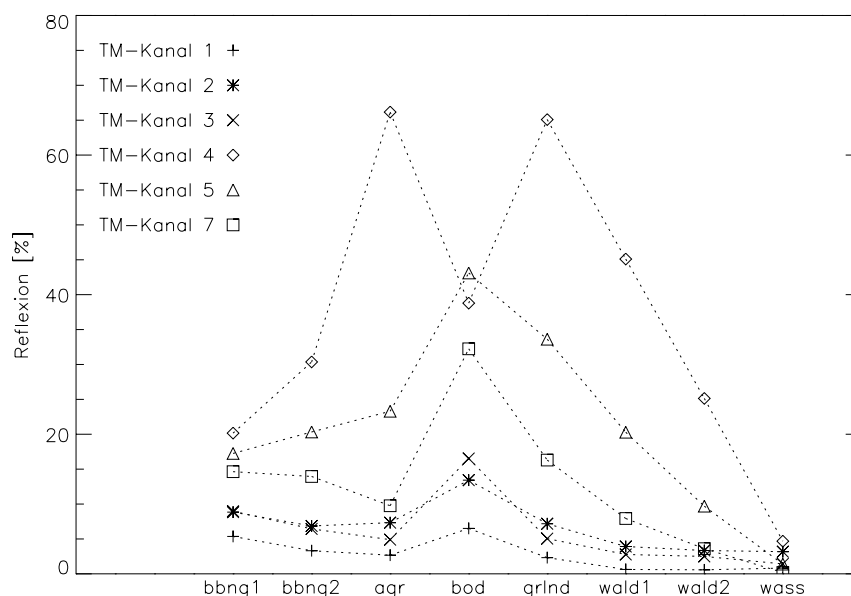


Abbildung 5.7: Kanalspezifische Reflexionsmittelwerte der Trainingsgebiete.

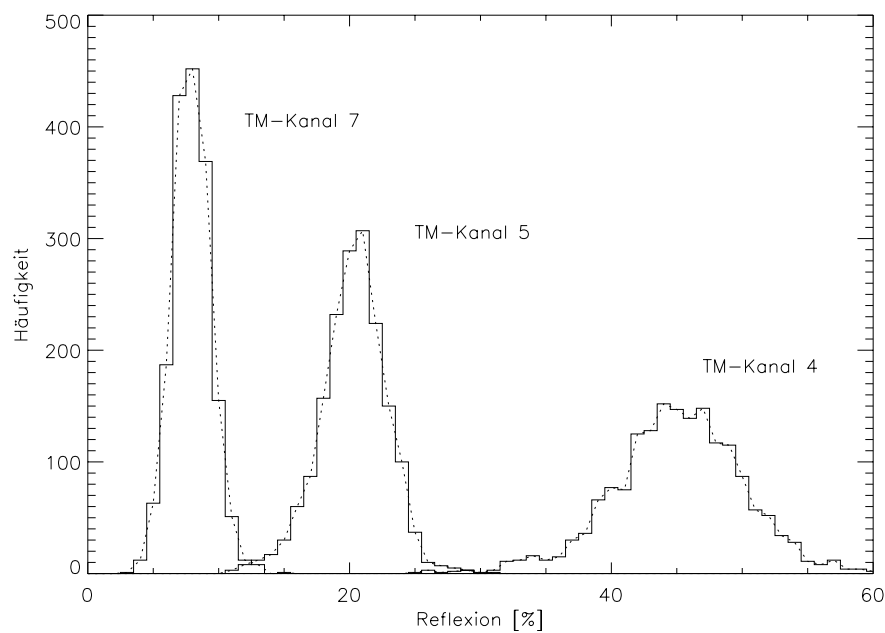


Abbildung 5.8: Histogramme aus den Trainingsgebieten für Laub- und Mischwald.

Die stärksten Überschneidungen treten zwischen den beiden ausgewiesenen Bebauungsklassen auf. Hier ist zu beachten, daß es sich bei urbanen Gebieten bereits per Definition um Mischnutzungen handelt. Gerade in ländlichen Räumen sind Siedlungsbereiche von Vegetation in Form von Parks, Gärten, Alleen, etc. durchzogen, die im Skalenbereich geometrisch hoch auflösender Sensoren Mischsignale mit uneinheitlichen spektralen Eigenschaften erzeugen. Zusammengenommen lassen sich die Siedlungsbereiche dennoch gut von den anderen Nutzungen separieren.

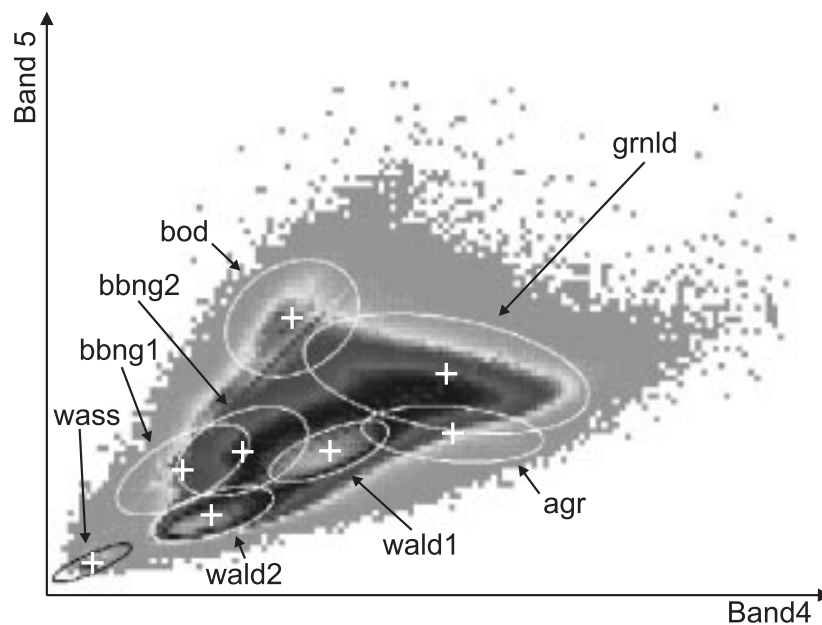


Abbildung 5.9: Signaturmittelwerte und 1.5σ -Ellipsen der Trainingsgebiete.

Der rechnerische Klassifikationsaufwand steigt mit der Anzahl der einbezogenen Klassen, bzw. Datenschichten. Für Minimum Distanz- und Parallelepiped-Klassifikatoren steigt der Rechenaufwand linear mit der Anzahl der einbezogenen Kanäle, für ML-Klassifikatoren steigt der Aufwand durch die Einbeziehung

Tabelle 5.12: Allgemeine Signaturtrennung: JM-Distanzen

TM	Kanal 1	Kanal 2	Kanal 3	Kanal 4	Kanal 5	Kanal 7
JM_{mittel}	800	868	971	1143	1145	1110
JM_{min}	100	113	139	316	264	100

der Kovarianzen quadratisch. Insofern ist man im Vorfeld von Klassifikationen daran interessiert, die Anzahl der eingehenden Kanäle so gering wie möglich zu halten, d.h. Kanäle die keine oder nur eine unwesentliche Ergebnisverbesserung bewirken von der Klassifikation auszuschließen. Hinzu kommt, daß redundante Informationen unter Umständen ergebnisverschlechternd wirken können (RICHARDS 1994[244], SWAIN & DAVIS 1978[276]).

Eine gängige Methode der Informationskompression stellen Hauptkomponententransformationen dar, die auf Grundlage unterschiedlicher Algorithmen den Großteil der im Ausgangsdatensatz vorhandenen Varianz in wenigen, statistisch voneinander unabhängigen, synthetischen Kanälen bündeln. Wegen der damit verbundenen methodischen Probleme (vgl. Kap. 2.2.7 und weitergehend LARK 1995[173]) wurde im Rahmen der optischen Datenauswertungen auf derartige Manipulationen verzichtet. Stattdessen wurden statistische Distanzmaße verwendet, um die, für die Bestimmung der Landnutzung weniger bedeutenden Kanäle im Vorfeld der Klassifikation zu erkennen und auszuschließen. Im Fernerkundungsbereich sind verschiedene Distanzmaße gebräuchlich, im folgenden soll lediglich die Berechnung der *Jeffries-Matusita* (JM) Distanz beschrieben werden, die als Signaturdistanzmaß in dieser Arbeit Verwendung fand, da sie die Kovarianzmatrizen mitberücksichtigt und dem Verfahren nach einer ML-Distanzbestimmung ähnelt. Sie eignet sich daher besonders zur Abschätzung der Leistung einer ML-Klassifikation.

Die Jeffries-Matusita Distanz (J_{ij}) zwischen zwei Wahrscheinlichkeitsverteilungen (in der digitalen Bildverarbeitung gewöhnlich zwei Spektralklassen) ist definiert (RICHARDS 1994[244]) als

$$J_{ij} = \int_x [\sqrt{p(x|\omega_i)} - \sqrt{p(x|\omega_j)}]^2 dx \quad (5.7)$$

mit

- p : Wahrscheinlichkeit,
- i, j : Die zu vergleichenden Signaturen (Spektralklassen).

Für normalverteilte Klassen ergibt sich daraus (vgl. SMITH et al. 1995[264])

$$J_{ij} = \sqrt{2(1 - e^{-\alpha})} \quad (5.8)$$

wobei

$$\alpha = \frac{1}{8}(\mu_i - \mu_j)^T \left(\frac{C_i + C_j}{2} \right)^{-1} (\mu_i - \mu_j) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\left| \frac{C_i + C_j}{2} \right|}{\sqrt{|C_i| \cdot |C_j|}} \right) \quad (5.9)$$

mit

- i, j : Die zu vergleichenden Signaturen (Spektralklassen),
- C_i : Die Kovarianz-Matrix der Signatur i ,
- μ_i : Der Hauptvektor der Signatur i ,
- $|C_i|$: Die Determinante (vgl. weiterführend z.B. PESCHL 1961[233]) von i .

Die JM-Werte bewegen sich zwischen null und 1414, ein Wert von null bedeutet keine, ein Wert von 1414 „perfekte“ Trennbarkeit der Signaturen.

Tabelle 5.12 gibt zunächst die mittleren JM-Distanzen über alle Kanäle und Signaturen an. Die Infrarotkanäle und hier vor allem Kanal 4 und 5 weisen die höchsten JM-Werte auf. Im VIS-Bereich liefert das Band der Rotreflexion den größten Beitrag zur Signaturtrennung. Diese undifferenzierte Sichtweise erlaubt noch

Tabelle 5.13: Nutzungs- und kanalspezifische Signaturtrennung: JM-Distanzen

Sign. · Kanal	bod	wass	grlnd	wald1	wald2	bbng1	bbng2
agr · Kanal 1	1017	878	130	922	973	732	242
agr · Kanal 2	1084	1054	191	1048	1065	357	171
agr · Kanal 3	1339	1017	139	917	907	852	424
agr · Kanal 4	1322	1414	316	1215	1409	1412	1394
agr · Kanal 5	1389	1414	1114	582	1402	891	548
agr · Kanal 7	1406	1409	920	536	1252	819	733
bod · Kanal 1	*	1344	1067	1352	1361	330	839
bod · Kanal 2	*	1398	1175	1398	1399	790	1182
bod · Kanal 3	*	1403	1348	1402	1401	1000	1258
bod · Kanal 4	*	1413	1154	565	1044	1220	701
bod · Kanal 5	*	1414	845	1404	1414	1404	1389
bod · Kanal 7	*	1414	1224	1412	1414	1324	1331
wass · Kanal 1	*	*	774	146	207	1165	992
wass · Kanal 2	*	*	1128	473	125	1126	1040
wass · Kanal 3	*	*	1113	755	566	1276	1181
wass · Kanal 4	*	*	1413	1414	1370	1242	1401
wass · Kanal 5	*	*	1414	1414	1329	1399	1411
wass · Kanal 7	*	*	1394	1412	1219	1406	1397
grlnd · Kanal 1	*	*	*	817	874	782	337
grlnd · Kanal 2	*	*	*	1106	1137	509	113
grlnd · Kanal 3	*	*	*	993	996	889	462
grlnd · Kanal 4	*	*	*	1025	1351	1377	1296
grlnd · Kanal 5	*	*	*	1239	1407	1273	1158
grlnd · Kanal 7	*	*	*	1127	1318	267	308
wald1 · Kanal 1	*	*	*	*	100	1178	1023
wald1 · Kanal 2	*	*	*	*	379	1135	1019
wald1 · Kanal 3	*	*	*	*	246	1258	1130
wald1 · Kanal 4	*	*	*	*	1301	1366	1110
wald1 · Kanal 5	*	*	*	*	1340	520	264
wald1 · Kanal 7	*	*	*	*	1169	1096	1023
wald2 · Kanal 1	*	*	*	*	*	1201	1064
wald2 · Kanal 2	*	*	*	*	*	1136	1049
wald2 · Kanal 3	*	*	*	*	*	1252	1123
wald2 · Kanal 4	*	*	*	*	*	450	472
wald2 · Kanal 5	*	*	*	*	*	1031	1240
wald2 · Kanal 7	*	*	*	*	*	1339	1302
bbng1 · Kanal 1	*	*	*	*	*	*	551
bbng1 · Kanal 2	*	*	*	*	*	*	501
bbng1 · Kanal 3	*	*	*	*	*	*	546
bbng1 · Kanal 4	*	*	*	*	*	*	825
bbng1 · Kanal 5	*	*	*	*	*	*	396
bbng1 · Kanal 7	*	*	*	*	*	*	100

keine Rückschlüsse hinsichtlich des jeweiligen Beitrags der einbezogenen Kanal- und Signaturkombinationen zur Gesamttrennbarkeit.

Bandspezifische JM-Werte faßt Tabelle 5.13 zusammen. Die Signaturen der *agr*-Flächen erreichen sehr gute Trennbarkeiten gegenüber *bod*, *wass*, *wald2* und den Bebauungssignaturen. Die Trennbarkeit von *wald1* ist im Kanal 4 als befriedigend zu bezeichnen, gleiches gilt für die Trennung von *grlnd*, die im Kanal 5 am höchsten, in allen anderen Kanälen deutlich niedriger liegt. Die bodenbeeinflußten Flächen sind von allen anderen Signaturen sehr gut zu unterscheiden, gegenüber *wass* und *wald2* wird sogar der JM-Höchstwert erreicht. Bei der sonstigen Dominanz der IR-Kanäle ist bei der *bod*-Signatur interessant, daß für *grlnd* und

Tabelle 5.14: Nutzungsspezifische Signaturtrennung über 6 Kanäle (123457): JM-Distanz

Signatur	bod	wass	grlnd	wald1	wald2	bbng1	bbng2
agr	1413	1414	1317	1349	1414	1414	1407
bod	*	1414	1393	1414	1414	1411	1402
wass	*	*	1414	1414	1404	1413	1414
grlnd	*	*	*	1384	1414	1414	1410
wald1	*	*	*	*	1383	1413	1350
wald2	*	*	*	*	*	1395	1341
bbng1	*	*	*	*	*	*	1039
JM_{mittel}	1385						
JM_{min}	1039						

wald1 in der Rotreflexion ebenfalls sehr hohe Trennwerte erreicht werden. Die Wasserflächen stellen die spektral eindeutigste Signatur, sie lassen sich von allen anderen Nutzungen sehr gut abgrenzen.

Die bereits in Abbildung 5.9 angesprochene spektrale Breite der Grünlandsignatur führt auch bei den JM-Distanzen zu relativ niedrigeren Werten. Dennoch ist die Trennbarkeit von den anderen Klassensignaturen in den Kanälen 4 und 5 (Ausnahme *bod*, s.o.) ausreichend. Die Laub- und Mischwaldsignaturen liegen im mittleren JM-Niveau, die größte spektrale Nähe besteht zu den locker bebauten Bereichen. Die Signatur der Nadelwaldflächen hebt sich gleichmäßig deutlich von den übrigen Signaturen ab. Probleme bestehen bei der Signaturtrennung der bebauten Gebiete. Diese liegen spektral nahe beisammen, der JM-Höchstwert beträgt lediglich 825 in Kanal 4. Hier spielt die Tatsache eine Rolle, daß es sich bei den bebauten Gebieten, wie weiter oben bereits angesprochen, um spektrale Mischklassen, mit wenig einheitlichem Charakter handelt. Der Übergang von dichter zu lockerer Bebauung ist eine Definitionsfrage, deren eindeutige Beantwortung durch die Mischpixelproblematik in Siedlungsbereichen erschwert wird.

Für diese Arbeit wurde daher nicht der Versuch unternommen, die Bebauungsklassen durch eine strikte Größe, etwa der Überbauung pro Flächeneinheit in Prozent, voneinander zu trennen. Im Rahmen der inhaltlichen Fragestellung ist eine qualitative Unterscheidung von städtischen Kernbereichen und ländlicher Siedlungsstruktur hinreichend. Da sich die Signaturen der bebauten Flächen in der gegebenen Konstellation gut von den anderen Klassensignaturen trennen lassen, wurden die Trainingsgebiete beibehalten.

Zusammenfassend bestätigen die JM-Distanzen den bereits vor der Berechnung gewonnenen Eindruck, daß die Infrarotkanäle in der Mehrzahl der Fälle die besten Trennungswerte erreichen und somit für die Klassifikation von besonderer Bedeutung sind. Im optischen Bereich erreichte häufig der Kanal 3 (Rotreflexion) die höchsten Werte.

Die Information aus Tabelle 5.13 ist in komprimierter Form in der Tabelle 5.14 enthalten. Sie zeigt die JM-Werte für die möglichen Nutzungskombinationen unter Einbeziehung der sechs optischen Kanäle des TM. Hier wird die sehr gute spektrale Trennbarkeit aller Signaturen deutlich. In elf von 28 möglichen Kombinationen wird der maximal mögliche JM-Wert erreicht, bis auf eine Ausnahme (*bbng1/ bbng2*: 1039) liegen die Werte über 1300. Das JM-Mittel beträgt 1385.

Weitere Analysen unter Berücksichtigung verschiedener Kanalkombinationen ergaben, daß im VIS-Bereich der Kanal 3 die besten Trennungsmöglichkeiten bietet. In die Berechnung der JM-Werte in Tabelle 5.15 sind daher lediglich die Infrarotkanäle 4, 5 und 7 sowie der Kanal 3 eingegangen. Es zeigt sich, daß die Zurückweisung der im Bereich der Blau- und Grünreflexion gelegenen Kanäle die Signaturtrennung nicht wesentlich verschlechtert. Der JM-Mittelwert sinkt gegenüber der Berechnung unter Einbeziehung aller VIS/IR-Kanäle um den Wert fünf, was einer Verringerung von unter 0.5% entspricht. Die größten Signaturtrennungverschlechterungen treten bei *agr/grlnd* und *bbng1/ bbng2* mit moderaten -2.2%, bzw. -3.7% auf. Insgesamt verringert sich die JM-Distanz nur in ca. der Hälfte der Kombinationen. In der Mehrzahl dieser Fälle bewegt sich die Verschlechterung im Bereich von unter einem Prozent.

Tabelle 5.15: Nutzungsspezifische Signaturtrennung über 4 Kanäle (3457): JM-Distanz

Signatur	bod	wass	grlnd	wald1	wald2	bbng1	bbng2
agr	1413	1414	1288	1330	1414	1414	1403
bod	*	1414	1390	1414	1414	1408	1397
wass	*	*	1414	1414	1394	1411	1414
grlnd	*	*	*	1376	1414	1414	1408
wald1	*	*	*	*	1377	1413	1343
wald2	*	*	*	*	*	1389	1334
bbng1	*	*	*	*	*	*	1001
JM_{mittel}	1380						
JM_{min}	1001						

5.2.2.4 Überwachte Maximum Likelihood-Klassifikation

Auf Grundlage der Signaturanalysen wurden die Kanäle 1 und 2 nicht in die Klassifikation mit einbezogen, um den Anteil redundanter Information zu minimieren und in die Klassifikation nur die wesentliche Erklärungsbeiträge liefernden Kanäle einzubeziehen. Die Grauwertverteilungen der Kanäle und Signaturen wurden mit χ^2 -Tests auf ihre Annäherung an die Normalverteilung geprüft. Die Ergebnisse rechtfertigten auch statistisch den Einsatz eines Maximum Likelihood-Klassifikators.

Auf die Möglichkeiten einer Vorabfestlegung bestimmter Klassenzugehörigkeitswahrscheinlichkeiten und deren Integration in den Klassifikationsprozeß über Bayesianische Statistik wurde aus Mangel an derartigen Informationen verzichtet, alle Klassen bekamen dieselbe Ausgangswahrscheinlichkeit ($a_{k1} = 1$ in Formel 5.10). Ebenso wurde auf die Definition eines Distanzwertes verzichtet, ab dessen Überschreitung ein Pixel keiner Klasse zugeordnet wird. Die Zurückweisung mit hoher Wahrscheinlichkeit falsch klassifizierter Bildelemente wurde im Rahmen der Nachbearbeitung klassenspezifisch durchgeführt. Die ML-Klassifikation wurde mit Erdas/Imagine vollzogen, die Software bestimmt die spektrale Distanz für jedes Pixel zu den verschiedenen Klassensignaturen nach Formel 5.10. Das Pixel wird der Klasse zugeordnet, zu deren Signatur es den geringsten Distanzwert aufweist.

$$D = \ln(a_{k1}) - (0.5 \ln(|C_{k1}|)) - (0.5(X - M_{k1})T(C_{k1} - l)(X - M_{k1})) \quad (5.10)$$

- D : Gewichteter Distanzwert
 $k1$: Eine bestimmte Klasse k1
 X : Der Mittelvektor des Pixels in Bearbeitung
 M_{k1} : Der Mittelvektor der Signaturklasse k1
 a_{k1} : Wahrscheinlichkeit, daß ein beliebiges Pixel der Klasse k1 angehört (=1, s.o.)
 C_{k1} : Die Kovarianzmatrix der Pixel im Trainingsgebiet der Klasse k1
 $|C_{k1}|$: Determinante von C_{k1}
 $C_{k1} - l$: Inverse Matrix von C_{k1}
 T : Transpositionsfunktion (vgl. z.B. ZEIDLER 1996[308])

Tabelle 5.16 zeigt das Klassifikationsergebnis. Zusammenfassend läßt sich festhalten:

- Die flächenmäßig bedeutendste Nutzung stellen die Waldgebiete. Sie nehmen fast die Hälfte der Einzugsgebietsfläche ein (44 %). Laub- und Mischwälder stellen mit 25 % den größeren Teil der Waldflächen.
- 25 % der Einzugsgebietsfläche nehmen Grünlandflächen ein.
- Etwa 18 % des Einzugsgebiets fallen in die Bebauungsklassen, 2 % sind als dichte Bebauung ausgewiesen.
- Geringere Bedeutung haben die agrarisch genutzten (*agr*: 8 %) und bodenbeeinflußten (*bod*: 5 %) Flächen.

Tabelle 5.16: Ergebnis der überwachten ML-Klassifikation

Klasse	Pixelzahl	EZG [%]	[km ²]
bbng1	63967	2.01	57.57
bbng2	495689	15.60	446.12
agr	252356	7.94	227.12
bod	163633	5.15	147.27
grlnd	785310	24.71	706.78
wald1	804966	25.33	724.47
wald2	605122	19.04	544.61
wass	7078	0.22	6.37
TOTAL	3178121	100.00	2860.31

- 0.22 % der Einzugsgebietsfläche werden von offenen Wasserflächen eingenommen.

Damit wird der, aus der visuellen Interpretation gewonnene, Eindruck bestätigt. Der Wert für die Gesamtfläche des Einzugsgebiets liegt etwas zu hoch (vgl. Kap. 4.1), da die aus den 50m Höhenmodellen abgeleitete Einzugsgebietsgrenze sich nicht direkt mit den Pixelgrenzen der geokodierten Landsat TM-Szene deckt.

Die, als Ergebnis der Klassifikation erzeugte Rasterdatei, wurde attribuiert und zur Qualitätsverbesserung den Nachbearbeitungen übergeben. Im Rahmen der weiteren Verarbeitungen kam es bei den prozentualen Flächenanteilen zu Veränderungen.

5.2.3 Nachbearbeitung des Klassifikationsergebnisses

Die Nachbearbeitung des Klassifikationsergebnisses umfaßte die folgenden vier Schritte:

1. Zunächst wurden zur Fehlerbeurteilung Testgebiete ausgewiesen und für diese Konfusionsmatrizen erstellt. Aus den Matrizen wurde die Ergebnisgenauigkeit abgeschätzt.
2. Anschließend wurden unsicher klassifizierte Bildelemente aus dem Ergebnis ausgeschlossen. Die Zurückweisung erfolgte anhand der Mahalanobis-Distanzen zwischen Pixelhaupt- und Klassensignaturvektoren, mit auf Grundlage der χ^2 -Verteilungen der einzelnen Klassen gesetzten Schwellenwerten.
3. Im nächsten Schritt wurden die zurückgewiesenen Pixel in einem iterativen Prozeß auf Grundlage von Modal-Filterverfahren umgebungsbezogen reklassifiziert.
4. Abschließend wurden Mischpixelerscheinungen eliminiert.

Auf allen Stufen des Nachbearbeitungsprozesses wurde die Ergebnisqualität anhand der Testgebiete beurteilt.

5.2.3.1 Fehlerbeurteilung

Die Einschätzung und Beurteilung der Fehler von automatisierten Klassifikationsverfahren stellt einen kritischen Punkt innerhalb der Verfahrenskette dar, auf den vom Bearbeiter in vielerlei Hinsicht Einfluß genommen werden kann und der daher naturgemäß große subjektive Komponenten enthält. Hinzu kommt, daß in der Mehrzahl anwendungsbezogener Arbeiten zwar bestimmte, die Ergebnisgüte beschreibende, Koeffizienten und Matrizen vorgestellt werden, die zur deren Berechnung genutzte statistische und räumliche Datengrundlage aber unklar bleibt. Einleitend kann festgestellt werden, daß alle bekannten Genauigkeitsmaße spezifische Vor- und Nachteile besitzen, ihre Aussagekraft also von der konkreten Fragestellung abhängt.

An dieser Stelle soll nicht der Versuch unternommen werden, eine umfassende Diskussion über Techniken und Probleme der Genauigkeitsabschätzung von Fernerkundungsklassifikationen zu führen. Zu diesem

Thema existiert eine breite Literaturbasis, deren wesentliche Beiträge in aufbereiteter Form z.B. in der Arbeit von GANGKOFNER (1996[114]) zusammenfassend dargestellt sind. Im folgenden wird die in dieser Arbeit angewendete Methodik beschrieben. Darüber hinaus werden weitere Verfahren und Methoden der Genauigkeitsbewertung lediglich vorgestellt, um den inhaltlichen Hintergrund des angewendeten Verfahrens zu umreißen.

Die Qualitätsbeurteilung basiert normalerweise auf einem dreistufigen Verfahren:

1. Festlegung der Stichprobe (Einzelpixel oder Testgebiete), anhand derer die Genauigkeitsabschätzung durchgeführt werden soll und Erhebung der Referenzinformation, idealerweise zum Überflugtermin im Gelände. Da dies in der Praxis selten möglich ist, muß in der Mehrzahl der Fälle auf Zusatzinformation aus Karten, anderen Fernerkundungsdaten u.ä. zurückgegriffen werden.
2. Klassenspezifische Gegenüberstellung der Ergebnisse und zugehöriger Referenzinformation. Hier hat sich als Standard mittlerweile die Konfusionsmatrix durchgesetzt.
3. Berechnung von Indizes zur Quantifizierung der Gesamtgenauigkeit, bzw. klassenspezifischen Genauigkeit des Klassifikationsergebnisses.

Hinsichtlich der Stichprobenentnahme lassen sich zufällige und systematische Verfahren unterscheiden. Bei ersteren kann es sich um reine oder stratifizierte, d.h. klassenspezifisch gezogene, Zufallsstichproben handeln. Die systematischen Stichprobenziehungen lassen sich in gerichtete und ungerichtete Verfahren teilen (vgl. zu Vor- und Nachteilen der Verfahren bei der Analyse von Fernerkundungsklassifikationen weiterführend GANGKOFNER 1996[114]). Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal bietet die räumliche Diskretisierung der Stichprobenelemente. Hier besteht die Möglichkeit der Ziehung von Einzelpixeln oder dem Aufbau einer Stichprobe anhand von Pixelgruppen (Clustern). Die Einzelpixelentnahme stellt vom statistischen Standpunkt aus die einzige Möglichkeit einer zufälligen Entnahme unabhängiger Stichprobenelemente dar. Allerdings hat man in der fernerkundlichen Praxis das Problem, daß die erforderlichen Stichprobenumfänge nur schwer zu erreichen sind, da Referenzinformationen naturgemäß nur für kleinere Gebiete vorliegen.

Darüber hinaus ist die geometrische Zuordnung eines Pixels im Ergebnisdatensatz zu entsprechender Referenzinformation, je nach Qualität der geometrischen Referenzierung, häufig problematisch. Nimmt man selber Referenzinformation im Gelände auf, so bereitet die exakte Isolierung einer Pixelfläche in der „Realität“ oft Schwierigkeiten, insbesondere bei hochauflösenden Satellitendaten und in unübersichtlichen Wald- oder Grünlandbereichen. Einen Lösungsansatz bietet die Erstellung von Testgebietsclustern. Mit derartigen Verfahren ist eine räumliche Verortung einfacher und man erhält ohne Probleme größere Stichprobenumfänge. Allerdings sind die Stichprobenelemente nicht mehr unabhängig voneinander, es können schwer quantifizierbare Autokorrelationseffekte entstehen. Erschwerend kommt die Tatsache hinzu, daß die Auswahl der Testgebiete beim Bearbeiter liegt und dessen Sorgfalt und Erfahrung das Ergebnis möglicherweise stärker beeinflussen, als das letztlich gewählte Verfahren.

Die Konfusionsmatrizen gestatten die Berechnung verschiedener Indizes, die eine quantitative Einschätzung der Ergebnisqualität ermöglichen. Formal lassen sich (i) beschreibende, (ii) kombinierte beschreibende und (iii) analytische Indizes unterscheiden (GANGKOFNER 1996[114]), wobei letztere eher Aussagen über die Güte des Verfahrens an sich, als über die Zuverlässigkeit des Klassifikationsergebnisses treffen. Daher finden sich in der anwendungsbezogenen Literatur vor allem beschreibende Indizes.

Zur Qualitätsabschätzung der Landnutzungsklassifikation im Siegeinzugsgebiet wurden anhand der Referenzinformation zunächst Testgebiete mit bekannter Landnutzung ausgewiesen. Diese deckten sich nicht mit den zur Klassifikatoreichung genutzten Trainingsgebieten (vgl. Kap. 5.2.2.3). Die Testflächen lagen in der Mehrzahl in den Teileinzugsgebieten von Sülz, Bröl, Hanfbach, Pleisbach, Ferndorf und Nister, da dort die beste Referenzdatenlage gegeben war. Tabelle 5.17 faßt die wesentlichen Parameter zusammen. Insgesamt wurden 74 Testflächen mit einer Gesamtfläche von 13.17 km² ausgewiesen. Die, für die Klassen unterschiedlich gut verwertbaren Referenzdaten, führten zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Trainingspixel pro Klasse, die bei der Bewertung des Ergebnisses zu beachten ist. Vor allem die nutzungsmäßig dominierenden Klassen Wald und Grünland konnten durch große Testgebiete repräsentiert werden.

Tabelle 5.18 zeigt die Konfusionsmatrix der 74 Testgebiete. In den Reihen finden sich die prozentualen Verteilungen nach Klassen in den Testgebieten. Die Prozentangaben beruhen auf direktem Vergleich der

Tabelle 5.17: Testgebiete

Signatur	Teilfl.	Pixelzahl	Fläche [km ²]
agr	7	263	0.2367
bod	14	1213	1.0917
wass	3	952	0.8568
grlnd	11	2910	2.6190
wald1	12	3627	3.2643
wald2	11	2959	2.6631
bbng1	7	777	0.6957
bbng2	9	1935	1.7451

Testgebietsflächen mit den Klassifikationsergebnissen für diese Gebiete. Eine Wichtung nach Anteil der Flächen im Klassifikationsergebnis, wie von einigen Autoren empfohlen (GANGKOFNER 1996[114], CARD 1982[40]), fand nicht statt. Der im unteren Tabellenteil angegebene Gesamtgenauigkeitswert entsteht aus dem flächenanteilsgewichteten Diagonalmittel.

Die Tabelle bestätigt den aus den Signaturanalysen gewonnenen Eindruck. Die erreichten Genauigkeiten der Bebauungsklassen liegen mit 88 %, bzw. 86 % am niedrigsten. Hier zeigt sich die auch aus Abbildung 5.9 hervorgehende spektrale Ähnlichkeit der Klassen. Diese ist auch daran abzulesen, daß die Mehrzahl der falsch klassifizierten Pixel in die jeweils andere Bebauungsklasse fällt.

Ebenfalls gering fällt die erreichte Genauigkeit bei den Laub- und Mischwaldflächen aus. Auch hier spielt die spektrale Breite dieser Klasse eine Rolle, die ja bereits per Definition eine Mischklasse darstellt. Die häufigsten Fehlklassifizierungen fallen in die Agrar- und Nadelwaldflächen. Die spektral am breitesten angelegten Flächen stellen die Grünlandbereiche dar. Der Signaturhauptvektor liegt allerdings in den einbezogenen Kanälen recht weit von denen der anderen Klassen entfernt, so daß die erreichte Genauigkeit mit 92 % als befriedigend zu bezeichnen ist. Fehlklassifizierungen fallen vor allem in die Agrarflächen. Bei der Auswertung optischer Satellitendaten stellt die Trennung bestimmter Ackernutzungen von Grünlandbereichen ein typisches Problem dar. Dementsprechend machen bei den Agrarrestflächen Fehlklassifizierungen als Grünland den Hauptteil aus, wenngleich die Genauigkeit mit 97 % bereits sehr hoch liegt.

Tabelle 5.18: Konfusionsmatrix der 74 Testgebiete vor der Nachbearbeitung

[%]	bbng1	bbng2	agr	bod	grlnd	wald1	wald2	wass	S [†]	K [‡]
bbng1	88.42	11.07	0.00	0.13	0.00	0.13	0.26	0.00	100.01	2.01
bbng2	8.48	85.74	3.10	0.21	0.72	1.76	0.00	0.00	100.01	15.60
agr	0.00	0.00	96.96	0.00	3.04	0.00	0.00	0.00	100.00	7.94
bod	0.00	0.16	0.33	97.86	1.65	0.00	0.00	0.00	100.00	5.15
grlnd	0.00	0.48	5.84	0.21	91.72	1.75	0.00	0.00	100.00	24.71
wald1	0.08	1.68	3.47	0.00	1.60	88.61	4.55	0.00	99.99	25.33
wald2	0.41	0.61	0.00	0.00	0.00	0.51	98.48	0.00	100.01	19.04
wass	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	98.74	100.01	0.22
Gesamtgenauigkeit: 91.97 %										

[†]S: Reihensumme

[‡]K: Anteil im Klassifikationsergebnis

Die höchsten Genauigkeiten werden in den Klassen Boden, Nadelwald und Wasser erreicht. Die Gesamtgenauigkeit liegt mit knapp 92 % bereits vor den Nachbearbeitungen recht hoch, muß allerdings auch vor dem Hintergrund der eingangs formulierten Einschränkungen gesehen werden. Faßt man die beiden Bebauungsklassen flächengewichtet zusammen, so steigt die Genauigkeit für die bebauten Flächen auf 94.81 %, die Gesamtgenauigkeit beträgt in diesem Fall 93.51 %. Diese, für einen monotemporalen Ansatz recht hohe, Klassifikationsgenauigkeit ist u.a. Folge der Klassenbildung, die sich auf die Ausweisung von Hauptklassen

Tabelle 5.19: Zurückweisungsschwellen

Klasse	χ^2	Konf. Int.
bbng1	13.28	0.01
bbng2	9.49	0.05
agr	13.28	0.01
bod	13.28	0.01
grlnd	13.28	0.01
wald1	13.28	0.01
wald2	13.28	0.01
wass	13.28	0.01

mit gut separierbaren Signaturen beschränkte und sich somit eng an der spektralen Charakteristik der Szene orientierte.

Zu berücksichtigen ist, daß die beschriebenen Genauigkeiten streng genommen nur für die Testgebiete gelten und nicht ohne weiteres in die Fläche zu extrapolieren sind. Da es sich bei der Stichprobennahme nicht um ein zufälliges Verfahren handelt, läßt sich auch ein Konfidenzniveau für die Übertragung auf die Grundgesamtheit (hier alle Bildelemente des Klassifikationsergebnisses) nicht bestimmen. Zwar waren die Stichprobenumfänge ausreichend groß, die Probleme, die mit der Autokorrelation in den Gebieten und vor allem mit der Auswahl der Gebiete zusammenhängen, erlauben aber, vom statistischen Standpunkt aus, keine quantitative Extrapolation. Insofern bieten die Ergebnisse der Genauigkeitsabschätzungen lediglich Hinweise auf das Verhalten der Grundgesamtheit. Diesem typischen Problem anwendungsbezogener Fernerkundungsdatenanalysen wird in dieser Arbeit Rechnung getragen, indem lediglich grundlegende, den Schwierigkeiten des übrigen Verfahrensablaufs angemessene, Kennwerte berechnet werden und deren Extraktion nachvollziehbar dargestellt wird.

5.2.3.2 Zurückweisung unsicher klassifizierter Bildelemente

Die Zurückweisung mit bestimmter Wahrscheinlichkeit falsch klassifizierter Pixel kann bereits im Klassifikationsprozeß, durch die Angabe eines Mindestsignifikanzniveaus, bei dessen Unterschreitung keine Zuweisung erfolgt, durchgeführt werden. Dieses häufig angewendete Verfahren ist streng genommen nur im seltenen Fall einer gleichverteilten Fehlerwahrscheinlichkeit über alle Klassen sinnvoll. Die Zurückweisung, als von der Klassifikation getrennter Schritt im Rahmen der Nachbearbeitung, bietet den Vorteil, daß die Fehler mit unterschiedlichen Methoden klassenspezifisch analysiert werden können, und so eine für die Ergebnisinterpretation bedeutende Zusatzinformation entsteht.

Imagine bietet als Klassifikationsnebenprodukt die Erstellung einer Distanzdatei an, die je nach gewähltem Verfahren die Abstandswerte des Vektors jedes Bildelements vom Hauptvektor der Klasse, zu der es zugeordnet wurde, enthält. Im Falle einer ML-Klassifikation enthält die Distanzdatei die Mahalanobis-Distanzwerte. Auf Grundlage dieser Datei wird die Zurückweisung durchgeführt. Zur Abschätzung sinnvoller, klassenspezifischer Schwellenwerte wurden die Verteilungen der Distanzwerte herangezogen. Die Mahalanobis-Distanzwerte nehmen im Idealfall eine χ^2 -Verteilung an. Die aktuelle Form der Verteilung jeder Klasse gibt Auskunft, ob durch das Training geeignete Klassen erzeugt wurden. Die Schwellenwerte für die Zurückweisung wurden unter Verwendung der Grauerthistogramme durchgeführt, indem an geeigneter Stelle, in der Regel im Verflachungsbereich der Kurven, der „Histogrammschwanz“ abgeschnitten wurde.

Tabelle 5.19 faßt die gewählten Zurückweisungsschwellen für die acht Landnutzungsklassen zusammen. Mit Ausnahme der Flächen lockerer Bebauung wurden in allen Fällen Bildelemente unter einem Signifikanzniveau von 1% zurückgewiesen. Für die *bbng2*-Flächen wurde ein Signifikanzniveau von 5% gewählt, da zum einen die Fehlerquote in dieser Klasse besonders hoch ist, zum anderen die spektrale Mittellage dieser Klasse bedingt, daß im Originalklassifikationsergebnis zahlreiche unsicher zugeordnete Pixel am ehesten der Klasse lockerer Bebauung zugewiesen werden. Eine besondere Bedeutung spielt diese Tatsache auch bei den Mischpixelphänomenen auf die in Abschnitt 5.2.3.4 ausführlicher eingegangen wird. Die χ^2 -Werte gelten für die vier Freiheitsgrade (vier einbezogene TM-Kanäle) der Fragestellung.

Tabelle 5.20: Klassenverteilung nach der Zurückweisung

Klasse	Pixelzahl	EZG [km ²]	rel. [%]	EZG [%]	abs. [%]
bbng1	55033	49.53	-13.97	1.73	-0.28
bbng2	410411	369.37	-17.20	12.91	-2.69
agr	232578	209.32	-7.84	7.32	-0.62
bod	137878	124.09	-15.74	4.34	-0.81
grlnd	759457	683.51	-3.29	23.90	-0.81
wald1	774643	697.18	-3.77	24.37	-0.96
wald2	585722	527.15	-3.21	18.43	-0.61
wass	6499	5.85	-8.1	0.20	-0.02
zurückgew.	215900	194.31		6.79	+6.79
TOTAL	3178121	2860.31		99.99	

Tabelle 5.20 beschreibt die Verteilung der Landnutzung im Siegeinzugsgebiet nach der Zurückweisung. 6.79% aller Bildelemente wurden ausgeschlossen. Prozentual verlieren vor allem die Bebauungsklassen und die bodenbeeinflusste Klasse, gefolgt von den *agr*- und Wasserflächen. Grünland und die Waldklassen haben die geringste, relative Bildelementabnahme zu verzeichnen. Hier zeichnen sich weniger die Ergebnisse der Güteabschätzung, als vielmehr die Jeffries-Matusita-Distanzwerte aus den Signaturanalysen durch. Neben den weniger gut trennbaren Bebauungsklassen, bestehen die größten Defizite bei der Trennbarkeit von *bod* und *agr* mit der flächenmäßig dominierenden Bebauungsklasse *bbng2*.

Interessant ist die starke relative Abnahme der Wasserflächen, die weder die JM-Werte, noch die Güteabschätzung nahelegen. Hier wird ein Defizit bei den Trainings- und Testgebietsausweisungen deutlich. Da diese Gebiete vor allem in den großen, offenen Wasserflächen, z.B. den Talsperren, liegen, wird die spektrale Breite der Wasserflächen im Siegeinzugsgebiet nur unzureichend abgedeckt. Insbesondere kleinere Gewässer, wie Fischteiche, Weiher u.ä. haben häufig, bedingt durch andere Nährstoff- und Vegetationsverhältnisse, eine von großen, stehenden Gewässern abweichende spektrale Charakteristik. Diese war mit der vorhandenen Referenzinformation aber kaum in die Trainings- und Testgebietsausweisung zu integrieren. Durch die sehr eigenständige spektrale Signatur des Wassers wurden vom Signaturmittel stärker abweichende Bildelemente dennoch korrekt, allerdings mit verhältnismäßig hohen Mahalanobiswerten, klassifiziert. Insofern tritt durch die Zurückweisung im Bereich der Wasserflächen eine Ergebnisverschlechterung ein, die durch den geringen absoluten Anteil der Wasserflächen allerdings keine bedeutende Rolle spielt. Betrachtet man die auf das Einzugsgebiet bezogene Abnahme der Flächenanteile, so verlieren die *bbng2*-Flächen knapp 2.7%, alle anderen Nutzungen bleiben unter 1% absoluter Flächenabnahme.

Abbildung A.4 in Anhang A visualisiert den Prozeß der Zurückweisung anhand eines Ausschnitts südöstlich der Siegmündung bei Bonn, der zwar zum Teil außerhalb des Siegeinzugsgebiets liegt, sich aber dennoch gut zur Beschreibung verschiedener Phänomene eignet. Der obere Rahmen zeigt eine Farbkomposite der TM-Kanäle 453 (RGB) nach der Vorverarbeitung. Der Rahmen darunter zeigt das Klassifikationsergebnis vor der Nachbearbeitung. Der dritte Rahmen stellt das Distanzbild dar. In der SW-Darstellung bedeuten hohe Grauwerte große Mahalanobis-Distanzen, dort wo dunkle Töne vorherrschen sind die Pixel mit hohen Wahrscheinlichkeiten richtig klassifiziert. Es fällt auf, daß die „Fehler“ keineswegs gleichmäßig über den Bildausschnitt verteilt sind. Vielmehr konzentrieren sie sich flächenhaft in der Nutzung *bbng2*, ansonsten bilden sich an vielen Stellen lineare Strukturen die Nutzungsänderungslinien nachzeichnen. Hier findet sich ein Hinweis auf die Mischpixelproblematik: Im Bereich von Nutzungsänderungen bilden sich spektrale Mischsignale, die vom Klassifikator schlecht zugeordnet werden können. Häufig profitiert die Klasse *bbng2*, der diese unsicheren Pixel aufgrund ihrer spektralen Charakteristik zugeordnet werden. Deutlich erkennbar ist dies im Bereich des östlichen Rheinuferes, sowie in den Waldgebieten an der Grenze von Nadel-, bzw. Laub- und Mischwald. Auch die Grenzen von bodenbeeinflussten und Grünlandflächen werden häufig von Linien unsicherer Zuweisungen nachgezeichnet. Die Wasserfläche des Rheins ist durchweg durch ein höheres Grauwertniveau gekennzeichnet, hier verdeutlicht sich die weiter oben beschriebene Problematik der Trainingsgebietsausweisung für die Wasserflächen. In diesem Fall wurde der Rhein allerdings bewußt nicht in die Signaturzusammenstellung aufgenommen, da derartige Wasserflächen nicht im Siegeinzugsgebiet vorkommen.

Neben den *bbng2*-Flächen profitieren von Mischpixelerscheinungen weiterhin die *agr*-Flächen, vor allem in den Grenzbereichen von Boden und Grünland. Der Einfluß der Mischpixelphänomene wird im letzten Nachbearbeitungsschritt verkleinert. Der untere Rahmen zeigt das Klassifikationsergebnis nach der Zurückweisung. Entsprechend der Muster im Distanzbild liegen die zurückgewiesenen Bildelemente vor allem an Nutzungsgrenzen. Besonders deutlich wird dies an den Rheinufern beim Übergang von Wasser zu Grünland/Bebauung aber auch an den Übergängen der übrigen Nutzungstypen. Innerhalb der *bbng2*-Flächen ist die Zurückweisungsdichte erkennbar höher als in den Wald- und Grünlandflächen.

Der Reklassifikation der zurückgewiesenen Bildelemente widmet sich der im folgenden beschriebene Nachbearbeitungsschritt.

5.2.3.3 Umgebungsbezogene Reklassifikation

Bei der Nachbearbeitung von Klassifikationsergebnissen finden häufig Modalfilterverfahren Verwendung. Diese arbeiten nach dem Prinzip der Nachbarschaftsanalyse. Über den Rasterdatensatz wird ein Fenster bewegt, in dessen Grenzen festgestellt wird, welcher Klassenwert dominiert. Das jeweils im Zentrum gelegene Bildelement bekommt diesen als neuen Wert zugewiesen, der in einem neuen Datensatz abgelegt wird. Je nach Fenstergröße lassen sich mit diesem Verfahren Ergebnisse bereinigen, indem Strukturen unter einer bestimmten, vom Ausmaß des Fensters abhängigen, Größe unterdrückt werden.

Um die im Siegeinzugsgebiet zurückgewiesenen Pixel erneut einer Klasse zuzuordnen, wurde von der Annahme ausgegangen, daß für die Zugehörigkeit eines zurückgewiesenen Pixels jene Klasse die höchste Wahrscheinlichkeit besitzt, die in der direkten Nachbarschaft dominiert. Diese Überlegung basiert auf der Analyse der Distanzdatei und ist für die zurückgewiesenen Bildelemente entlang von Nutzungsänderungslinien begründet. Es ist aber nicht auszuschließen, daß mit dem Verfahren Nutzungen, die schlecht in den Signaturen abgebildet sind, nach ihrer Zurückweisung falsch reklassifiziert werden. Die Sorgfalt der Signaturanalysen ist somit auch in diesem Stadium der Bearbeitung von entscheidender Bedeutung. Generell ist von derartigen Verfahren abzusehen, wenn im Distanzbild regelmäßig ausgedehnte Flächen hoher Mahalanobis-Distanzen existieren. In diesem Fall ist eine erneute Klassifikation auf Grundlage erweiterter Trainings erforderlich.

Für eine angemessene Bearbeitung der skizzierten Aufgabe reichten die Standardfunktionalitäten von *Erdas/Imagine* nicht aus. Daher wurde mit der *Spatial Modeler Language* (SML) von *Imagine* ein Werkzeug erstellt und mittels *Erdas Macro Language* (EML) in die Benutzeroberfläche von *Imagine* integriert. Die Arbeitsweise der Prozedur wird im folgenden kurz beschrieben.

Abbildung 5.10 zeigt die Oberfläche des Reklassifikationswerkzeugs. Erforderliche Eingaben beschränken sich auf Ein- und Ausgabedatei, den Bildhintergrundwert (dieser wird nicht in die Dominanzfeststellung einbezogen) und den zu ersetzenden Wert (*threshold value*). Gegebenenfalls können die Einstellungen in der Attributdatei des Ausgangsdatsatzes in die zu erstellende Datei übernommen werden. Bearbeitungen von Bildausschnitten sind möglich, für diese sind im Vorfeld AOs (Areas of Interest) auszuweisen. Die eigentliche Reklassifikation kann vom Anwender schrittweise oder in einem automatischen Verfahren durchgeführt werden. Für die schrittweise Reklassifikation stehen Modalfilter der Größen 3·3 bis 29·29 zur Verfügung.

Je nach Filtergröße und Verteilung der zu ersetzenden Bildelemente können sehr viele Wiederholungen nötig sein, um ein Klassifikationsergebnis komplett zu überarbeiten. Daher steht ein Verfahrensablauf zur Verfügung, der in einem iterativen Prozeß die Reklassifikation automatisch durchführt. Dieser arbeitet nach dem Prinzip kleinstmöglicher Filtermatrizen, um sicherzustellen, daß lediglich die in direkter Nachbarschaft befindlichen Bildelemente zur Bestimmung des neuen Klassenwerts eines zurückgewiesenen Pixels herangezogen werden.

Konkret wird eine 3·3-Matrix solange über das Bild bewegt, bis sich mit dieser Filtergröße keine Veränderungen in der Anzahl der zurückgewiesenen Pixel mehr ergeben. In diesem Fall wird für eine Iteration auf eine 5·5-Matrix umgeschaltet, die nach erfolgtem Durchlauf wieder auf die 3·3-Größe zurückgesetzt wird. Erst wenn sich nach einem 3·3- und anschließendem 5·5-Durchlauf keine Veränderungen ergeben wird für einen Durchlauf auf eine 7·7-Matrix geschaltet, die dann ebenfalls auf die 3·3-Größe zurücksetzt. Die Filtergrößen können sich gegebenenfalls bis zu einer 29·29-Matrix entwickeln, im Normalfall reichen aber Matrizen bis zur 9·9-Größe aus. Das Vorgehen führt dazu, daß die zurückgewiesenen Pixelflächen von Iteration zu Iteration von den Rändern her „zuwachsen“. Der Veränderungswert, ab dessen Unterschreitung auf die nächstgrößere Matrix umgeschaltet wird, kann vom Anwender heraufgesetzt werden (*switch*

value), um das zeit- und rechenaufwendige Verfahren abzukürzen. Es empfiehlt sich schließlich die Angabe einer maximalen Iterationszahl (*max. loops*), bei deren Erreichen das Verfahren abgebrochen wird. Die Anzahl der durchlaufenen Iterationen kann in einer, sich nach jedem Durchlauf aktualisierenden, ASCII-Datei festgehalten werden. Sollte die Fragestellung die Anwendung von nicht-quadratischen Matrizen sinnvoll erscheinen lassen, so können beliebige Matrixformen auf einfache Weise erstellt und integriert werden.



Abbildung 5.10: Werkzeug zur Reklassifikation zurückgewiesener Bildelemente.

Tabelle 5.21 beschreibt den Reklassifikationsverlauf. Insgesamt waren 1046 Iterationen notwendig um die zurückgewiesenen Bildelemente komplett zu reklassifizieren. Die hohe Anzahl nötiger Iterationen hängt mit der Verwendung kleinster Modalmatrizen zusammen, die aus inhaltlichen Gründen angemessen erschien. Hier wird auch die Notwendigkeit eines automatisierten Ablaufs deutlich. Um die Arbeitsweise des Verfahrens ablaufen zu beobachten, wurden sieben Zwischenschnitte genommen, für diese wurde die jeweils aktuelle Klassenverteilung erfaßt. Die acht Datenblockreihen der Tabelle beschreiben die Ergebnisse nach 350, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 und 1046 Iterationen. Die Datenblöcke zeigen in der oberen Reihe die absolute Zahl der den Klassen bis zur jeweiligen Iteration zugeordneten Bildelemente, darunter befindet sich eine Prozentangabe, die sich auf die Gesamtzahl der im entsprechenden Iterationsblock reklassifizierten Pixel bezieht.

Es wird deutlich, daß in den ersten 350 Iterationsschritten bei einem Switch Value von null 98.70% (213103 von 215900) aller zurückgewiesenen Pixel reklassifiziert werden. Die *bbng2*- und *grlnd*-Flächen profitieren mit jeweils über 20% am deutlichsten, gefolgt von den Waldklassen. Die Nutzungen profitieren also nicht ausschließlich ihrem Gesamtflächenanteil im Siegeinzugsgebiet gemäß. Vielmehr spielen auch die spektrale Charakteristik und die klassenspezifischen Defizitverteilungen (vgl. Tab. 5.20) nach der Zurückweisung eine Rolle, wie die verhältnismäßig hohen Werte für *bbng2* und *bod* nahelegen. Das Grundmuster der Reklassifikationsgewinne bleibt bis zur 600. Iteration erhalten, zwischen Iteration 600 und 700 profitieren die bodenbeeinflussten Flächen überdurchschnittlich. Bis zur 600. Iteration sind bereits 98.98% der zurückgewiesenen Bildelemente erneut einer Klasse zugeordnet worden, absolut sind nur noch 2208 Pixel ohne Klasse. In diesem Stadium der Reklassifikation arbeiten die Modalmatrizen nur noch an einigen, großen Clustern zurückgewiesener Pixel. Die keiner Klasse zugeordnete Einzugsgebietsfläche beträgt nach 600 Durchläufen nur noch 0.07%. Zwischen 600 und 700 werden in 100 Iterationen nur noch 57 Bildelemente

Tabelle 5.21: Reklassifikationsverlauf

lt. [†]	z.g. [‡]	bbng1	bbng2	agr	bod	grlnd	wald1	wald2	wass
0	215900	55033	410411	232578	137878	759457	774643	585722	6499
-350	-213103	+4835	+45763	+12553	+24220	+52908	+36656	+35049	+1119
sv*0	2797	2.27%	21.47%	5.89%	11.37%	24.83%	17.20%	16.45%	0.53%
-500	-479	+27	+121	+21	+67	+181	+27	+35	+0
sv0	2318	5.64%	25.26%	4.38%	13.99%	37.79%	5.64%	7.31%	0.00%
-600	-110	+13	+22	+2	+23	+36	+3	+11	+0
sv0	2208	11.82%	20.00%	1.82%	20.91%	32.73%	2.73%	10.00%	0.00%
-700	-57	+1	+1	+0	+44	+3	+8	+0	+0
sv0	2151	1.75%	1.75%	0.00%	77.19%	5.26%	14.04%	0.00%	0.00%
-800	-1193	+22	+282	+51	+281	+390	+117	+50	+0
sv10	958	1.84%	23.64%	4.27%	23.55%	32.69%	9.81%	4.19%	0.00%
-900	-487	+22	+111	+22	+127	+155	+29	+21	+0
sv10	471	4.52%	22.79%	4.52%	26.08%	31.83%	5.95%	4.31%	0.00%
-1000	-224	+3	+79	+3	+60	+52	+23	+4	+0
sv10	247	1.34%	35.27%	1.34%	26.79%	23.21%	10.27%	1.79%	0.00%
-1046	-247	+0	+0	+0	+12	+56	+179	+0	+0
sv10	0	0.00%	0.00%	0.00%	4.86%	22.67%	72.47%	0.00%	0.00%

[†]lt.: Iteration

[‡]z.g.: zurückgewiesen

*sv: Switch Value

reklassifiziert, d.h. die 3-3-Matrixgröße ist den verbliebenen Clustern zurückgewiesener Pixel nicht mehr angemessen. Durch die Erhöhung des Switch Value auf zehn wird die Vergrößerung der Matrizen erleichtert. Zwischen 700 und 800 kommt es entsprechend noch einmal zu einem „Reklassifikationsschub“ mit dem 55 % der verbliebenen Pixel einer neuen Klasse zugeordnet werden. Nach 1046 Durchläufen sind alle zurückgewiesenen Bildelemente reklassifiziert.

Der beschriebene Verfahrensablauf wurde durchgeführt um die Arbeitsweise der Prozedur zu beobachten. In der konkreten Anwendung hätten 300 Iterationen mit anschließender manueller Reklassifikation unter Verwendung größerer Matrizen für eine im Ergebnis vergleichbare Reklassifikation ausgereicht. Die notwendige Anzahl von Iterationen und der Reklassifikationsverlauf hängen wesentlich mit der Geometrie und Verteilung der zu reklassifizierenden Bildelemente zusammen, die wiederum von Skalenbereich und Auflösung der klassifizierten Entitäten abhängen. Insofern müssen die Gewichtung von automatischer und manueller Reklassifikation, sowie Matrixgrößen und Switch Value von Fall zu Fall angepaßt werden.

Insgesamt erwies sich der aufgebaute Werkzeugsatz als ausreichend flexibel für die Lösung der gestellten Aufgabe, er läßt sich darüber hinaus auf beliebige Klassifikationskonfigurationen anwenden. Defizite bestehen in der programmtechnischen Realisierung, die, unabhängig von der räumlichen Verteilung der zu reklassifizierenden Objekte, pro Iteration den gesamten Bildausschnitt analysiert. Dies kann durch die Nutzung von AOIs verhindert werden, deren manuelle Ausweisung nach einer bestimmten Iterationszahl ist aber ebenfalls mit einigem Aufwand verbunden. Prinzipiell wäre auch ein automatisches Verfahren denkbar, daß nicht iterativ, sondern clusterorientiert arbeitet, bzw. die nötigen AOIs nach jeder Iteration selbst ausweist und diese selektiv bearbeitet.

Die Klassenverteilung nach der Reklassifikation beschreibt Tabelle 5.22. In der Spalte *rel. [%]* sind die Gewinne im Vergleich zur Klassenverteilung nach der Zurückweisung aufgetragen. Der Vergleich mit Tabelle 5.20 zeigt, daß Verluste und Gewinne unterschiedlichen Mustern folgen. Den stärksten Reklassifikationsgewinn verzeichnen die bodenbeeinflußten Flächen, die zuvor bei der Zurückweisung auch einen hohen, relativen Flächenverlust erlitten. Den zweitstärksten Gewinn verzeichnen die Wasserflächen. Hierzu trägt die Tatsache bei, daß an den Gewässerrändern häufig besonders charakteristische Mischpixel entstehen, deren spektrale Signaturen denen der Bebauungsklassen ähneln. Hinzu kommt, daß unsicher klassifizierte und zurückgewiesene Bildelemente aufgrund der geometrischen und spektralen Eigenschaften der Wasserflächen überproportional häufig diesen zugeschrieben werden. Die locker bebauten Bereiche liegen mit etwa 10 % Gewinn im mittleren Bereich, sie können ihr, durch die Zurückweisung erlittenes, Defizit nicht wieder aufholen.

Tabelle 5.22: Klassenverteilung nach der Reklassifikation

Klasse	Pixelzahl	EZG [km ²]	rel. [%]	EZG [%]	abs. [%]
bbng1	59956	53.96	+8.95	1.89	+0.16
bbng2	456790	411.11	+11.30	14.37	+1.46
agr	245230	220.71	+5.44	7.72	+0.40
bod	162712	146.44	+18.01	5.12	+0.78
grlnd	813238	731.91	+7.08	25.59	+1.69
wald1	811685	730.52	+4.78	25.54	+1.17
wald2	620892	558.80	+6.00	19.54	+1.11
wass	7618	6.86	+17.22	0.24	+0.04
zurückgew.	0	0.00		0.00	-6.79
TOTAL	3178121	2860.31		100.01	

Die Klassen mit den geringsten Zurückweisungen haben auch die geringsten relativen Reklassifikationsgewinne zu verzeichnen, liegen in der Bilanz aber im positiven Bereich. Betrachtet man Gewinner und Verlierer der bislang durchgeführten Nachbearbeitungen, so wird deutlich, daß die *bbng*-, *agr*- und *bod*-Flächen verloren haben, demgegenüber die Grünland-, Wald- und Wasserflächen zu den Gewinnern zählen. Die Prozentwerte erlauben noch keine Aussagen über die nutzungsspezifischen Bilanzen, weisen aber bereits in eine, im Sinne der Nachbearbeitungslogik sinnvolle, Richtung, indem beispielsweise der Anteil besonders fehlklassifizierungsgefährdeter *bbng2*- und *agr*-Pixel abnimmt. Um weitere Hinweise über die Art der mit den Nachbearbeitungen verbundenen Nutzungsänderungen zu gewinnen, wurden mehrere, über den Bildausschnitt verteilte, Gebiete ausgeschnitten und visuell interpretiert.

Einen Eindruck der flächenspezifischen Reklassifikationswirkung gibt Abbildung A.5 (Anhang A). Sie zeigt beispielhaft die Landnutzungsverteilung in einem Gebiet südöstlich von Bonn. Die zurückgewiesenen Pixel im oberen Rahmen der Abbildung orientieren sich wie in Abbildung A.4 im wesentlichen entlang der Nutzungsgrenzen. Der mittlere Rahmen zeigt das Ergebnis nach der Reklassifikation. Entlang der Grenzen von Laub- und Nadelwald sind zahlreiche *bbng2*-Pixel zu erkennen, die Fehlklassifikationen darstellen und auf Mischpixelprobleme zurückzuführen sind. In den Grenzbereichen von bodenbeeinflussten Flächen und Grünland finden sich aus demselben Grund falsch klassifizierte *agr*-Pixel. Die im folgenden beschriebene Bereinigung von Mischpixelphänomenen stellt den letzten Schritt der Klassifikationsnachbearbeitung dar.

5.2.3.4 Mischpixelbereinigung

Die visuelle Interpretation der räumlichen Verteilung der Nutzungen in den Testgebieten ergab, daß die *agr*- und *bbng2*-Klassen besonders stark von Mischpixelphänomenen profitieren. Vor allem in den Übergangsbereichen von Laub- und Nadelwald, sowie Grünland und „Boden“ finden sich eingestreute falsch klassifizierte Einzelpixel. Deren spektrale Signatur ähnelt der Originalklassensignatur so stark, daß sie von der Zurückweisung nicht erfaßt werden. Die übrigen Klassen wurden nicht in die Mischpixelbereinigung einbezogen. Wasser und Nadelwald haben derart eigenständige Signaturen, daß sie von dem beschriebenen Problem kaum betroffen sind. Bei den verbleibenden Nutzungen hätte eine Einbeziehung nicht zu einer Ergebnisverbesserung geführt, sondern, durch die erodierende Wirkung der verwendeten Modalmatrizen, eher negativen Einfluß gehabt, da zum Beispiel *bbng1*-Einzelpixel häufig tatsächlich in *bbng2*-Bereichen vorkommen. Ähnliches gilt für als Grünland klassifizierte Lichtungsbereiche in den Waldgebieten und einzelne Bildelemente einer Waldklasse in der jeweils anderen.

Für die Mischpixelbereinigung wurde ebenfalls ein Modalfilterverfahren angewendet. In SML und EML wurde ein einfaches Werkzeug aufgebaut, dessen Oberfläche Abbildung 5.11 zeigt. Im Gegensatz zum Reklassifikationswerkzeug wurde kein automatisches Verfahren implementiert, da die Entscheidung, welche Klassen einbezogen werden, sehr stark von der Charakteristik der zu bearbeitenden thematischen Rasterdatei und der Fragestellung abhängt. Weiterhin sind für eine Mischpixelbereinigung, wie sie im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde, nur wenige Iterationen notwendig. Die Funktionalität des Werkzeugs ähnelt der des Reklassifikationstools. Nur die Bildelemente der Klassen in den *apply at*-Werten können verändert werden, die umgebungsbezogene Reklassifikation erfolgt auf Grundlage aller Klassen mit Ausnah-



Abbildung 5.11: Werkzeug zur Bereinigung von Mischpixelerscheinungen.

me der Bildhintergrundklasse (*background value*). An Modalfiltergrößen stehen 3·3, 5·5 und 7·7-Matrizen zur Verfügung.

Das Hauptproblem des beschriebenen Ansatzes besteht in der Tatsache, daß die Modalfilter alle einbezogenen Flächen bearbeiten. Entsprechend der Arbeitsweise von Modalfiltern kann es zu Erosionen in den Randbereichen korrekt klassifizierter Flächen kommen, korrekt klassifizierte Einzelpixel werden gänzlich eliminiert. Das Problem gewinnt mit der Vergrößerung der Matrixgröße an Gewicht.

Im Vorfeld der Mischpixelbereinigung wurde die Wirkung verschiedener Matrixgrößen und Kombinationen, sowie Iterationen anhand einiger Testgebiete untersucht. Die besten Ergebnisse lieferte ein einmaliger Durchlauf einer 3·3-Modalmatrix, mit dem daraufhin der Gesamtausschnitt der reklassifizierten Landnutzungskarte bearbeitet wurde.

Die Klassenverteilung nach der Mischpixelbereinigung zeigt Tabelle 5.23. Die stärkste Veränderung erfahren die *agr*-Flächenanteile. Ihr relativer Anteil verringert sich um 55 % was einem absoluten Flächenverlust von 4.24 % der Einzugsgebietsfläche entspricht. Hier summieren sich erwünschte und unerwünschte Effekte: Die aufgrund der Mischpixelphänomene zustande gekommenen Fehlklassifizierungen werden in hohem Maße eliminiert, allerdings sind gerade Klassen, die sich in, im Verhältnis zur Skala der Rasterauflösung, kleine Flächen aufteilen, besonders von den Erosionswirkungen des Modalfilterverfahrens bedroht. Dies gilt zum Beispiel für die Ackernutzungen im Siegeinzugsgebiet. Nur eine flächenspezifische Analyse der Verteilungsänderungen in Gebieten mit verlässlicher Referenzinformation kann entscheiden, ob das Verfahren ergebnisverbessernd wirkt. Die *bbng2*-Flächen verzeichnen einen relativen Verlust von 13 %, ihr absoluter Anteil im Einzugsgebiet sinkt um 1.9 %. Zu den Gewinnern gehören die Grünland- und *wald1*-Flächen. Die starke relative Zunahme der *bbng1*-Flächen spielt aufgrund des geringen absoluten Flächenanteils dieser Klasse keine bedeutende Rolle.

Abbildung A.5 visualisiert die Wirkung der Mischpixelbereinigung. Einzelpixel der Klassen *agr* und *bbng2* werden eliminiert. An größeren Clustern dieser Nutzungen wird aber auch die erodierende Wirkung des Modalfilterverfahrens deutlich. Neben den visuellen Interpretationen in verschiedenen Referenzgebieten, wurde für die in Tabelle 5.17 beschriebenen Testgebiete erneut eine Konfusionsmatrix errechnet. Das Ergebnis zeigt

Tabelle 5.23: Klassenverteilung nach Abschluß der Nachbearbeitung

Klasse	Pixelzahl	EZG [km ²]	rel. [%]	EZG [%]	abs. [%]
bbng1	65456	58.91	+9.17	2.06	+0.17
bbng2	397122	357.41	-13.06	12.50	-1.87
agr	110745	99.67	-54.84	3.48	-4.24
bod	170433	153.39	+4.75	5.36	+0.24
grlnd	899277	809.35	+10.58	28.30	+2.71
wald1	882288	794.06	+8.70	27.76	+2.22
wald2	645111	580.60	+3.90	20.30	+0.76
wass	7689	6.92	+0.93	0.24	0.00
TOTAL	3178121	2860.31		100.00	

Tabelle 5.24. Die Gesamtgenauigkeit stieg in den Testgebieten durch die Nachbearbeitungen um 2.72% auf 94.69% (vgl. Tab. 5.18). Mit einer Ausnahme vergrößerte sich für alle Nutzungen die Übereinstimmung. Lediglich für die *agr*-Flächen ist ein minimaler Genauigkeitsverlust festzustellen (-0.38%). Bemerkenswert sind die Verbesserungen in den Klassen *bbng1* (+6.3%), *grlnd* (+4.36%) und *wald1* (+4.00%). Die Nadelwald- und Wasserflächen verbessern sich geringfügig auf ein Niveau um die 99%. Die einzige Nutzung, die unter der 90%-Marke bleibt, sind die locker bebauten Flächen. Sie verbessern sich durch die Nachbearbeitungsverfahren von 85.74% auf 87.18% (+1.44%).

Tabelle 5.24: Konfusionsmatrix der 74 Testgebiete nach der Nachbearbeitung

[%]	bbng1	bbng2	agr	bod	grlnd	wald1	wald2	wass	S [†]	K [‡]
bbng1	94.72	4.76	0.00	0.13	0.00	0.13	0.26	0.00	100.00	2.06
bbng2	9.04	87.18	0.93	0.16	0.72	1.96	0.00	0.00	99.99	12.50
agr	0.00	0.00	96.58	0.38	3.04	0.00	0.00	0.00	100.00	3.48
bod	0.00	0.00	0.08	98.02	1.81	0.08	0.00	0.00	99.99	5.36
grlnd	0.00	0.17	1.75	0.14	96.08	1.86	0.00	0.00	100.00	28.30
wald1	0.06	0.25	0.77	0.00	1.71	92.61	4.60	0.00	100.00	27.76
wald2	0.41	0.17	0.00	0.00	0.00	0.47	98.95	0.00	100.00	20.30
wass	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	99.26	100.00	0.24
Gesamtgenauigkeit: 94.69%										

[†]S: Reihensumme

[‡]K: Anteil im nachbearbeiteten Klassifikationsergebnis

5.2.4 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Im Rahmen der Auswertungen optischer Satellitendaten wurde auf Grundlage einer Landsat TM-Szene vom 05.08.1992 eine integrierte Methodik vorgestellt, die sich aus Vorverarbeitungen des Ausgangsdatensatzes, einer überwachten Maximum Likelihood-Klassifikation der korrigierten Ausgangsdaten und der Nachbearbeitung des Klassifikationsergebnisses zusammensetzte. Im Ergebnis existieren thematische Rasterdateien, die die Landnutzung im Siegeinzugsgebiet zum Zeitschnitt 05.08.1992 flächendeckend in acht Klassen beschreiben und innerhalb eines GI-Systems in die Ausweisung von HRUs als Grundlage distributiver, hydrologischer Modellierungsverfahren einfließen können.

Die Ergebnisse belegen die besondere Bedeutung der Signaturanalysen und Trainingsgebietsausweisungen, sowie der Parametersetzungen zu Reklassifikation und Mischpixelbereinigung für die Qualität der resultierenden Landnutzungskarte. Die angewendete Methodik orientierte sich an einer Optimierung der Ergebnisqualität für das Gesamteinzugsgebiet. Je nach Nutzungsverteilung können in Teilgebieten der Sieg unter Umständen mit anderen Parametern der Nachbearbeitungsverfahren verbesserte Ergebnisse erzielt werden.

Tabelle 5.25: Klassifikationsergebnisse in den verschiedenen Stadien der Nachbearbeitung

Klasse	A [†]	B [†]	C [†]	D [†]
	EZG [%]	EZG [%]	EZG [%]	EZG [%]
bbng1	2.01	1.73	1.89	2.06
bbng2	15.60	12.91	14.37	12.50
agr	7.94	7.32	7.72	3.48
bod	5.15	4.34	5.12	5.36
grlnd	24.71	23.90	25.59	28.30
wald1	25.33	24.37	25.54	27.76
wald2	19.04	18.43	19.54	20.30
wass	0.22	0.20	0.24	0.24
zurückgew.	0.00	6.79	0.00	0.00
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00

[†] A: Klassifikationsergebnis vor den Nachbearbeitungen

B: Klassifikationsergebnis nach Zurückweisung

C: Klassifikationsergebnis nach Reklassifikation

D: Klassifikationsergebnis nach Mischpixelbereinigung

Daher wurden die verschiedenen Zwischenstadien der Ergebnisse archiviert und stehen als eigenständige Datenschichten für weitere Verarbeitungen zur Verfügung.

Tabelle 5.25 enthält die Flächenanteilsergebnisse der unterschiedlichen Nachbearbeitungsstadien in übersichtlicher Form. Zusammenfassend läßt sich festhalten:

- Vor allem für die *agr*-, *grlnd*- und *bbng2*-Flächen zeigt sich die mit den Nachbearbeitungen verbundene Veränderung der Flächenanteile.
- Hinweise zur absoluten Dynamik der Flächenveränderungen können aus den Anteilswerten nicht abgeleitet werden, hier bieten die visuellen Verfahren eine geeignetere Grundlage (vgl. z.B. Abb. A.4 und A.5 in Anhang A).
- Insbesondere die Wirkung verschiedener Ausgangsparameter der Reklassifikation und Mischpixelbereinigung ist mit Sorgfalt und Blick auf die Fragestellung zu testen, um die erodierende Wirkung der Modalfilterverfahren mit dem Genauigkeitsgewinn in der Fläche in Beziehung zu setzen und so zu sinnvollen Werten für Matrixgröße und iterativen Ablauf der Verfahren zu gelangen.

Die Qualitätsabschätzung erfolgte anhand von Konfusionsmatrizen aus 74 Testgebieten, der Bestimmung einer flächengewichteten Gesamtgenauigkeit und der visuellen Interpretation der Nutzungsverteilungsmuster und deren Sensibilität gegenüber verschiedenen Parametern der Nachbearbeitungsverfahren in Gebieten mit guter Referenzdatenlage. Es zeigte sich, daß insbesondere die visuelle Interpretation Hinweise liefert, die aus den globalen Genauigkeitsindizes und Konfusionsmatrizen nur bedingt zu extrahieren sind.

Einen weiteren Hinweis auf die Zuverlässigkeit des Ergebnisses liefert Tabelle 5.26. Im Einzugsgebiet der Bröl wurde im Spätsommer 1991 im Vorfeld einer Stofftransportmodellierung eine flächenhafte, detaillierte Landnutzungskartierung durchgeführt (BENDE 1994[24]). Die Übereinstimmung der Anteilswerte nach Angleichung der Klassenhierarchien ist ausgesprochen hoch. Größere Abweichungen ergeben sich lediglich in der Nadelwaldklasse. Hier erscheint das TM-Klassifikationsergebnis zuverlässiger, da die Aufnahme von Waldarten im Rahmen von Geländebegehungen häufig durch Unzugänglichkeit und Unübersichtlichkeit erschwert wird und die spektrale Charakteristik der Nadelwaldflächen sehr eigenständig ist. Bei der Angleichung der Klassenhierarchie war die Einordnung der bodenbeeinflussten Flächen aus der Fernerkundungsanalyse problematisch, bei denen es sich sowohl um abgeerntete Ackerflächen, als auch um kürzlich gemähte Grünlandbereiche handeln kann. Die Zuordnung erfolgte letztendlich willkürlich zu den Grünlandbereichen, da die Ackernutzung im Bröleinzugsgebiet flächenmässig kaum eine Rolle spielt. Die gute Übereinstimmung darf schließlich nicht darüber hinweg täuschen, daß die Verortung der Flächen nicht in diese Betrachtung eingeschlossen ist, insofern kann die Aussage der Tabelle nur als Hinweis und weiterer Baustein zur Qualitätsabschätzung des Ergebnisses dienen.

Tabelle 5.26: Landnutzung im Bröleinzugsgebiet: Geländeaufnahme vs. TM-Klassifikation

Geländekartierung Klassen	TM-Klassifikation Klassen	Gel.kar. [%]	TM-Klass. [%]
Siedlung	bbng1 bbng2	11.62	9.79
Mais Rübe Kartoffeln Wintergetreide Klee	agr	3.79	3.96
Mähwiese Mähweide Standweide	grlnd bod	50.36	49.31
Laubwald Mischwald Streuobst	wald1	28.59	27.01
Nadelwald	wald2	5.53	9.90
Gewässer	wass	0.12	0.04

Unter dem Vorbehalt der in Abschnitt 5.2.3.1 angesprochenen methodischen Probleme bei der flächenhaften Qualitätsbeurteilung von Landnutzungsklassifikationen und unter Berücksichtigung der beschriebenen Methoden zur Güteabschätzung kann die erreichte Genauigkeit über alle Klassen als zufriedenstellend betrachtet werden. Das Ergebnis kann zur Ableitung der HRUs an die entsprechenden GIS-Instrumente weitergegeben werden.

Um Aussagen zur Flächenverteilung auf Teileinzugsgebietsebene treffen zu können, wurden abschließend im GIS die Nutzungsanteile für die in Abschnitt 5.1.3.1 abgeleiteten Teileinzugsgebiete der Sieg bestimmt (vgl. auch Abb. 5.2). Die Ergebnisse enthält Tabelle 5.27. Die bereits in Abschnitt 5.2.1.4 herausgestellten Muster bestätigen sich nun auch quantitativ:

- Wald- und Grünlandnutzung dominieren im Siegeinzugsgebiet.
- Waldanteile von über 50 % prägen das Landschaftsbild in den nordöstlichen Teilen (Ferndorf, Obere Sieg, Heckeback, Heller, Wisserbach).
- In den Einzugsgebieten von Sülz, Wahnbach, Bröl und Hanfbach dominiert die Grünlandnutzung mit Anteilen zwischen 41 % und 47 %.
- Nennenswerte Anteile an Siedlungsflächen finden sich im Unterlauf der Sieg (Untere Sieg: 41.44 %). In den übrigen Teileinzugsgebieten schwankt der Siedlungsflächenanteil zwischen 9 % und 23 %.
- Die Agrarnutzungen machen insgesamt geringe Flächenanteile von regelmäßig unter 10 % aus, die Anteilswerte sinken, Höhenlage und Relief folgend, im Siegeinzugsgebiet von West nach Ost.
- Die sich auf Agrar- und Grünlandnutzungen aufteilenden bodenbeeinflussten Flächen machen in den südwestlichen Teileinzugsgebieten Untere Sieg (23 %), Pleisbach (22 %) und Hanfbach (18 %) bedeutende Flächenanteile aus.

5.3 Auswertung der ERS SAR-Daten

Im folgenden Abschnitt werden die Arbeiten zur landnutzungsspezifischen Auswertung der ERS-1/2-Radardaten beschrieben. SLC- und PRI-Daten erfordern im Rahmen der Vorverarbeitung unterschiedliche Verfahren, die zunächst in den Kapiteln 5.3.1 und 5.3.2 vorgestellt werden. Abschnitt 5.3.3 beschreibt die

Tabelle 5.27: Landnutzung in den Teileinzugsgebieten

[%]	Unt.Sieg	Agger	Sülz	Wahnb.	Bröl	Pleisb.	Hanfb.
bbng1	11.44	1.89	0.95	0.55	0.68	1.78	0.86
bbng2	30.00	13.55	9.96	9.75	9.11	16.56	9.69
agr	6.10	3.79	4.12	5.29	3.96	6.48	6.41
bod	22.59	3.09	4.73	5.78	4.19	22.11	18.19
grlnd	14.80	27.44	41.66	46.81	45.12	25.84	44.54
wald1	9.69	25.13	24.86	22.71	27.01	19.53	17.16
wald2	5.01	24.54	13.70	6.85	9.90	7.69	3.11
wass	0.37	0.57	0.01	2.26	0.04	0.01	0.04
EZG [%]	2.50	20.12	8.63	2.61	7.62	3.09	1.82
[km ²]	71.62	575.54	246.72	74.70	218.07	88.41	51.93
[%]	Mit.Sieg	Wisserb.	Nister	Heller	Heckeb.	Ob.Sieg	Ferndorf
bbng1	1.42	1.20	1.74	2.17	3.71	3.79	3.69
bbng2	11.49	7.84	11.63	11.64	19.25	13.90	16.29
agr	3.30	2.77	4.01	1.77	1.08	1.72	1.95
bod	4.92	2.54	8.01	1.88	1.83	3.31	2.94
grlnd	25.97	27.29	35.51	15.54	10.41	16.90	14.85
wald1	33.33	24.65	23.92	36.84	40.68	33.55	27.60
wald2	19.51	33.72	15.13	30.15	23.04	26.55	32.39
wass	0.04	0.00	0.06	0.01	0.00	0.29	0.28
EZG [%]	18.62	4.58	8.66	7.17	0.90	8.85	5.38
[km ²]	532.70	131.11	247.60	205.22	25.64	253.09	153.75

Landnutzungserfassung auf Grundlage unterschiedlicher Methoden (Intensitätsanalysen und Kohärenzanalysen). Abschließend werden in Kapitel 5.3.4 die Ergebnisse der Radardatenverarbeitung zusammengefaßt und bewertet.

5.3.1 Vorverarbeitung der PRI-Daten aus der ERS-1/2 Tandem Mission

Die Vorverarbeitung der ERS PRI-Daten umfaßte die Reduktion der Speckle-Erscheinungen mittels adaptiver Filterverfahren, die Berechnung der Radarrückstreukoeffizienten (vgl. Kap. 2.4.2.1) und die Terrain-Geokorrektur. Abbildung 5.12 zeigt den Ablauf in Form eines Organigramms. Die Arbeiten wurden auf allen, in Tabelle 4.3 aufgeführten, PRI-Datensätzen in ähnlicher Weise durchgeführt und werden im folgenden zusammenfassend beschrieben.

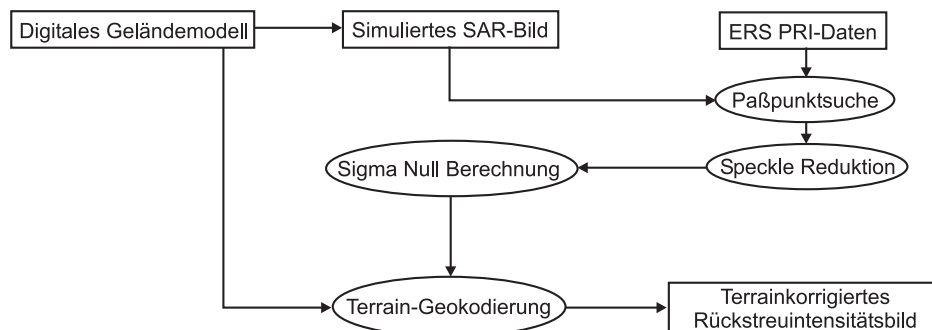


Abbildung 5.12: Organigramm der PRI-Daten Vorverarbeitung.

5.3.1.1 Reduzierung des Speckle-Effekts

In Kapitel 2.4.2.2 wurde bereits kurz auf die Entstehung von Speckle und Möglichkeiten seiner Reduzierung Bezug genommen. Den Effekt der Multi Look-Prozessierung zeigt Abbildung 5.13. Beide Rahmen zeigen die Wahnbachtalsperre nördlich von Hennef bei Bonn aus Daten einer ERS-2 Aufnahme vom 28.04.1996. Im linken Ausschnitt ist ein aus den 1-Look prozessierten, komplexen SLC-Daten berechnetes Intensitätsbild dargestellt, im rechten Rahmen der Ausschnitt aus dem 3-Look prozessierten PRI-Datensatz. Die unterschiedlichen Geometrien sind Folge der unterschiedlichen Prozessierungsstufen, die SLC-Daten liegen in Slant- die PRI-Daten in Ground Range-Geometrie vor. Die SLC-Daten konservieren die volle geometrische Auflösung des Systems, allerdings ist gegenüber den PRI-Daten der wesentlich höhere Anteil des Speckle-Rauschens augenscheinlich.

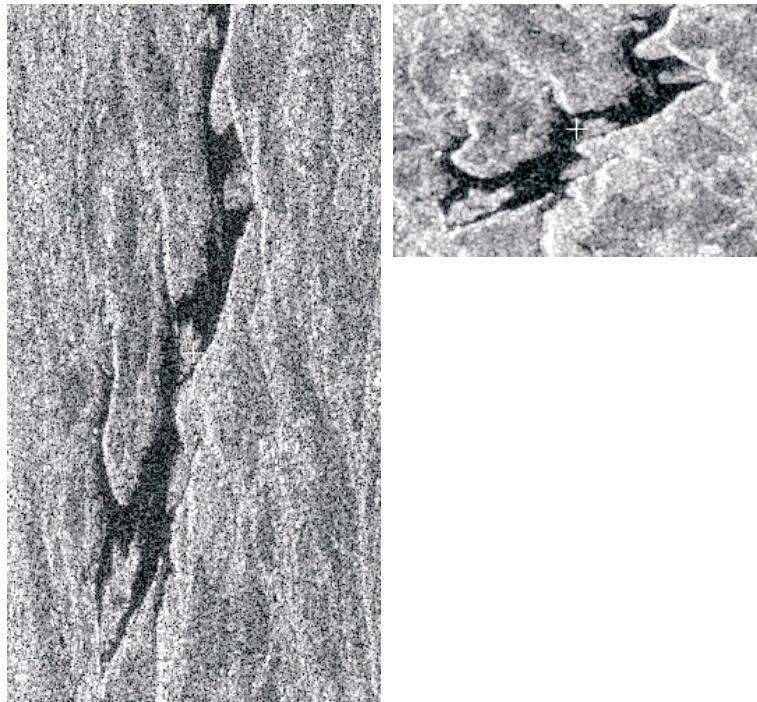


Abbildung 5.13: Speckle in 1-Look (ERS-SLC) und 3-Look (ERS-PRI) SAR-Bildern.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden adaptive Filtertechniken eingesetzt, um das Speckle-Rauschen in den, zur Analyse der Rückstreuoeffizienten vorgesehenen, PRI-Daten zu verringern. Zur Verfügung standen in PCI Easi/Pace neben den nicht adaptiven Mittelwert- und Medianfiltern sechs, auf die Verringerung von Speckle spezialisierte, adaptive Filter: Verschiedene Versionen von Frost- (FROST et al. 1982[107], LOPES et al. 1990[188]) und Lee-Filtern (LEE 1981[180], LOPES et al. 1990[188]), ein Kuan-Filter (KUAN et al. 1987[164]) und ein GammaMAP-Filter (LOPES et al. 1993[187]). Unter adaptiven Filtern werden solche verstanden, die Mittelwert und Streuung innerhalb des Beobachtungsfensters sowie bandstatistische Parameter bei der Berechnung der neuen Pixelwerte berücksichtigen. Sie sind besser zur Erhaltung von Kanten und Einzelobjekten geeignet als die nicht-adaptiven Filter.

Vergleichende Arbeiten zu Leistung und Einsatzbereichen der verschiedenen Standard-Specklefilter kommen zu dem Ergebnis, daß die Fragestellung und das Datenmaterial den jeweils optimalen Filter bestimmen (LEE et al. 1994[181], GAGNON & JOUAN 1997[112]). Dementsprechend wurden im Rahmen der Vorverarbeitung alle zur Verfügung stehenden adaptiven Filter in den Größen 3·3, 5·5 und 7·7 auf einem Ausschnitt der Gesamtszene angewendet und die Ergebnisse visuell, unter Zuhilfenahme der Grauwertstatistiken, interpretiert. Im Hinblick auf die spätere Klassifikation lieferte der GammaMAP-Filter für die Mehrzahl der PRI-Szenen die erfolversprechendsten Ergebnisse. Er wurde daher, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, in der Größe 5·5 auf alle PRI-Datensätze angewendet.

Der in PCI implementierte GammaMAP-Filter basiert auf den Arbeiten von LOPES et al. (1993[187], 1990[188]). Die Filterung basiert auf der Annahme gamma-verteilter Grauwerte. Zunächst werden zwei

globale Schwellenwerte c_a und c_b unter Berücksichtigung der Anzahl prozessierter Looks (N_{looks}) nach folgenden Formeln berechnet:

$$c_a = \frac{1}{\sqrt{N_{looks}}} \quad \text{und} \quad c_b = \sqrt{2} \cdot c_a \quad (5.11)$$

Bei der Filterung werden für jedes Beobachtungsfenster der lokale Mittelwert μ und die Varianz σ^2 berechnet. Aus diesen entsteht ein, die lokale Gauwertstatistik beschreibender Wert c_{lokal} :

$$c_{lokal} = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{\mu} \quad (5.12)$$

Der neue Wert für das Zentralpixel des Beobachtungsfensters P_{neu} wird folgendermaßen bestimmt:

$$\begin{aligned} \text{für } c_{lokal} \leq c_a & : P_{neu} = \mu \\ \text{für } c_a < c_{lokal} < c_b & : P_{neu} = \frac{B \cdot \mu + \sqrt{C}}{2 \cdot A} \\ \text{für } c_{lokal} \geq c_b & : P_{neu} = P_{alt} \end{aligned} \quad (5.13)$$

mit:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1 + c_a^2}{c_{lokal}^2 - c_a^2} \\ B &= A - N_{looks} - 1 \\ C &= \mu^2 \cdot B^2 + 4 \cdot A \cdot N_{looks} \cdot \mu \cdot P_{alt} \end{aligned} \quad (5.14)$$

wobei:

P_{alt} : Wert des Zentralpixels vor der Filterung.

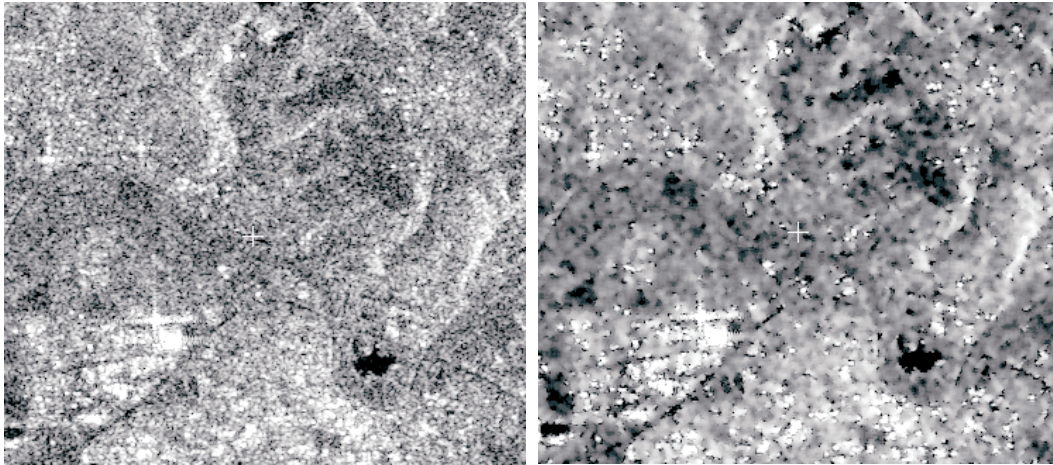


Abbildung 5.14: Speckle-Reduktion mit einem 5-5 GammaMAP-Filter.

Die Wirkung dieser Filterung visualisiert Abbildung 5.14. Im linken Rahmen sind die 16bit Integer-Werte der PRI-Daten dargestellt, das rechte Fenster zeigt das Filterergebnis. Der Ausschnitt zeigt ein ca. 5,5 km² großes Gebiet nördlich von Hennef bei Bonn. Klar erkennbar sind der Allner See als schwarze Fläche im südöstlichen Quadranten des Bilds und die horizontal darüber verlaufende dunkle, lineare Struktur der A 560. Der Ortskern von Hennef ist an dem erhöhten Grauwertniveau südlich des Allner Sees erkennbar, starke Punktstreuer charakterisieren ebenfalls das nordwestlich der A 560-Anschlußstelle Hennef-West gelegene Gewerbegebiet. Das Filterergebnis zeigt eine wesentlich homogenere Grauwertcharakteristik, starke Punktstreuer und Bildelemente mit extrem geringer Rückstreuung bleiben durch das Filterverfahren unverändert erhalten. Allerdings ist auch eine, durch die Filterung hervorgerufene, Erosion linearer Strukturen erkennbar, beispielsweise bei der, den Allner See südlich umfließenden Sieg und bei zwei im PRI-Datensatz erkennbaren, auf Wällen verlaufenden Straßen im zentralen westlichen Teil des Ausschnitts.

5.3.1.2 Berechnung des Radarrückstreukoeffizienten σ^0

Um quantitative Vergleiche des Rückstreuungsverhaltens abgebildeter Objekte zu ermöglichen, wird aus den PRI-Daten der Radarrückstreukoeffizient σ^0 berechnet (vgl. Kap. 2.4.2.1). Hierbei werden Einflüsse des lokalen, geoid-bezogenen Einfallswinkels, sowie weitere radiometrische Fehlerquellen eliminiert. Der Radarrückstreukoeffizient σ^0 stellt einen Flächenmittelwert der Rückstreuquerschnitte aller beleuchteten Einzelobjekte innerhalb einer Auflösungszelle dar. Die in den folgenden Formeln enthaltenen Winkelbeziehungen verdeutlicht Abbildung 5.15.

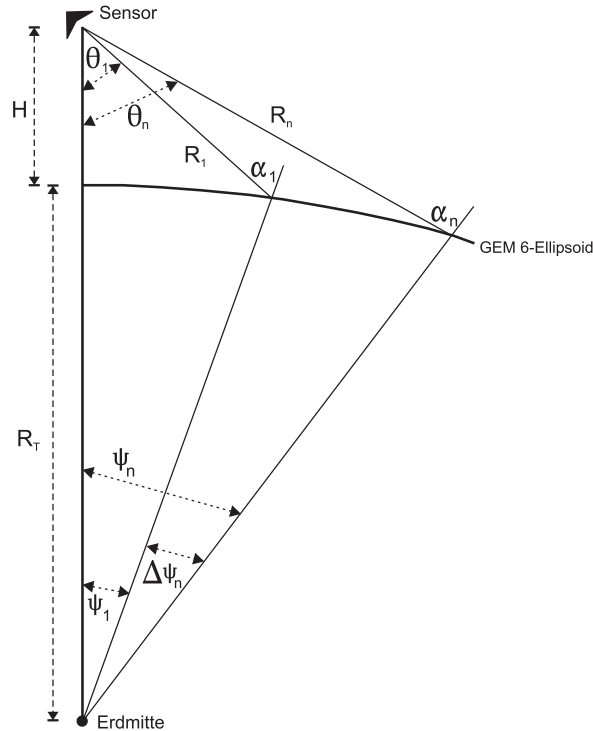


Abbildung 5.15: Winkelbeziehungen zur Berechnung von σ^0 .

Für den absoluten Wert eines Pixels DN im PRI-Datensatz gilt folgender Zusammenhang zum Radarrückstrequerschnitt β^0 (vgl. LAUR et al. 1997[175]):

$$DN^2 = Konst \cdot \beta^0 = Konst \cdot \frac{\sigma^0}{\sin \alpha_i} = Konst(\alpha) \cdot \sigma^0 \quad (5.15)$$

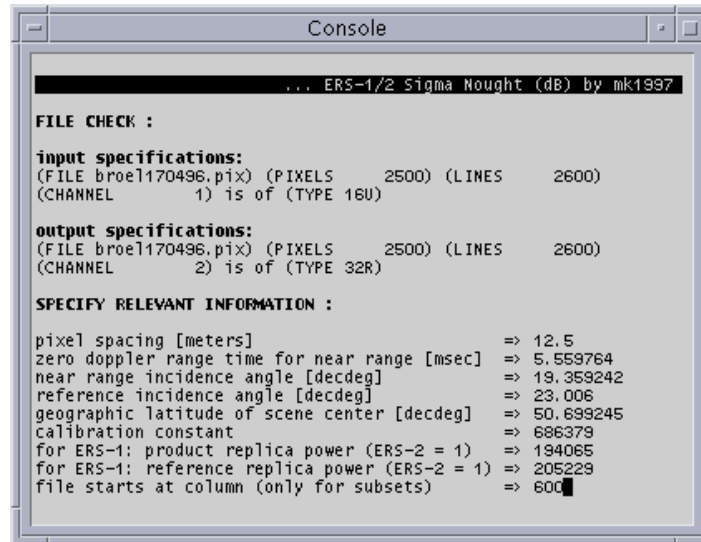
$Konst(\alpha)$ hängt vom lokalen Einfallswinkel α_i ab und kann wie folgt beschrieben werden:

$$Konst(\alpha) = C_K \cdot \frac{\sin \alpha_{ref}}{\sin \alpha_i} \quad (5.16)$$

mit:

- C_K : Kalibrierungskonstante,
- α_{ref} : Referenzeinfallswinkel.

Basierend auf den in LAUR et al. (1997[175]) vorgestellten Algorithmen wurde ein Programm zur σ^0 -Berechnung geschrieben, daß neben dem lokalen Einfallswinkel auch die prozessierungsabhängige Kalibrierungskonstante C_K und Variationen der Pulse Replica Power mit berücksichtigt, sowie die ausschnittsweise Bearbeitung von PRI-Szenen ermöglicht. Im folgenden soll dessen Arbeitsweise kurz beschrieben werden.



```

... ERS-1/2 Sigma Nought (dB) by mk1997

FILE CHECK :

input specifications:
(FILE broel170496.pix) (PIXELS 2500) (LINES 2600)
(CHANNEL 1) is of (TYPE 16U)

output specifications:
(FILE broel170496.pix) (PIXELS 2500) (LINES 2600)
(CHANNEL 2) is of (TYPE 32R)

SPECIFY RELEVANT INFORMATION :

pixel spacing [meters] => 12.5
zero doppler range time for near range [msec] => 5.559764
near range incidence angle [decdeg] => 19.359242
reference incidence angle [decdeg] => 23.006
geographic latitude of scene center [decdeg] => 50.699245
calibration constant => 686379
for ERS-1: product replica power (ERS-2 = 1) => 194065
for ERS-1: reference replica power (ERS-2 = 1) => 205229
file starts at column (only for subsets) => 600

```

Abbildung 5.16: Eingabemaske der EASI-Prozedur zur Berechnung von σ^0 .

Die Prozedur wurde mit der PCI Easi/Pace-Skriptsprache EASI (Engineering Analysis and Scientific Interface) programmiert und ist innerhalb der EASI-Konsolenumgebung lauffähig. Abbildung 5.16 zeigt die Eingabemaske des Programms.

Bei der Berechnung des lokalen Einfallswinkels für eine beliebige Spalte wird ein ebenes Terrain vorausgesetzt. Der lokale Einfallswinkel α_i hängt somit nur vom gewählten Ellipsoid ab, im konkreten Fall dem ERS-Referenzellipsoid Goddard Earth Model 6 (GEM6). Die Berechnung von σ^0 basiert auf folgenden Eingangsdaten, die aus den Headerinformationen der ERS-Daten extrahiert werden können:

- Zero doppler range time t_1 zur ersten Near Range-Spalte,
- Einfallswinkel α_1 in der ersten Near Range-Spalte,
- Referenzeinfallswinkel α_{ref} ,
- Geographische Breite λ der Szenenmitte,
- Pixelgröße in Range-Richtung,
- Kalibrierungskonstante,
- Product Replica Power,
- Reference Replica Power.

Unter dem Einfallswinkel wird hier der Winkel zwischen Oberflächensenkrechte im jeweiligen Bildpunkt und einfallendem Strahl verstanden, der Beobachtungswinkel spannt sich zwischen der Satellit/Oberfläche-Senkrechten und dem ausgehenden Radarstrahl auf (vgl. Abb. 5.15).

Zur Berechnung des Einfallswinkels α_i in einer beliebigen Spalte des Datensatzes werden zunächst Basisdaten berechnet. Der lokale Erdradius R_L beträgt:

$$R_L = a \cdot \frac{\sqrt{\cos^2 \lambda + \left(\frac{b}{a}\right)^4 \cdot \sin^2 \lambda}}{\sqrt{\cos^2 \lambda + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \cdot \sin^2 \lambda}} \quad (5.17)$$

mit

- a : Äquatorialradius der Erde (GEM6: 6378.144 km),
- b : Polarradius (GEM6: 6356.759 km).

Tabelle 5.28: Einfluß der σ^0 -Berechnung auf die Grauwertstatistik

ERS PRI vom 17.04.1996	16 bit-Werte	σ^0 [dB]
Median	305	-9.29
Mittelwert	336.36	-9.23
Standardabweichung	167.97	3.65
Minimum	30	-29.44
Maximum	30924	30.89
Pixelzahl	6500000	6500000

Für die lokale Satellitenhöhe H_L gilt:

$$R_L + H_L = \sqrt{R_L^2 + R_1^2 + 2 \cdot R_L \cdot R_1 \cdot \cos \alpha_1} \quad (5.18)$$

mit

$$\begin{aligned} R_1 &: \text{Slant Range-Distanz zum ersten Range-Pixel: } R_1 = \frac{c \cdot t_1}{2}, \\ c &: \text{Lichtgeschwindigkeit.} \end{aligned}$$

Der Beobachtungswinkel θ_1 zum ersten Range-Pixel ergibt sich aus:

$$\cos \theta_1 = \frac{(R_1 + R_L \cdot \cos \alpha_1)}{R_L + H_L} \quad (5.19)$$

Für den Winkel zwischen der Satellitensenkrechten und der Senkrechten im ersten Range-Pixel ψ_1 gilt: $\psi_1 = \alpha_1 - \theta_1$, da $\pi = \psi_1 + \theta_1 + (\pi - \alpha_1)$.

Nach diesem Rechenschritt sind die Grundlagen für die Bestimmung des Einfallswinkels α_i vorhanden. Der Winkel ψ_i eines Pixels in Spalte i kann unter bestimmten Voraussetzungen (vgl. LAUR et al. 1997[175]) mit

$$\psi_i = \psi_1 + \frac{(i-1) \cdot \Delta r}{R_T} \quad (5.20)$$

bestimmt werden. Δr ist die Pixelausdehnung in Range-Richtung. Damit ergibt sich für die Slant Range-Distanz R_i zwischen Sensor und einem Pixel der Spalte i :

$$R_i = \sqrt{R_L^2 + (R_L + H_L)^2 - 2 \cdot R_L \cdot (R_L + H_L) \cos \psi_i} \quad (5.21)$$

Nun kann der Winkel α_i in einer beliebigen Spalte bestimmt werden:

$$\cos \alpha_i = \frac{(R_L + H_L)^2 - R_i^2 - R_L^2}{2 \cdot R_i \cdot R_L} \quad (5.22)$$

Nachdem die Variablen der Bildgeometrie bestimmt sind, ist mit Kenntnis der Kalibrierungskonstante C_K , der Product Replica Power P_{PR} und der Reference Replica Power P_{RR} , sowie dem Referenzeinfallswinkel α_{ref} die Berechnung von σ_{ij}^0 nach folgender Formel möglich:

$$\sigma_{ij}^0 = DN_{ij}^2 \cdot \frac{1}{C_K} \cdot \frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_{ref}} \cdot \frac{P_{PR}}{P_{RR}} \quad (5.23)$$

mit

$$\begin{aligned} DN_{ij} &: \text{Wert im PRI-Datensatz am Punkt } ij, \\ \sigma_{ij}^0 &: \text{Radarrückstreuoeffizient in Punkt } ij. \end{aligned}$$

Hierbei findet, im Gegensatz zu dem in LAUR et al. (1997[175]) beschriebenen Verfahren, keine räumliche Intensitätsmittelung statt, da diese bereits durch die Anwendung des GammaMAP-Filters erfolgte.

Da σ^0 in der Regel in Dezibel angegeben wird, erfolgt abschließend mit:

$$\sigma_{(dB)}^0 = 10 \cdot \log_{10} \sigma^0 \quad (5.24)$$

eine Transformation in die logarithmische Skala.

Tabelle 5.28 vergleicht einige grundlegende statistische Parameter eines Ausschnitts der specklereduzierten PRI-Szene vom 17.04.1996 mit der aus dieser berechneten σ^0 -Datei. Die σ^0 -Werte bewegen sich in einem für Landoberflächen typischen Bereich, der Mittelwert des Ausschnitts beträgt -9.23 dB bei einer Standardabweichung von 3.65 dB.

Abbildung 5.17 zeigt beispielhaft die Grauwertverteilungen vor und nach der σ^0 -Berechnung. Deren Einfluß auf die Radiometrie der Szene ist deutlich am Wechsel von einer linksschiefen zu einer symmetrischen, sich der Normalverteilung annähernden, Kurve zu erkennen.

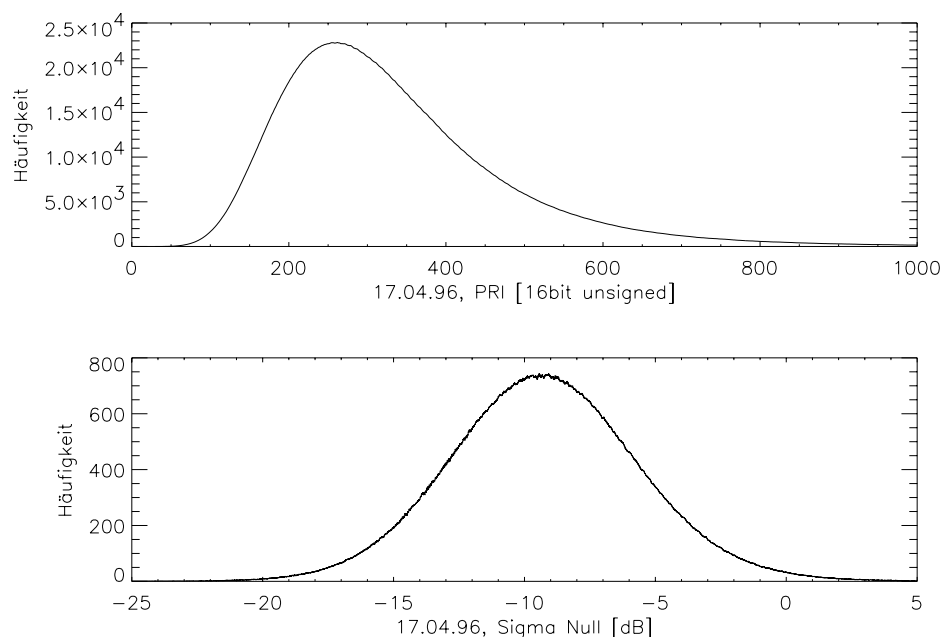


Abbildung 5.17: Effekt der σ^0 -Berechnung auf die Grauwertverteilung.

5.3.1.3 Geometrische Korrektur

In Kapitel 2.4.2.2 wurde bereits die, im Vergleich zu Senkrechtaufnahmen komplizierte Geometrie von Seitensicht-SAR-Szenen beschrieben. Die damit verbundenen Foreshortening-, Layover- und Shadow-Effekte machen eine angemessene Georeferenzierung mit Polynomialtransformationen auf Grundlage von Paßpunkten unmöglich. Vielmehr ist die Integration des Reliefs zwingende Voraussetzung für eine erfolgreiche Georeferenzierung. Das Softwarepaket PCI-Easi/Pace stellt im Radarsoft-Modul ein Verfahren zur Verfügung, das auf Arbeiten von B. Guindon und M. Adair vom Canada Centre for Remote Sensing (CCRS) basiert. Die Arbeitsweise ist ausführlich in GUINDON & ADAIR (1992[128]) beschrieben und soll an dieser Stelle zusammenfassend vorgestellt werden.

Die Methodik umfaßt die Arbeitsschritte:

1. Berechnung eines simulierten SAR-Bilds in Ground Range Geometrie,
2. Paßpunkterfassung zwischen PRI-Szene und simuliertem SAR-Bild,

3. Terrängeokodierung des PRI-Datensatzes unter Beteiligung von DGM, simuliertem SAR-Bild und der Paßpunktdatei.

Als Eingabedaten für die Berechnung eines simulierten SAR-Bilds sind ein Digitales Geländemodell in der gewünschten Projektion, sowie sensorspezifische Informationen zu Flugrichtung des Satelliten gegen Nord, Flughöhe, dem Minimum Look-Winkel und der geographischen Lage eines Referenzpunkts in Near Range erforderlich. Die Berechnung erfolgt in zwei Teilschritten, zunächst wird auf Grundlage der sensorspezifischen Zusatzinformationen eine Geometrische Transformation des DGMs zur Ground Range Geometrie der realen SAR-Szene erstellt. Im zweiten Schritt wird ein Reflexionsmodell angewendet und für jedes Bildelement im zu simulierenden SAR-Bild eine potentielle Rückstreuintensität berechnet. Diese wird von dem Grad der Hangverkürzung in Range Richtung gesteuert, der aus dem DGM für die gewünschte, simulierte Bildgeometrie abgeleitet werden kann. Im Ergebnis liegt ein simuliertes SAR-Bild in der Ground Range-Geometrie der entsprechenden realen Szene vor, die als Grauwertinformation den Anteil reliefinduzierter Rückstreuintensität enthält. In reliefiertem Gelände dominiert der topographische Effekt visuell die Rückstreuintensität, so daß simuliertes und reales Bild einander aufgrund charakteristischer Foreshortening-, Layover- und Shadow-Bereiche gleichen (zu Algorithmen und Ablauf der Berechnung vgl. GUINDON & ADAIR 1992[128]).

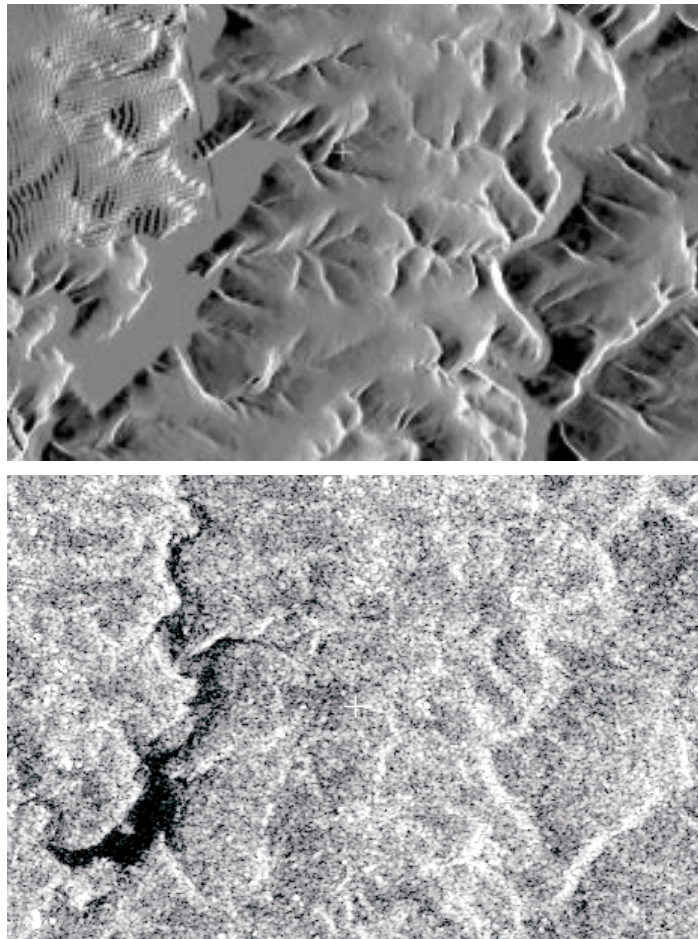


Abbildung 5.18: Simuliertes und reales SAR-Bild.

Abbildung 5.18 stellt einem ERS-2 SAR PRI-Szenenausschnitt vom 18.04.1996 (unterer Rahmen) ein auf Grundlage des Höhenmodells und der Orbitdaten der realen SAR-Szene generiertes, simuliertes SAR-Bild gegenüber. Im linken Teil der Rahmen ist die Wahnbachtalsperre östlich von Bonn zu erkennen. Die Szene vom 18.04. wurde in einem Decending-Orbit aufgenommen, wodurch sich vor allem ostexponierte Hänge durch foreshortening-bedingte Überstrahlung herausarbeiten. Erkennbar ist dies besonders in den steilen Hangbereichen am Westrand der Wahnbachtalsperre, sowie bei den, das Bröltal westlich begrenzenden Hängen (von Süd- nach Nord verlaufende Überstrahlungsbereiche im rechten Teil der Rahmen). Auch das durchschnittlich niedrigere Grauwertniveau auf den westexponierten Hängen ist zu erkennen. Die schlechtere

Qualität der Simulation im nordwestlich der Wahnbachtalsperre gelegenen Teil der Ausschnitte ist Folge unterschiedlicher Auflösungen des Höhenmodells. Im Bereich des Bröleinzugsgebiets standen DGM 5-Daten zur Verfügung, westlich davon DGM 25-Daten (vgl. Kap. 4.4).

Nachdem das simulierte SAR-Bild vorliegt, können im Bild zu Bild-Verfahren Paßpunkte zwischen simulierter und realer PRI-Szene gesucht werden. Je stärker reliefiert das Gelände, desto stärker sind die Reliefeinflüsse auf die Radiometrie der Szene und entsprechend einfacher gestaltet sich die Sammlung von Paßpunkten. Für den Ausschnitt des Bröleinzugsgebiets wurden jeweils zwischen 20 und 35 gleichmäßig verteilte Paßpunkte pro PRI-Szene bestimmt.

Die Terrainkorrektur erfolgt schließlich mit einem automatischen Verfahren, das folgende Eingabedaten benötigt:

- Zu korrigierende PRI-Szene,
- Höhenmodell in der gewünschten Projektion,
- Simuliertes SAR-Bild und die zugehörige
- Paßpunktdatei.

Die Arbeitsweise der Prozedur wird detailliert in GUINDON & ADAIR (1992[128]) beschrieben.

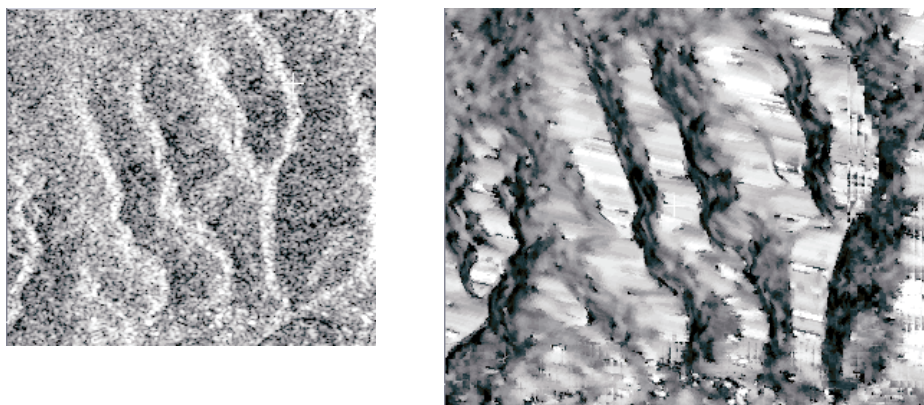


Abbildung 5.19: Geometrische Effekte der Terrainkorrektur.

Abbildung 5.19 zeigt die Wirkung der Terrainkorrektur am Beispiel eines Ausschnitts am Südrand des Bröleinzugsgebiets nordwestlich von Dattenfeld. Hier haben sich steile Täler in nord-südlicher Richtung vom Hochflächenniveau in etwa 370 m Höhe üNN bis auf das Niveau der Siegaue (ca. 110 m NN) auf einer Länge von etwa 3 km eingeschnitten. Die steilen, ostexponierten Talränder sind in der PRI-Szene (linker Rahmen) durch starke Hangverkürzungs-Effekte charakterisiert. Diese erfahren durch die Terrainkorrektur (rechter Rahmen) eine erhebliche Spreizung, die vom Sensor abgeneigten Hänge werden durch die Korrektur gestaucht. Der radiometrische Reliefeinfluß bleibt unverändert erhalten und macht die inhaltliche Analyse der Rückstreuintensitäten in den überstrahlten, bzw. abgeschatteten Bereichen nahezu unmöglich.

Da die PCI-Prozedur keine Fließkommawerte verarbeiten kann, wurden die σ_{dB}^0 -Werte vor der Referenzierung in einen 16 bit Wertebereich umgerechnet und nach erfolgter Geokorrektur zurücktransformiert.

5.3.2 Vorverarbeitung der SLC-Daten

Die Vorverarbeitung der SLC-Daten diente der Berechnung von interferometrischen Kohärenzbildern für verschiedene Tandempaare und einer geometrischen Transformation in das terrainegeokodierte Bezugssystem der PRI-Daten, um bei den sich anschließenden Landoberflächenklassifikationen die Kohärenz- und Rückstreuintensitätsinformation zu nutzen. Die Arbeiten zur Kohärenzbestimmung wurden mit dem INSAR-Paket unter PCI Easi/Pace6.1 durchgeführt.

5.3.2.1 Erstellung von interferometrischen Kohärenzbildern

Vor einer Kohärenzbestimmung müssen die komplexen SLC-Datensätze der zu verarbeitenden Szenenpaare subpixelgenau überlagert werden. Für eine folgende Kohärenzberechnung ist die Qualität der Anpassung von entscheidender Bedeutung. Der Arbeitsablauf ist umfangreich und soll im folgenden nur im Überblick vorgestellt werden. Einen detaillierten Einblick in das Verfahren gibt Anhang B in tabellarischer Form, am Beispiel der Verarbeitung der ERS-1/2 Tandempartner vom 20. und 21.09.1995.

Zunächst werden die Orbits der beiden Aufnahmen auf Grundlage folgender Parameter mit Polynomialtransformationen 3. Grades synchronisiert:

- Geographische Koordinaten der Szeneneckpunkte aus den Header-Dateien,
- Slant Range-Pixelausdehnung, Ground Range-Pixelausdehnung, Azimuth-Pixelausdehnung,
- Senkrecht- und Parallelkomponente der Basislinie,
- Doppler-Mitten-Frequenzen,
- Ellipsoidparameter,
- Sensorspezifische Parameter (Wellenlänge, Pulswiederholfrequenz usw.).

Die Synchronisation und anschließende Berechnung der Referenz-Phase sind notwendiger Bestandteil der späteren Feinanpassung.

Im nächsten Arbeitsschritt wird in einem halbautomatischen Korrelationsverfahren der Grobversatz der Partner berechnet. Um realistische Werte zu erhalten, war es notwendig, aus den komplexen SLC-Daten Intensitätsbilder zu berechnen und in diesen einen Ausschnitt zur Korrelationsanalyse auszuwählen, der ein klar erkennbares Objekt enthält. In der konkreten Anwendung wurde bei allen prozessierten Tandempartnern die Wahnbachtalsperre genutzt. Ergibt sich ein realistischer XY-Offset-Wert, werden beide Szenen durch einen entsprechenden Integer-Shift übereinandergelagert.

Anschließend erfolgt die Feinanpassung der Datensätze. Hierzu werden in einem automatischen Verfahren unabhängige Beobachtungsfenster (Chips) gleichmäßig über das Bild verteilt (vgl. hierzu z.B. auch GEUDTNER 1995[119]). Für die Feinanpassung des Tandempaars 09/95 wurden beispielsweise 121 Chips ausgewiesen. Jeder Chip erhält einen Kontrollpunkt, für den die Lagequalität bewertet wird (vgl. Tabelle „SEGMENT DATA“ unter „REGPA“ und „CORREL“ im Anhang B). Bei zufriedenstellender Genauigkeit, kann die Feinanpassung unter Berücksichtigung der Orbit- und Referenzphaseninformation durchgeführt werden.

Nach der Feinanpassung kann die Kohärenz nach Gleichung 2.6 aus Abschnitt 2.4.2.3 bestimmt werden. Kritisch ist hierbei die Größe des räumlichen Mittelungsfensters. Sie entscheidet über die Qualität der Kohärenzabschätzung. SCHWÄBISCH (1997[260]) empfiehlt eine Mittelung unter Nutzung von mindestens 30–40 unabhängigen Interferogrammwerten. Bei allen prozessierten Tandempartnern wurde ein Mittelungsfenster von 4·20 Pixeln gewählt. Die nicht-quadratische Fenstergröße trägt der Slant Range-Pixelausdehnung Rechnung und erzeugt in Ground Range-Darstellung eine annähernd quadratische Mittelungsfläche von ca. 80·80 m².

Abbildung 5.20 stellt beispielhaft einer PRI-Szene (linker Rahmen) ein Kohärenzbild (rechter Rahmen) gegenüber. Auch in der verkleinerten Darstellung werden der unterschiedliche Charakter und Informationsgehalt deutlich. In beiden Aufnahmen ist das Kreuz des Flughafens Köln-Bonn erkennbar, das sich durch niedrige Rückstreuintensität und hohe Kohärenz auszeichnet. Der Rhein ist besonders deutlich im südwestlichen Teil des Kohärenzbilds, mit den für Gewässer typischen, niedrigen Kohärenzwerten, zu erkennen. Das Kohärenzbild zeigt außerdem eine sehr gute Trennung von Wald (dunkel) und Nicht-Wald-Gebieten, im PRI-Datensatz ist demgegenüber die Trennung von Wald und Siedlungsbereichen wesentlich problematischer. Typisch für Kohärenzbilder ist die Abwesenheit von sichtbaren Terraineffekten und Speckle-Erscheinungen, da keine Intensitätsinformation enthalten ist. Im nordöstlichen Quadranten des Intensitätsbilds ist demgegenüber deutlich der radiometrische Relieffekt des, die Kölner Bucht östlich begrenzenden, Berglands erkennbar.

Insgesamt wurden aus acht SLC-Datensätzen (vgl. Tab. 4.3) Kohärenz- und Intensitätsbilder berechnet.

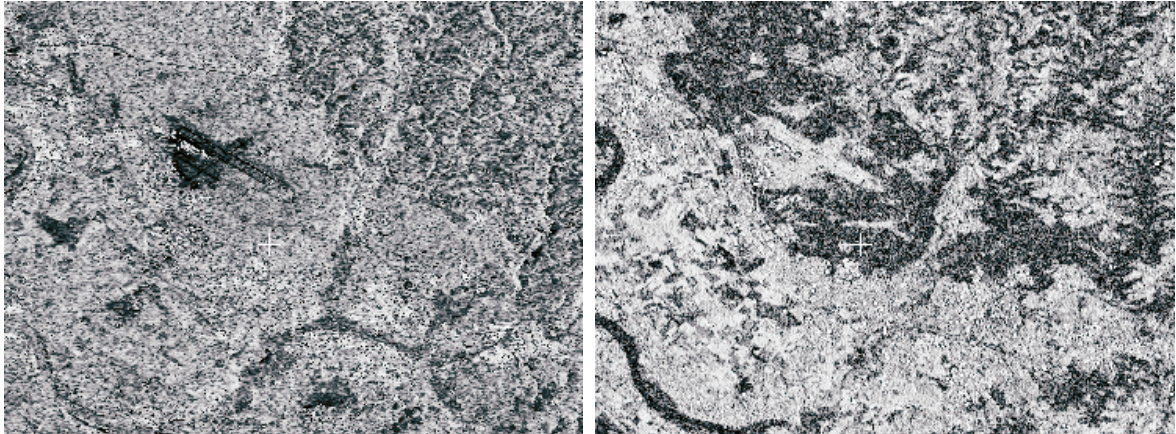


Abbildung 5.20: ERS SAR PRI-Szene und Kohärenzbild.

5.3.2.2 Geometrische Referenzierung

Ergebnis der im vorigen Abschnitt beschriebenen Arbeitsschritte sind Kohärenz- und 1-Look-Intensitätsbilder in Slant Range-Geometrie. Im Rahmen der geometrischen Referenzierung wurden die Datensätze zunächst in den Ground Range umgerechnet und anschließend unter Einbeziehung der DGM-Information teraingeokodiert.

Zur Umrechnung in Ground Range sind lediglich Informationen zu Flughöhe des Sensors, Laufzeit Sensor–Near Range und die Slant Range Pixelausdehnungen erforderlich. Als Resamplingverfahren wurde die Nearest Neighbor-Methode gewählt. Bei der Umrechnung wurde jeweils um den Faktor drei gemittelt, um bei der Ergebnisdatei die Pixelgröße in etwa an die Auflösung anzupassen.

Die geometrische Referenzierung der Ground Range-Datensätze erfolgte anschließend unter Einbeziehung des Höhenmodells, analog zur Referenzierung der PRI-Daten (vgl. Kap. 5.3.1.3).

Tabelle 5.29: Landnutzung im Bearbeitungsausschnitt aus der TM-Klassifikation

Nutzung	[%]	[km ²]
bbng1	0.32	0.22
bbng2	7.16	4.83
agr	4.24	2.86
bod	4.80	3.24
grlnd	53.87	36.32
wald1	20.09	13.55
wald2	9.19	6.19
wass	0.00	0.00

5.3.3 Erfassung der Landnutzung mit dem ERS SAR

Bei der Auswertung der SAR-Daten standen methodische Fragestellungen im Vordergrund (vgl. Kap. 3). Es war zu klären, ob sich die Daten zur Erfassung von Landnutzungsstrukturen in einem reliefierten Terrain eignen, welche Genauigkeiten und Klassenaufösungen ggf. erreichbar sind und inwieweit zu diesem Zweck Standardfunktionalitäten zur Verfügung stehender Bildverarbeitungspakete ausreichen. Desweiteren sollte der Beitrag der interferometrischen Kohärenzinformation zur Landnutzungserkennung untersucht werden. Zur Bearbeitung dieser Fragestellungen wurde ein etwa 12.6 km² großer Ausschnitt im nördlichen Teil des Bröleinzugsgebiets gewählt. Abbildung 5.21 zeigt die Lage des Untersuchungsgebiets, sowie der projektierten Klimastation (vgl. Kap. 4.5.2), die im Zeitraum der Tandemüberflüge in 5-Minuten-Auflösung

Tabelle 5.30: Rückstreuintensitäten im Bearbeitungsausschnitt

σ^0 [dB]	Mittelw.	Std.abw.	Min.	Max.
20.09.95	-9.97	2.76	-27.12	16.54
30.11.95	-8.74	2.59	-25.99	15.83
14.03.96	-7.98	2.76	-26.56	17.26
18.04.96	-8.79	2.54	-28.40	15.43

aufzeichnete. Die gute Referenzdatenlage, sowie die, aus verschiedenen Vorgängerprojekten resultierende, detaillierte Kenntnis des Raums, waren für die Auswahl der Region maßgeblich. Desweiteren umfaßt der Ausschnitt einen E-SAR Flugstreifen vom 20.06.96. Die Auswertung der Daten dieses flugzeuggetragenen Sensors spielt im Rahmen dieser Arbeit allerdings keine Rolle (vgl. hierzu HOCHSCHILD & KLENKE 1998[140]).

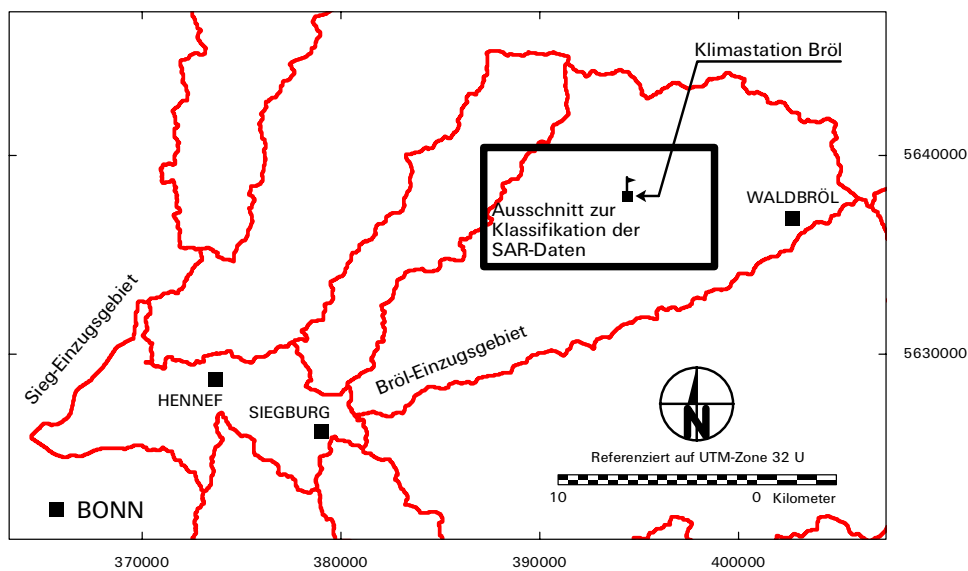


Abbildung 5.21: Bearbeitungsausschnitt im nördlichen Teil des Bröleinzugsgebiets.

Tabelle 5.29 zeigt die Landnutzungsverteilung am 05.08.1992 aus der Landsat TM-Klassifikation. Grünlandwirtschaft dominiert mit über 50 %, weitere 30 % werden von Waldflächen eingenommen, die sich im Verhältnis 1 zu 2 auf Nadel, bzw. Laub- und Mischwaldflächen verteilen. Die verbleibenden 20 % teilen sich Siedlungs-, bzw. Agrar- und bodenbeeinflusste Flächen zu etwa gleichen Teilen. Eine DGM-Analyse ergab eine durchschnittliche Höhe des Ausschnitts von 234.56 m bei einer Standardabweichung von 36.71 m. Die Hangneigung bewegt sich auf 41 % der Fläche zwischen 5° und 10°. Weitere 14 % sind stärker geneigt.

5.3.3.1 Interpretation multitemporaler Intensitätskomposite

Nach der Geokorrektur der PRI-Daten wurden Multitemporalkomposite der Intensitätsdatensätze erzeugt und diese zunächst unter Berücksichtigung der Klimadaten visuell interpretiert, um sich dem inhaltlichen Informationsgehalt der Daten zu nähern. Tabelle 5.30 faßt die durchschnittliche Rückstreucharakteristik über die vier Tandem-Überflugzeitschnitte anhand jeweils eines Tandempartners zusammen. Die Mittelwerte und Standardabweichungen bewegen sich in einem ähnlichen Größenordnungsbereich, das höchste durchschnittliche Rückstreuniveau ist am 14.03.96 gegeben, demgegenüber erreicht die durchschnittliche Rückstreuung im Bearbeitungsausschnitt am 20.09.95 lediglich -9.97 dB.

Tabelle 5.31: Korrelationen (r) der Rückstreuintensitätsdatensätze

r	30.11.95	14.03.96	18.04.96
20.09.95	0.50	0.40	0.49
30.11.95	1.00	0.59	0.48
14.03.96	*	1.00	0.50

Die Datensätze korrelieren untereinander nur gering, Tabelle 5.31 weist für die möglichen Datenpaare Korrelationen zwischen 0.4 und 0.6 aus. Die Werte sind vor dem Hintergrund der bereits in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Beschränkungen von r zu sehen.

Für eine zuverlässige Interpretation der Rückstreuwerte ist die Kenntnis der klimatischen Faktoren vor und während der Überflüge erforderlich. Dies gilt sowohl für die, die Rückstreuung direkt beeinflussenden Parameter (z.B. die Bodenfeuchtigkeit), als auch für Rahmenparameter, welche die phänologische Entwicklung über den gesamten Untersuchungszeitraum steuern. Abbildung 5.22 zeigt Tagesmittel-, Minimal- und Maximaltemperaturen an der projekteigenen Klimastation Bröl. Die Tagesmittel wurden aus 24 Stundenwerten berechnet. Die Überflugtermine sind durch senkrechte Linien gekennzeichnet. Zwischen Ende Dezember und Anfang Januar kam es zu einem Ausfall der Meßeinrichtung.

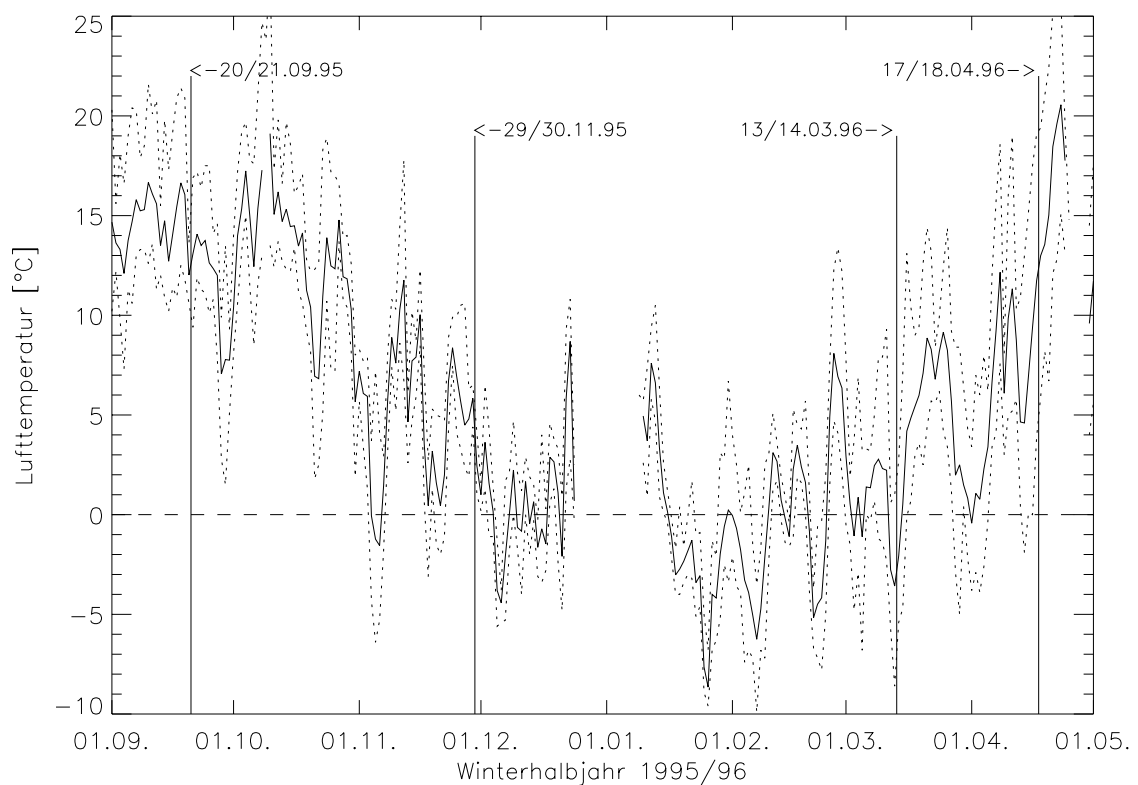


Abbildung 5.22: Tagesmittel, -minima und -maxima der Lufttemperatur an der Meßstation Bröl.

Über das Winterhalbjahr ist ein für die Region typischer Temperaturverlauf erkennbar. Zwischen Ende September und Ende November nehmen die Tagesmittel bei starken kurzfristigen Schwankungen kontinuierlich ab. Zu ersten Frösten kommt es Anfang November, wo in einer kurzen Kälteperiode sogar die Tagesmittel unter den Gefrierpunkt sinken. In der Zeit zwischen dem zweiten und dritten Tandemüberflug schwanken die Tagesmittel um den Gefrierpunkt, ausgesprochene Kälteperioden fallen in die letzten Januar- und ersten Februarwochen. Vor dem dritten Tandemüberflug pendeln sich die Mittel wieder um die Null-Grad-Grenze ein, es kommt aber weiterhin zu starken Nachtfrösten. Anfang März werden bereits Tageshöchstwerte von

13°C erreicht. Zwischen drittem und viertem Tandemüberflug steigen die Temperaturwerte, unterbrochen von einem Kälteeinbruch um den Monatswechsel zum April, stark an. Vor den Aprilüberflügen werden bereits Tageshöchstwerte von knapp 20°C erreicht, bis Mitte April kommt es vereinzelt noch zu Nachtfrösten.

Abbildung 5.23 visualisiert die Lufttemperaturen in Stundenaufösung in einem Zeitraum von jeweils sechs Tagen vor den Überflügen. In der Septemberwoche bewegen sich die Temperaturen zunächst in einem ausgeprägten diurnalen Rythmus zwischen 10° und 20°C, der sich an den Überflugtagen etwas abschwächt. Zu den Überflugzeiten um 10:27 GMT liegen die Temperaturen bei ca. 11° (ERS-1), bzw. 14°C (ERS-2). Die Novemberwoche zeigt ein ähnliches Muster auf niedrigerem Temperaturniveau. Die Werte schwanken zwischen 2° und 11°C. Zwischen den Überflügen sinkt die Temperatur relativ gleichmäßig von 6° auf 2°C. Die Märzwoche liegt im absoluten Temperaturniveau am niedrigsten, die Werte bewegen sich zwischen -9° und 9°C, an jedem der Beobachtungstage kommt es, dem Tagesrythmus folgend, zu mindestens einem Null-Grad-Durchgang. Während der Überflüge liegt die Temperatur bei 0°, bzw. 2°C. Die Kurve der Aprilwoche steigt mit ausgeprägtem diurnalen Rythmus kontinuierlich an. Eingangs fallen die nächtlichen Tiefsttemperaturen noch unter den Gefrierpunkt, steigen dann aber bis auf 10°C zwischen den Überflügen an. Die Tageshöchstwerte erreichen bereits knapp 20°C. Zu den Aufnahmezeitpunkten liegt die Temperatur bei ca. 15°C.

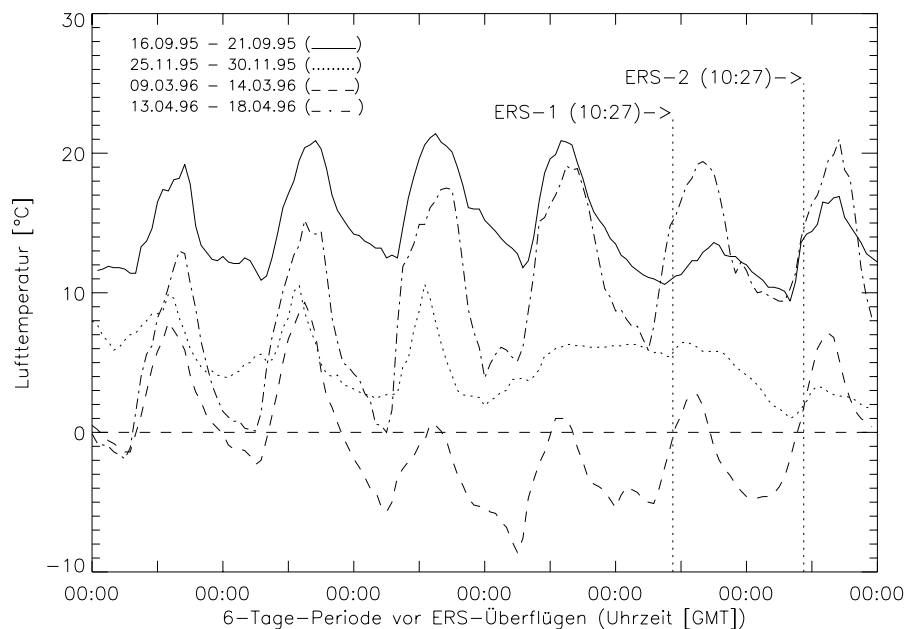


Abbildung 5.23: Lufttemperatur in den Zeiträumen vor ERS-Aufnahmen.

Die in Abbildung 5.24 dargestellten Bodentemperaturen in 2 cm Tiefe folgen den beschriebenen Lufttemperaturkurven in gedämpfter Form. Bei den Überflügen in der Märzwoche liegen die Bodentemperaturen nahe am Gefrierpunkt, zu den Aufnahmezeiten ist allerdings, aufgrund der durchschnittlich hohen Rückstreuung, nicht mit einer flächenhaften Verbreitung von Bodenfrost im Untersuchungsgebiet zu rechnen. Nach Arbeiten von WEGMÜLLER et al. (1995[297]) reduziert sich σ^0 auf von gefrorenem Boden betroffenen Flächen um bis zu 3 dB. Die stärksten täglichen Amplituden finden sich, analog zur Lufttemperatur, in der Aprilwoche, mit absoluten Schwankungen zwischen 5° und 17°C und bei im Lauf der Woche ansteigendem Temperaturniveau.

Die Niederschläge in den Zeiträumen vor und während der Überflüge waren gering, alle Aufnahmetage blieben trocken. In der Sechs-Tagessumme vor den Überflügen fielen in der Novemberwoche 2.2 mm. Die Niederschläge an den sechs Tagen vor den übrigen Terminen blieben in der Summe unter 0.5 mm. Insofern kann für die Aufnahmen von ähnlichen oberflächlichen Bodenfeuchteverhältnissen ausgegangen werden.

Der mittlere Rahmen in Abbildung A.6 (Anhang A) zeigt ein multitemporales Komposit der Rückstreuung am 18.04.96 (Rot), 14.03.96 (Grün) und 20.09.95 (Blau) im Bearbeitungsausschnitt. Die Wald-

und Siedlungsflächen erscheinen in violetten Farbtönen, die Siedlungen sind von den Waldgebieten lediglich durch die Existenz starker Punktstreuer zu unterscheiden, die durch das adaptive Speckle-Filterverfahren nicht eliminiert wurden. Eine Häufung dieser Punktstreuer findet sich in der nordöstlichen Ecke des Untersuchungsgebiets (Stadt Nümbrecht) und im nordwestlichen Quadranten (Marienfeld). Im äußersten Nordwesten des Ausschnitts ist der südöstliche Stadtrand von Much erkennbar. Die Grünland- und Ackerbaubereiche bewegen sich in der Darstellung in einem Farbspektrum von türkis über grün nach gelblich bis rot.

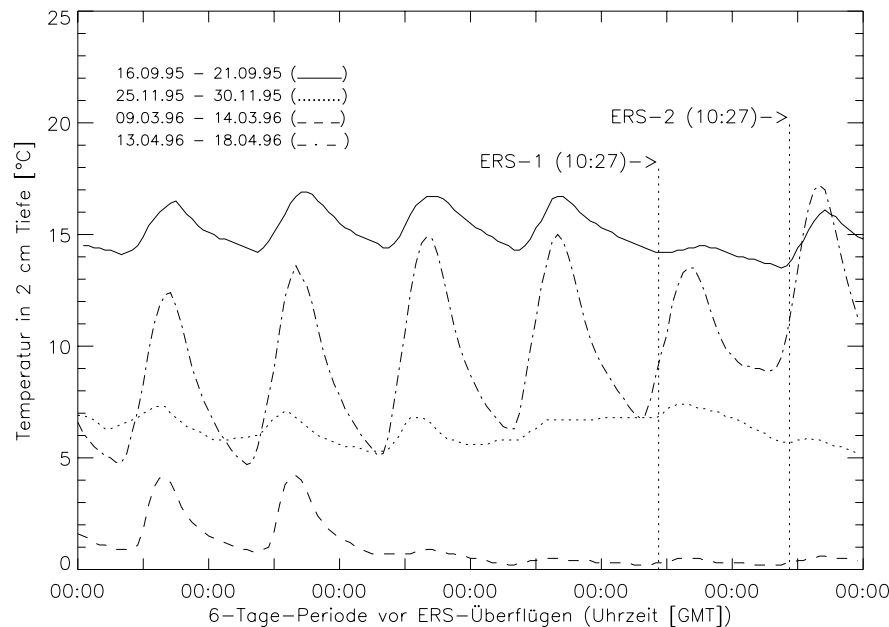


Abbildung 5.24: Bodentemperatur in den Zeiträumen vor ERS-Aufnahmen.

Vergleicht man das Komposit mit dem im oberen Rahmen der Abbildung dargestellten, auf Grundlage des DGMs simulierten, SAR-Bild (vgl. Kap. 5.3.1.3), wird der starke Einfluß des Reliefs auf die Radiometrie der Szene deutlich. Die Überstrahlungs- und Schattenmuster zeichnen sich klar erkennbar im Komposit durch und machen ein automatisches Klassifikationsverfahren ohne Berücksichtigung des Reliefeinflusses wenig erfolgversprechend. Eine detaillierte Grauwertanalyse ergab, daß die reliefinduzierten Grauwertvariationen innerhalb der verschiedenen Klassen zum Teil größer als die nutzungsinduzierten Rückstreuungsunterschiede zwischen den verschiedenen Klassen sind. Besonders deutlich wird dies bei den Acker- und Grünlandnutzungen, bei denen die Volumenstreuung, im Vergleich zu den Waldgebieten, im Untersuchungszeitraum nur eine geringe Rolle spielt. Auf den westexponierten Hängen im Zentrum des Ausschnitts liegt beispielsweise das Grauwertniveau der Grünlandbereiche deutlich niedriger als auf den weiter westlich gelegenen, ostexponierten Hängen. In abgeschwächter Form ist der Reliefeinfluß auch in den Waldgebieten zu erkennen.

Abbildung 5.25 zeigt das Rückstreuverhalten unterschiedlicher Nutzungen zu den vier Zeitschnitten der Tandemüberflüge. Grundlage bilden die Rückstremittelwerte aus kleineren Untersuchungszellen, deren Nutzung aus Geländebegehungen, Luftbildinterpretation und TM-Klassifikation bekannt sind. Für diese erste, nutzungsspezifische Annäherung an das Rückstreuverhalten wurden zunächst Flächen mit ähnlichen lokalen Einfallswinkelkonfigurationen ausgesucht, um die dominanten nutzungsinduzierten multitemporalen Intensitätsvariationen nicht durch den Terraineffekt zu überdecken. Die Klassenauswahl spiegelt bereits den Wissensstand nach den visuellen Interpretationen wider und umfaßt nur noch Klassen, deren Trennung im weiteren Verlauf der Arbeiten möglich erscheint. Beispielsweise wurden bekannte Wintergetreideflächen bereits in diesem Stadium der Untersuchung aus der Betrachtung ausgeschlossen, da sich die Rückstreucharakteristik dieser Flächen über den Winter nicht wesentlich von der von Grünlandflächen in bestimmten Wuchsstadien unterscheidet. Prozentual haben diese Flächen desweiteren nur eine geringe Bedeutung. Problematisch erscheint die Trennung von Wald- und Siedlungsflächen (*bbng*). Diese bewegen sich über alle Aufnahmezeitpunkte auf einem konstanten, einheitlichen Niveau um -9 dB. Größere Unterschiede beste-

hen lediglich in den September- und Aprilszenen, wo die Rückstreuintensität in den Waldgebieten leicht über der in den Siedlungsbereichen liegt. Zu berücksichtigen ist in diesem Zusammenhang, daß etwa zwei Drittel der Waldflächen von Laub- und Mischwald eingenommen werden (vgl. Tab. 5.29). Dies führt zu dem, im Vergleich zu den Grünlandflächen verhältnismäßig niedrigen Grauwertniveau. In belaubtem und vitalen Zustand ist durch die stärkere Volumenstreuung mit einer höheren Rückstreuintensität zu rechnen. Die Wald/Siedlungstrennung wird weiterhin durch die Tatsache erschwert, daß im Untersuchungsgebiet vor allem ländliche, locker bebaute und gestreute Siedlungen mit hohem Vegetationsanteil vorherrschen. Bei der Interpretation der Rückstreuintensitäten aller Nutzungen ist schließlich der in den Daten enthaltene radiometrische Reliefeffekt zu berücksichtigen, der zum inhaltlichen Informationsgehalt eine schwer zu quantifizierende Unschärfe addiert.

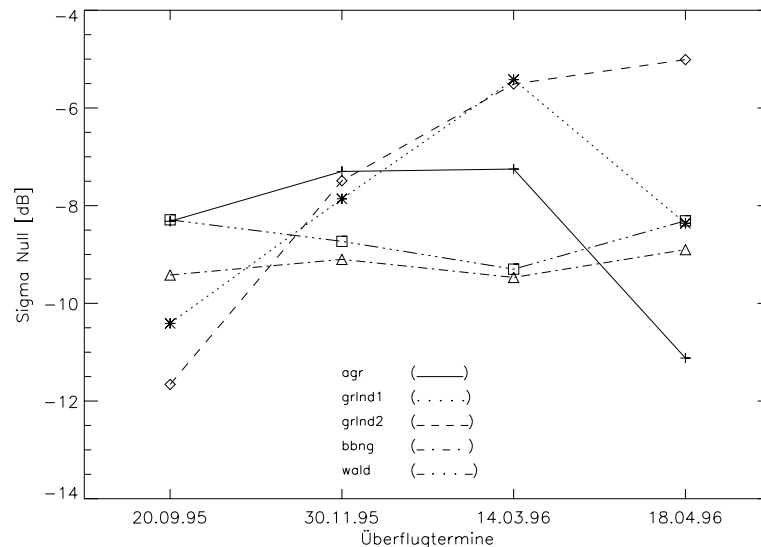


Abbildung 5.25: Nutzungsspezifisches, multitemporales Rückstreuverhalten.

Die Grünlandflächen (*grlnd1*, *grlnd2*) zeigen zwischen September und März einen kontinuierlichen Anstieg der Rückstreuintensität, der sich aus dem allmählichen Wachstum der Pflanzen ergibt, nachdem die Flächen im September das letzte Mal geschnitten wurden. Zu Unterschieden in der Rückstreuintensität kommt es zwischen März- und Aprilaufnahme. Bei den *grlnd1*-Flächen handelt es sich um intensiv genutzte Flächen, die in klimatischen Gunstregionen liegen und kurz vor den Aprilüberflügen bereits zum ersten Mal geschnitten wurden. Dementsprechend sinkt die Rückstreuintensität zwischen März- und Aprilaufnahme signifikant ab. Die *grlnd2*-Flächen vereinigen weniger intensiv genutzte Grünlandbereiche, die neben der Wiesennutzung häufig auch als Standweiden oder in kombinierter Weide/Wiesennutzung gehalten werden. Auf diesen Flächen steigt die durchschnittliche Rückstreuintensität zwischen März- und Aprilaufnahme leicht an, da die Pflanzen weiter im Wuchs bleiben. Die *grlnd2*-Flächen liegen eher siedlungsnah, die Mähwiesen (*grlnd1*) befinden sich vornehmlich in der Peripherie der Hofgebiete.

Die *agr*-Flächen tragen eine Zwischenfrucht, häufig Luzernearten, Feldgras oder Klee, die im Untersuchungsgebiet als Teil der Fruchtfolge vor allem auf Flächen gepflanzt wird, die über den Sommer mit Mais bestanden waren. Nach der, gewöhnlich in den September fallenden Maisernte werden die Flächen umgepflügt und anschließend die Zwischenfrucht eingesät. Die Pflanzen sterben bei strenger Winterkälte ab, bleiben aber bis ins Frühjahr stehen und werden dann untergepflügt. Das Unterpflügen fällt in den Zeitraum zwischen dem dritten und vierten Tandemüberflug und ist an der Abnahme der Rückstreuintensität zwischen beiden Terminen erkennbar.

Tabelle 5.32 beschreibt die Standardabweichungen der nutzungsspezifischen Signaturen zu den vier Überflugterminen. Auffällig sind die durchgängig hohen Werte der Siedlungsbereiche, die aus der Flächenheterogenität und Mischung von Vegetation und Überbauung in locker bebauten Bereichen resultieren. Fördernd wirkt weiterhin die Existenz starker Punktstreuer durch Corner-Reflexion, spezifische Oberflächenmaterialien u.ä., die sich durch die adaptive Speckle-Reduktion erhalten haben. Die Waldgebiete zeigen zu allen

Tabelle 5.32: Standardabweichungen der nutzungsspezifischen Signaturen in den ERS PRI-Datensätzen

[dB]	20.09.95	30.11.95	14.03.96	18.04.96
agr	2.23	2.16	2.29	2.08
grlnd1	2.29	2.06	1.87	2.26
grlnd2	2.58	2.22	2.07	2.79
bbng	3.54	2.86	2.85	2.89
wald	1.97	1.71	1.64	1.61

Terminen die geringsten Streuungswerte der Nutzungstypen. Das Streuungsmaximum fällt in die Septembereaufnahme, danach nimmt die Streuungsbreite über den Winter mit abnehmender Intensität ab. Das Muster folgt der herbstlichen Entlaubung in den Laub- und Mischwaldgebieten. Die Streuungsbreiten der Grünlandflächen folgen einem ähnlichen Muster, sie nehmen über die ersten drei Termine ab und steigen in der Aprilaufnahme wieder an. Insgesamt liegt das Streuungsniveau der *grlnd2*-Flächen etwas höher.

5.3.3.2 Hauptkomponententransformation zur Isolierung des radiometrischen Reliefeffekts

Im vorigen Abschnitt wurde bereits auf den starken Einfluß des Reliefs auf die Radiometrie der Szene hingewiesen. Abbildung A.8 in Anhang A zeigt im oberen Rahmen das Ergebnis einer unüberwachten ISODATA-Klassifikation der vier Intensitätsdatensätze mit der Vorgabe fünf Klassen zu extrahieren. Bei einem Konvergenzkriterium von 0.95 waren acht Iterationen notwendig. Vergleicht man das Klassifikationsergebnis mit dem simulierten SAR-Bild in Abbildung A.6 wird deutlich, daß der Reliefeffekt die inhaltliche Informationskomponente nahezu vollständig dominiert. Die entstehenden Klassen spiegeln in erster Linie die Grauwertmuster in der, auf Grundlage des Reliefs simulierten, SAR-Szene wider. Für eine Klassifikation der Landnutzung war daher eine Reduzierung des Reliefeinflusses zwingend erforderlich.

In Abschnitt 2.4.2.2 wurde bereits auf die verschiedenen Ansätze zur radiometrischen Reliefkorrektur von SAR-Daten und die damit verbundenen Probleme eingegangen. Eine Vernachlässigung des Reliefeinflusses kam aus o.g. Gründen nicht in Frage. Die Anwendung physikalischer Reflexionsmodelle schied als weitere Möglichkeit aus, da die Nutzung derartiger Modelle in ihrer einfachsten Form (z.B. Kosinusansätze auf Grundlage des lokalen Einfallswinkels, vgl. hierzu z.B. BAYER 1990[17]) in heterogenen Landschaften wenig erfolgversprechend erscheint und sich kompliziertere, stärker physikalisch basierte und nutzungs-/bedeckungssensitive Reflexionsmodelle derzeit im methodischen Forschungsstadium befinden und für operationelle Anwendungen bislang nicht zur Verfügung stehen.

HENEERY (1997[134]) untersucht die Wirkung von Hauptkomponententransformationen (PCTs, PCAs; vgl. Kap. 2.2.7) auf einen, zwölf Szenen einer Vegetationsperiode enthaltenden, ERS-1-Datensatz. Obwohl es sich bei der Hauptkomponentenanalyse um eine Standardmethodik handelt, die Bestandteil der gängigen Bildverarbeitungsprogramme ist, fand sie bislang vor allem bei der Analyse optischer Fernerkundungsdaten Verwendung. HENEERY (1997[134]) stellt in seinem Bericht fest, daß die extrahierten Komponenten auch zur inhaltlichen Interpretation von SAR-Daten interessante Aspekte beisteuern können. Unter anderem weist er auf die Reduktion des Speckle-Effekts und die Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses in den höherwertigen Komponenten hin und unterstreicht die Fähigkeit der Hauptkomponentenanalyse, die übergeordneten Rückstreuvariabilitätsmuster einer Landschaft in Raum und Zeit abzubilden. Vor allem die Tatsache, daß die erste, einen Großteil der Gesamtvarianz des Datensatzes erklärende, Hauptkomponente einen Streuungsanteil repräsentiert, der auf alle Szenen einen konstant dominanten Einfluß ausübt, macht sie auch für die radiometrische Korrektur in reliefierten Gebieten interessant. In der vorliegenden Arbeit wurde daher der Versuch unternommen, den Reliefeinfluß mit Hilfe von Hauptkomponentenanalysen zu reduzieren.

Aus den vier Intensitätsdatensätzen wurden zunächst vier Hauptkomponenten (PCs, Principal Components) abgeleitet. Abbildung 5.26 zeigt den Gesamtvarianzanteil der von den einzelnen Hauptkomponenten „erklärt“ wird in logarithmischer Darstellung. Die erste Komponente repräsentiert knapp 62% der Gesamtstreuung, die nachgeordneten Komponenten erklären noch 16.5%, 12.2% und 9.5% der Streuung des Ausgangsdatsatzes.

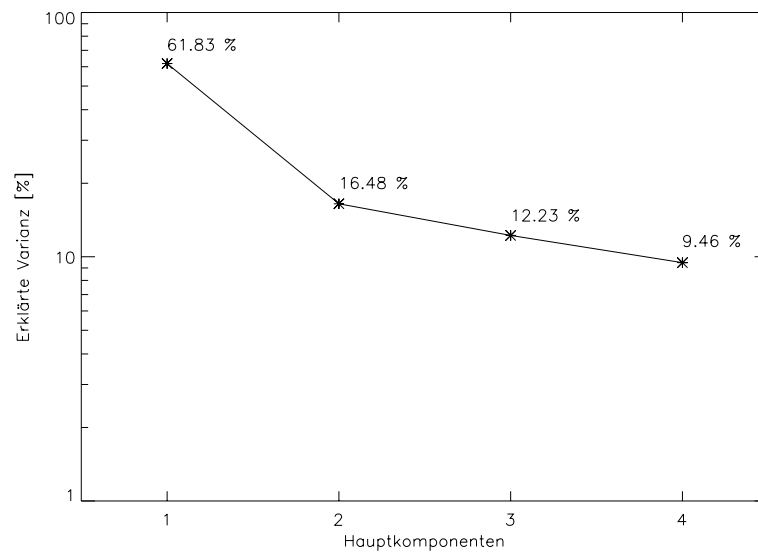


Abbildung 5.26: Anteil erklärter Varianz der Hauptkomponenten.

Abbildung 5.27 beschreibt die Hauptkomponentenladungen zu den vier Überflugterminen. Die erste Hauptkomponente repräsentiert die stabilen Bildelemente und lädt dementsprechend auf alle Ausgangskanäle gleich hoch mit etwa 0.5. Die übrigen Komponenten zeigen über die vier Termine eine variierende Ladungsverteilung. PC 2 lädt stark auf den September- und Märzüberflug, die dritte Komponente auf den Aprilüberflug. Bei PC 4 ist die Ladungsverteilung weniger eindeutig, sie korreliert auf hohem Niveau mit dem Novemberdatensatz und auf niedrigerem Niveau recht einheitlich mit den übrigen Terminen.

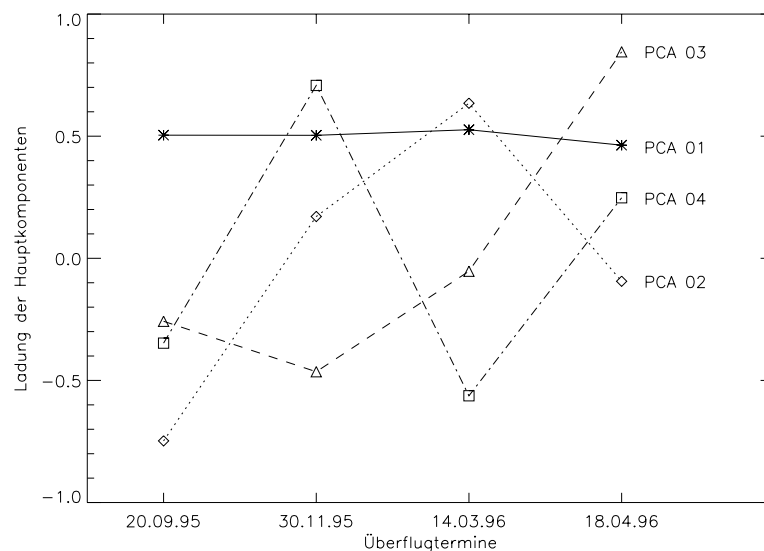


Abbildung 5.27: Ladungen der Hauptkomponenten.

Der untere Rahmen der Abbildung A.6 in Anhang A enthält eine Grauwertdarstellung der ersten Hauptkomponente. Auffällig ist die Rauschmut und Kongruenz zu dem im oberen Abbildungsrahmen dargestellten, simulierten SAR-Bild. Demgegenüber sind die im Multitemporalkomposit (mittlerer Rahmen) erkennbaren unterschiedlichen Flächennutzungen in der ersten Hauptkomponente nicht sichtbar repräsentiert. Neben den Überstrahlungs- und Abschattungsmustern, enthält die Darstellung der ersten Hauptkomponente weiterhin zahlreiche starke Punktstreuer, vornehmlich in den Siedlungsbereichen. Abbildung A.7 visualisiert

die drei nachgeordneten Hauptkomponenten. In der zweiten Hauptkomponente ist der Reliefeinfluß kaum noch erkennbar. Die Verteilung hoher Ladungen auf die Überflugtermine September und März führt zu einer deutlichen Trennung der dunklen Wald- und Siedlungsgebiete von den helleren Grünlandbereichen. Innerhalb der Grünlandflächen sind nutzungsspezifische Unterschiede erkennbar, allerdings zeichnet sich auch der Reliefeffekt an einigen Stellen in stark abgeschwächter Form durch. Die dritte Hauptkomponente lädt hoch positiv auf den Aprildatensatz. Zu diesem Termin dominante Rückstreuintensitätsmuster sind dementsprechend auch in der Hauptkomponente zu erkennen: Die dunklen Flächen repräsentieren die am 18.04. gering rückstreuenden *agr*-Flächen, die *grlnd2*-Bereiche mit hoher Rückstreuintensität im April haben hohe PC 3-Werte (vgl. Abb. 5.25). Die *wald*- und *grlnd1*-Flächen liegen kaum trennbar im mittleren Grauwertniveau und sind stark verrauscht. Die vierte Hauptkomponente lädt am stärksten auf den Novemberdatensatz, in dem die Intensitätsunterschiede zwischen den Nutzungstypen absolut gesehen am geringsten ausfallen. Rauschen dominiert die Grauwertdarstellung.

Die Konzentration des radiometrischen Reliefeffekts auf die erste Hauptkomponente belegt auch eine Korrelationsanalyse zwischen simuliertem SAR-Bild, PC 1 und PC 2. Der Korrelationskoeffizient r zwischen simuliertem SAR und erster Hauptkomponente beträgt 0.6, für PC 2 besteht mit 0.08 kein linearer Zusammenhang.

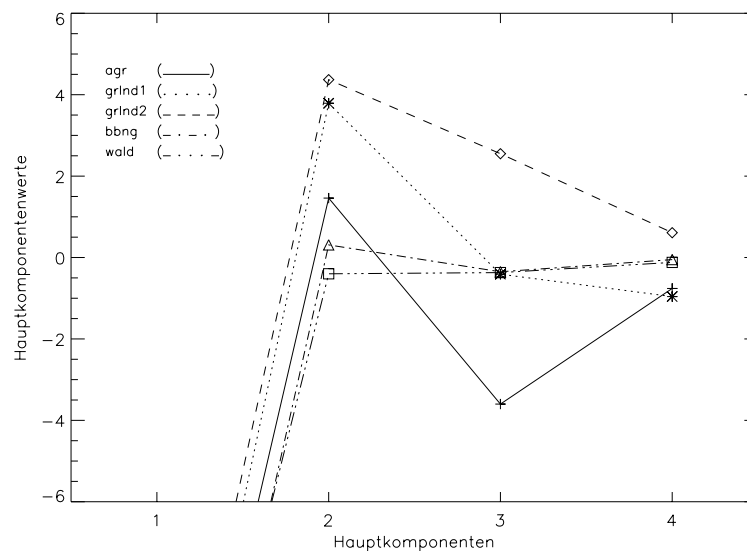


Abbildung 5.28: Nutzungsspezifische PC-Werte.

Abbildung 5.28 zeigt die nutzungsspezifischen Werte der Hauptkomponenten mit inhaltlicher Relevanz. PC 2 trennt die Grünlandnutzungen recht deutlich von den *bbng*- und *wald*-Flächen. Die *agr*-Nutzung liegt zwischen beiden Gruppen in einem mittleren Wertebereich. Unter Berücksichtigung der Standardabweichungen der Signaturen (Tab. 5.33) in den Hauptkomponenten ist festzustellen, dass die zweite Hauptkomponente eine relativ sichere Trennung von Grünland und den übrigen Klassen gewährleistet. Demgegenüber trennt PC 3 die *grlnd2*- und *agr*-Flächen. Die übrigen Nutzungen fallen zusammen, grenzen sich als Gruppe aber von *agr* und *grlnd2* ab. Die relativ hohen Standardabweichungen von *grlnd2* und *agr* erschweren deren Abgrenzung von der beschriebenen Mischklasse, die sich im mittleren Wertebereich bewegt. PC 4 liefert nur einen geringen Trennungsbeitrag, vom Niveau lassen sich drei Nutzungsgruppen unterscheiden: Im unteren Wertebereich *agr* und *grlnd1*, darüber *wald* und *bbng* und schließlich die *grlnd2*-Flächen im oberen Wertebereich. Unter Berücksichtigung der Hauptkomponenten 2, 3 und 4 erscheint somit eine Trennung der Nutzungen *grlnd1*, *grlnd2*, *agr* und *bbng/wald* erfolversprechend. Eine Verbesserung der Trennbarkeit von Siedlungs- und Waldflächen (vgl. Abb. 5.25) ist auch mit Hilfe der Hauptkomponententransformation nicht zu erreichen.

Abbildung A.8 in Anhang A vergleicht die Ergebnisse zweier unüberwachter ISODATA-Klassifikationen auf Grundlage identischer Vorgaben (Konvergenzkriterium 0.95, fünf zu extrahierende Klassen) mit unterschiedlichen Ausgangsdaten. Der obere Rahmen zeigt das, weiter oben bereits beschriebene Resultat auf Grundlage der Intensitätsdatensätze, das eindeutig vom Reliefeinfluß dominiert wird. Der untere Rah-

Tabelle 5.33: Standardabweichungen der nutzungsspezifischen Signaturen in den Hauptkomponenten

	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
agr	3.14	1.58	2.08	1.63
grlnd1	3.24	1.73	1.72	1.44
grlnd2	3.59	1.63	2.16	1.91
bbng	5.01	2.29	1.91	1.89
wald	2.68	1.37	1.36	1.22

men zeigt das Klassifikationsergebnis für einen Datensatz, der lediglich die Hauptkomponenten 2, 3 und 4 enthält. Auch hier wurde mit der Vorgabe fünf Klassen zu extrahieren klassifiziert, für die visuelle Darstellung wurden nachträglich zwei Klassen vereinigt, die zusammengenommen vor allem Wald- und Siedlungsflächen repräsentieren, einzeln aber nicht sinnvoll interpretierbar sind.

Auffälligster Unterschied der Ergebnisse ist die Abwesenheit eines sichtbaren Terraineffekts in der Hauptkomponentenklassifikation. Vergleicht man deren Ergebnis zunächst qualitativ mit dem Resultat der visuellen Interpretation der multitemporalen Datensätze und dem TM-Klassifikationsergebnis, ergeben sich durchaus sinnvolle Flächenverteilungen. Die vereinigte Wald/Siedlungsklasse wird flächenmäßig leicht überrepräsentiert, insgesamt ergibt sich aber bereits mit dem unüberwachten Verfahren ein realistisches Nutzungsbild.

5.3.3.3 Kohärenzanalysen

Im Rahmen der Vorverarbeitung wurden aus den SLC-Datensätzen vom 20/21.09.95, 29/30.11.95, 13/14.03.96 und 17/18.04.96 Kohärenzbilder berechnet. Einen vergleichenden Überblick über die grundlegende statistische Charakteristik der vier berechneten Kohärenzbilder gibt Tabelle 5.34. Sowohl der mittleren Szenenkohärenz, als auch der durchschnittlichen Standardabweichung nach, unterscheidet sich das auf Grundlage der Septemberaufnahmen berechnete Kohärenzbild von denen der drei nachfolgenden Aufnahmepaare. Während November-, März- und Aprilkohärenzbild bei ca. 0.5 auf einem einheitlichen mittleren Kohärenzniveau liegen, ist die durchschnittliche Kohärenz des Septemberdatensatzes wesentlich geringer. Auch die mittlere Abweichung fällt mit 0.15 bei dem September-Tandem Paar deutlich geringer aus. Die absoluten Spannweiten decken den theoretisch möglichen Wertebereich der Kohärenz von 0 (totale Dekorrelation) bis 1 zu ca. 90% ab.

Tabelle 5.34: Kohärenzen im Bearbeitungsausschnitt

Kohärenz	Mittelw.	Std.abw.	Min.	Max.
09.95	0.32	0.15	0.00	0.94
11.95	0.52	0.21	0.00	0.89
03.96	0.53	0.19	0.00	0.92
04.96	0.50	0.19	0.00	0.93

Die Häufigkeitsverteilungen der vier Kohärenzbilder zeigt Abbildung 5.29. Auch hier wird die Sonderstellung des Septemberdatensatzes deutlich, der als einziger eine nahezu symmetrische Form bei steilem Anstieg im unteren und einem flachen „auslaufen“ im oberen Wertebereich hat. Die Häufigkeitsverteilungen der übrigen Datensätze sind rechtsschief mit einem ausgeprägten, flachen Sattel im unteren Wertebereich und einem steilen, nahezu symmetrischen Dach im oberen Wertebereich. Ursache ist das grundsätzlich unterschiedliche Kohärenzverhalten von Waldgebieten und den restlichen Nutzungsformen. Die Waldgebiete zeichnen sich durch einen höheren Anteil an Volumenstreuung aus und sind anfällig für kurzfristige Geometrieänderungen im Sensitivitätsbereich des ERS-C-Bands. Ihre Kohärenz ist im untersuchten Zeitrahmen daher geringer, als die der Grünland-, Ackerbau- und Siedlungsflächen.

Visuell unterscheidet sich der Septemberdatensatz ebenfalls deutlich von den übrigen Kohärenzbildern. Er erscheint wesentlich stärker verrauscht und weniger flächenscharf. Tabelle 5.35 zeigt die Korrelationen

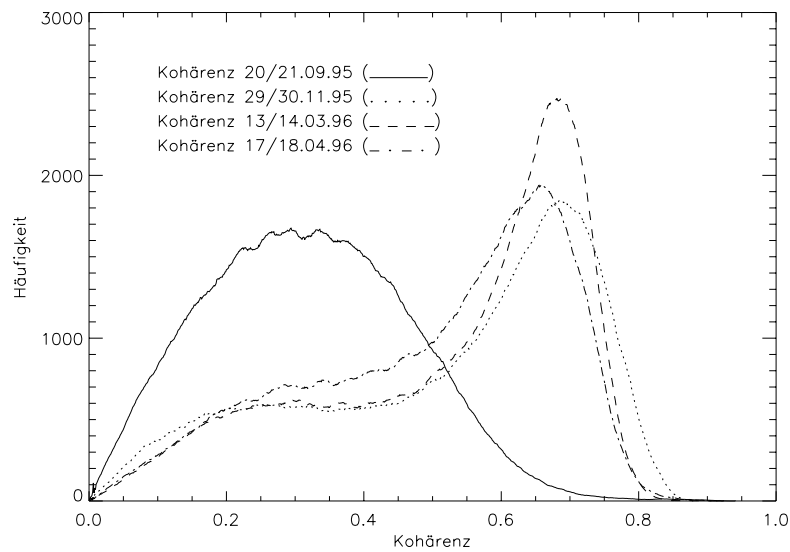


Abbildung 5.29: Kohärenzhistogramme.

der Kohärenzdatensätze. Der Septemberdatensatz korreliert mit den anderen Kohärenzbildern im Bereich $0.36 < r < 0.40$. Die November-, März- und Aprilbilder zeigen untereinander einen stärkeren Zusammenhang, r bewegt sich zwischen 0.73 und 0.79.

Tabelle 5.35: Korrelationen (r) der Kohärenzinformationen

r	29/30.11.95	13/14.03.96	17/18.04.96
20/21.09.95	0.37	0.36	0.40
29/30.11.95	1.00	0.79	0.73
13/14.03.96	*	1.00	0.75

Um die Ursache für das niedrigere Kohärenzniveau im Septemberbild zu ermitteln wurden zunächst die Aufzeichnungen der Klimastation Bröl herangezogen (vgl. Kap. 5.3.3.1). Allerdings unterscheiden sich die Änderungen der gemessenen Parameter zwischen den Aufnahmen am 20. und 21. September größenordnungsmäßig nicht von den Änderungen zwischen den anderen Tandempartnern. Abbildung 5.30 macht deutlich, daß auch die Windgeschwindigkeiten und deren Variationen im September nicht aus dem Rahmen fielen. Die Unterschiede der Windgeschwindigkeit zwischen ERS-1 und ERS-2 Aufnahme sind im März und April sogar größer als im September.

Eine Anfrage bei der, die Daten vertreibenden, ESA (European Space Agency) ergab, daß es bei der Aufzeichnung am 21.09.95 Probleme und Datenverlust gab, der u.a. dazu führte, daß von diesem Termin kein PRI-Datensatz prozessiert werden konnte (vgl. Tab. 4.3). Der Fehler ist offensichtlich auch im SLC-Datensatz vom 21.09.95 enthalten, wenngleich das, im Rahmen der Vorverarbeitung aus diesem Datensatz berechnete, Intensitätsbild visuell keine Besonderheiten aufweist. Von den weiteren Arbeiten wurde das Kohärenzbild des Tandempaars 20/21.09.95 daher ausgeschlossen.

Abbildung 5.31 zeigt das nutzungsspezifische Kohärenzverhalten zu den verbleibenden drei Tandemzeitschnitten. Die Linien dienen lediglich zur Erleichterung der visuellen Interpretierbarkeit und implizieren keine Entwicklung über das Winterhalbjahr. Diese kann aus den vorliegenden Daten nicht abgeleitet werden. Die Waldflächen liegen über alle Termine auf einem deutlich niedrigeren Kohärenzniveau als die übrigen Nutzungstypen. Im rechten Rahmen der Abbildung finden sich die zugehörigen Standardabweichungen. Sie bewegen sich um 0.1 und lassen somit eine weitere Trennung der Nicht-Wald-Klassen auf Grundlage der Kohärenzwerte wenig erfolgversprechend erscheinen.

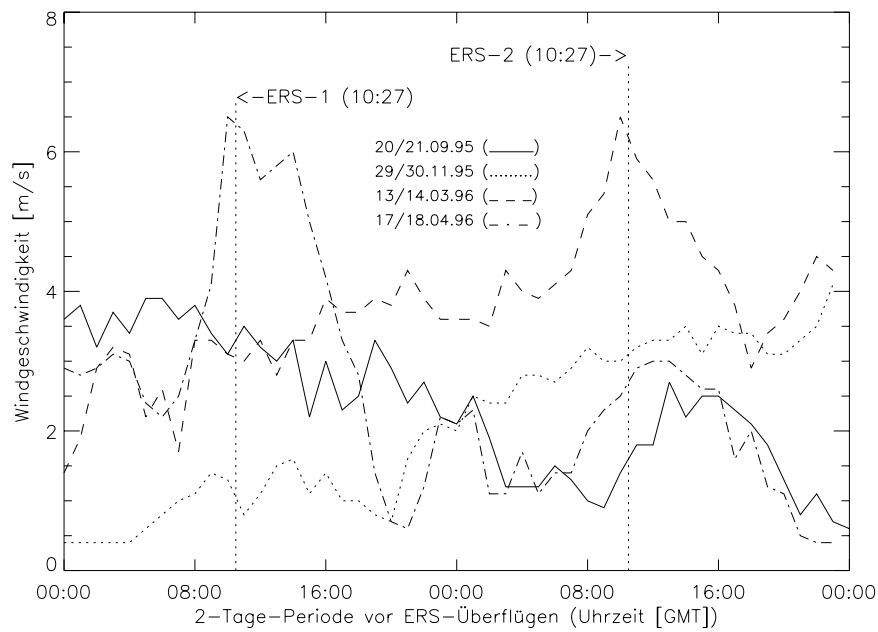


Abbildung 5.30: Windgeschwindigkeiten zu den ERS-Überflügen.

Der mittlere Rahmen der Abbildung A.9 (Anhang A) zeigt eine Grauwertdarstellung der Kohärenz des Novemberdatensatzes. Die dunklen Waldgebiete grenzen sich scharf von den helleren, übrigen Nutzungstypen ab. Die Qualität der Wald-Trennung unterstreicht Abbildung 5.32. Sie zeigt das Ergebnis einer 2-Klassen ISODATA-Klassifikation auf Grundlage des November-Kohärenzbilds. Die unüberwachte Klassifikation er-

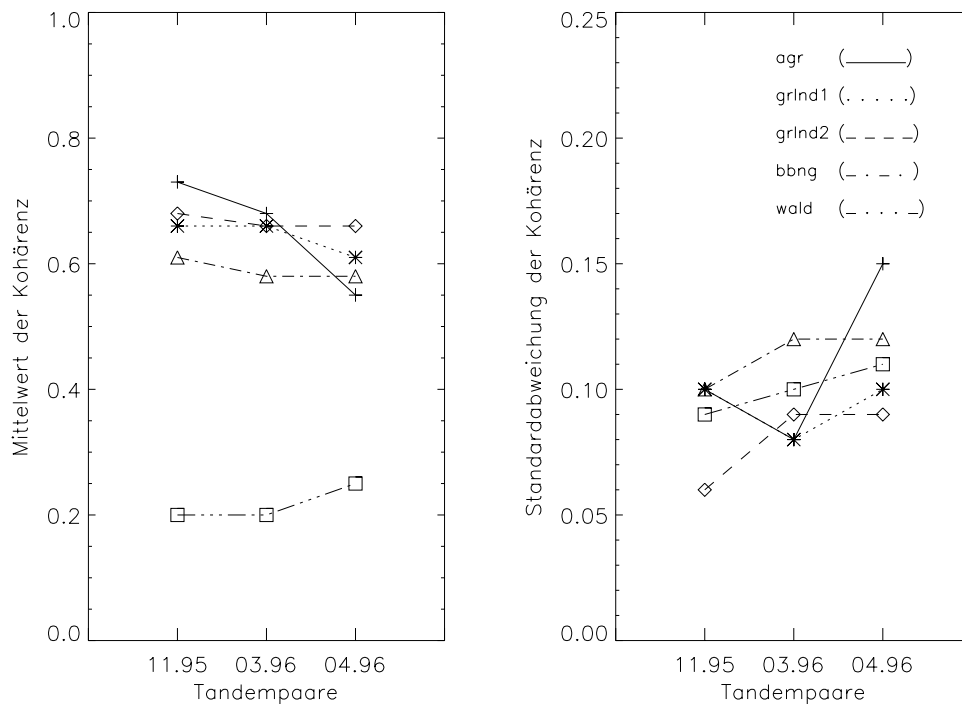


Abbildung 5.31: Nutzungsspezifisches Kohärenzverhalten.

zeugt eine Waldmaske, die ohne weitere Bearbeitung in die folgenden Arbeitsschritte integriert werden kann.

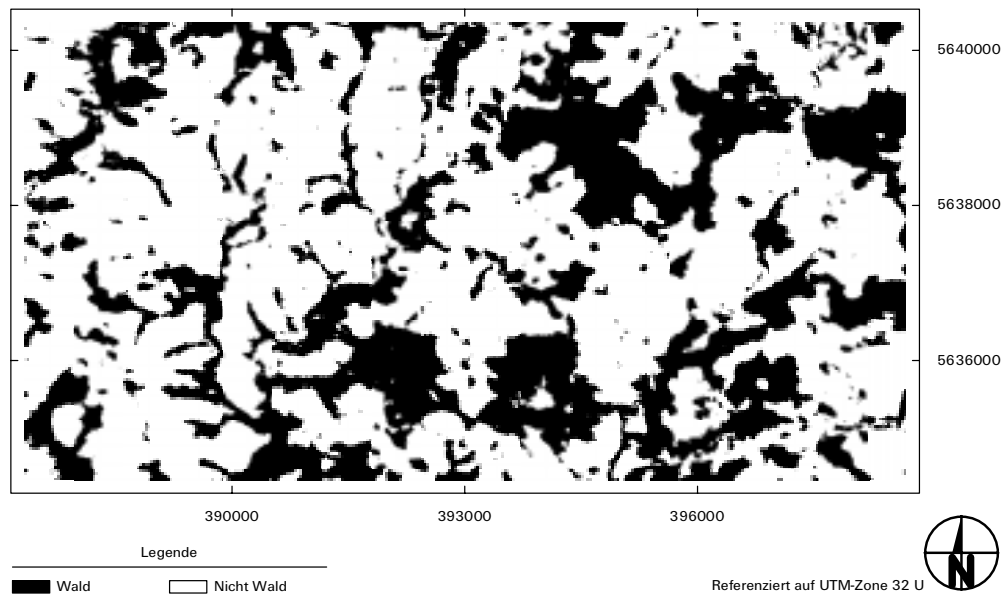


Abbildung 5.32: Wald-Trennung auf Grundlage von Kohärenzinformation.

5.3.3.4 Synergetische Klassifikation der Landnutzung

Der im folgenden beschriebene Arbeitsablauf gliedert sich in drei Teilschritte:

1. Überwachte ML-Klassifikation auf Grundlage der Hauptkomponenten 2, 3 und 4 zur Trennung von *grlnd1*, *grlnd2*, *agr* und einer *wald/bbng*-Mischklasse,
2. Integration der Kohärenzinformation zur Verbesserung der Qualität der Walderkennung und zur Trennung von Wald- und Siedlungsbereichen,
3. GIS-gestützte, nachbarschaftsbasierte Nachbearbeitungen zur Verbesserung des Klassifikationsergebnisses.

Es kommen mehrheitlich Verfahren zur Anwendung, die mit Standardfunktionalitäten gängiger GIS- und Bildverarbeitungssysteme realisiert werden können. Ausnahme bilden lediglich die im Rahmen der Vorverarbeitung durchgeführten σ^0 - und Kohärenzberechnungen. Diese erfordern bislang spezialisierte Software, bzw. eine Eigenimplementation. Die folgenden Klassifikationsverfahren und GIS-Bearbeitungen wurden mit Erdas/Imagine 8.3 durchgeführt. Die Vorverarbeitungsergebnisse wurden daher von PCI Easi/Pace nach Imagine portiert.

Tabelle 5.36 zeigt die Korrelationen von Intensitäts- und Kohärenzkanälen. Der Korrelationskoeffizient r bewegt sich zwischen -0.19 und 0.42. Die durchgängig niedrigen Werte machen deutlich, daß es sich bei Rückstreuintensität und Kohärenz um komplementäre Informationsschichten handelt.

Einen visuellen Eindruck des unterschiedlichen Charakters von Intensitäts- und Kohärenzinformation liefert Abbildung A.9 in Anhang A. Der obere Rahmen zeigt ein multitemporales Intensitätskomposit des Bearbeitungsausschnitts. Deutlich sind der Reliefeffekt und die Relikte des Speckle-Rauschens, die sich trotz der adaptiven Filterverfahren erhalten haben, zu erkennen. Das Kohärenzbild im mittleren Rahmen wirkt spektral wesentlich homogener, ein Reliefeffekt, sowie Speckle-Erscheinungen sind verfahrensbedingt nicht erkennbar. Insgesamt wirkt das Bild, vor allem in den helleren Grünland-, Acker- und Siedlungsbereichen, etwas verschwommener als das Intensitätskomposit. Diese Unschärfe entsteht durch die Größe des räumlichen

Tabelle 5.36: Korrelation (r) von Intensitäts- (I) und Kohärenzkanälen (K)

r	K 09.95	K 11.95	K 03.96	K 04.96
I 20.09.95	-0.13	-0.10	-0.11	-0.15
I 30.11.95	-0.1	0.21	0.17	0.09
I 14.03.96	-0.01	0.38	0.42	0.31
I 18.04.96	-0.19	-0.05	-0.03	-0.01

Mittelungsfensters bei der Kohärenzberechnung. Der untere Rahmen enthält ein Intensitäts/Kohärenzkomposit. Die visuelle Interpretierbarkeit steigt im Gegensatz zum Intensitätskomposit erheblich, vor allem bei der Walderkennung. Der starke Reliefeffekt in den beiden Intensitätsbildern zeichnet sich allerdings auch im Intensitäts/Kohärenzkomposit deutlich durch und erschwert die rechnergestützte Klassifikation auf Grundlage derartiger Mischinformation.

Die überwachte ML-Klassifikation auf Grundlage der nachgeordneten Hauptkomponenten wurde dem Verfahren nach entsprechend der Klassifikation der TM-Daten durchgeführt. Die in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Probleme und Beschränkungen der Verfahren bestehen in ähnlicher Form auch bei der Klassifikation der SAR-Daten und werden an dieser Stelle nicht erneut erwähnt. Zunächst wurden auf Grundlage von Signaturanalysen Trainings- und Testflächen ausgewiesen. Nach der überwachten ML-Klassifikation auf Basis der Trainingsflächen wurden unsicher klassifizierte Bildelemente aus dem Klassifikationsergebnis zurückgewiesen.

Tabelle 5.37 beschreibt die Trainings- und Testgebiete im Bearbeitungsausschnitt. Eine Trennung von Wald- und Siedlungsflächen erschien nach den Signaturanalysen zwar wenig erfolgversprechend, dennoch wurden die Flächen getrennt vorgehalten, um bei der Initialisierung des Klassifikationsablaufs, den Genauigkeitsbetrachtungen und der Zurückweisung die Klassen entsprechend ihrem Verhalten separat behandeln zu können. Die Flächen wurden unabhängig von den lokalen Einfallswinkelbedingungen bestimmt. Insgesamt wurden für das Training des Klassifikators 20 und für die späteren Genauigkeitsuntersuchungen 17 über den Ausschnitt verteilte Flächen ausgewiesen.

Tabelle 5.37: Trainings- und Testgebiete im Ausschnitt Bröl

Nutzung	Trainingsflächen			Testflächen		
	Teilflächen	Pixelzahl	Fläche [km ²]	Teilflächen	Pixelzahl	Fläche [km ²]
agr	6	522	0.05	4	188	0.02
grlnd1	5	591	0.06	4	269	0.03
grlnd2	3	210	0.02	5	252	0.03
bbng	3	247	0.02	2	159	0.02
wald	3	433	0.04	2	251	0.03

Die spektrale Trennbarkeit der Nutzungen in verschiedenen, zweidimensionalen Vektorräumen visualisiert Abbildung 5.33. Sie zeigt die Mittelwerte der Trainingsgebiete, sowie die einer Standardabweichung entsprechenden Ellipsen. Der linke obere Rahmen stellt die Rückstreuintensitäten am 20.09.95 und 14.03.96 gegenüber. Die Grünlandnutzungen grenzen sich gegenüber den Wald- und Siedlungsbereichen ab. Die *agr*-Flächen liegen im Merkmalsraum eng an den Wald- und Siedlungsflächen. Die *bbng*-Signatur streut am breitesten und umschließt mit ihrer 1.0σ -Ellipse die der Waldflächen. Insgesamt liegen alle Nutzungsmittelwerte dicht beieinander.

Im zweiten Rahmen spannt sich der Merkmalsraum zwischen den Terminen 20.09.95 und 18.04.96 auf. Zu beiden Terminen liegen die *grlnd1*-, *wald*- und *bbng*-Nutzungen im mittleren Grauwertbereich, *bbng* streut erneut am stärksten und deckt die Ellipsen von *grlnd1* nahezu und *wald* wiederum komplett ab. Deutlich trennen sich die *agr*- von den *grlnd2*-Flächen.

Der dritte Rahmen zeigt die wesentlich bessere Trennung bei Gegenüberstellung von Hauptkomponente 2 und 3. Lediglich eine Verbesserung der Wald/Siedlungstrennung ist auch nach der Hauptkomponenten-

Tabelle 5.38: Signaturtrennung in den Hauptkomponenten 2, 3 und 4

Signatur	PC 2				PC 3			
	grlnd1	grlnd2	bbng	wald	grlnd1	grlnd2	bbng	wald
agr	662	818	384	607	775	1141	752	864
grlnd1	*	176	801	1094	*	721	75	166
grlnd2	*	*	919	1196	*	*	674	795
bbng	*	*	*	392	*	*	*	236
JM_{mittel}	705				620			
JM_{min}	176				75			
Signatur	PC 4							
	grlnd1	grlnd2	bbng	wald				
agr	109	392	225	299				
grlnd1	*	487	326	330				
grlnd2	*	*	172	380				
bbng	*	*	*	304				
JM_{mittel}	302							
JM_{min}	109							

transformation nicht gegeben. Die bessere Abgrenzung der übrigen Klassen ist auf die Abwesenheit des radiometrischen Reliefeffekts zurückzuführen.

Bei Betrachtung der Kohärenzbilder vom November 1995 und April 1996 wird das spezifische Kohärenzverhalten der Waldflächen deutlich, die sich eindeutig durch ihr zu beiden Tandemüberflügen niedrigeres Kohärenzniveau von den anderen Nutzungen abgrenzen. Eine Trennung weiterer Nutzungen auf Grundlage ihres Kohärenzverhaltens erscheint wenig erfolgversprechend, bereits im Bereich einer Standardabweichung kommt es zu zahlreichen Schnittflächen. Lediglich die *agr*-Nutzung hebt sich durch ihr, für die Märzüberflüge relativ gesehen hohes und für die Aprilüberflüge niedriges Kohärenzniveau ab.

Die beiden Rahmen im unteren Teil der Abbildung spannen einen Merkmalsraum zwischen der Kohärenz vom 17/18.04.96 und der Rückstreuintensität am 18.04. (linker Rahmen), bzw. der zweiten Hauptkomponente (rechter Rahmen) auf. In beiden Fällen bewirkt die Kohärenz auf der Abszisse eine Spreizung, die zu einer sicheren Trennung der Waldflächen von den übrigen Nutzungen führt. Die Signaturanalyse unterstützt somit die Ergebnisse der visuellen Interpretation und legt als ersten Schritt der Nutzungserfassung eine überwachte Klassifikation auf Grundlage der nachgeordneten Hauptkomponenten 2, 3 und 4 nahe.

Tabelle 5.39: Signaturtrennung bei Berücksichtigung der Hauptkomponenten 2, 3 und 4

Signatur	grlnd1	grlnd2	bbng	wald
agr	992	1304	870	1024
grlnd1	*	885	879	1154
grlnd2	*	*	1085	1324
bbng	*	*	*	563
JM_{mittel}	1008			
JM_{min}	563			

Tabelle 5.38 enthält die Jeffries-Matusita Werte (vgl. Kap. 5.2.2.3) der Klassensignaturen bei getrennter Betrachtung der drei einzubeziehenden Hauptkomponenten. Den größten Trennungsbeitrag liefert die zweite Hauptkomponente mit einem JM-Mittel von 705. Die Grünlandklassen grenzen sich jeweils gut von Wald- und Siedlungsbereichen ab. Problematisch ist die Trennung der Grünlandklassen untereinander, sowie die Wald/Siedlungstrennung. Die dritte Hauptkomponente liegt im JM-Mittel etwas niedriger als die zweite und liefert Trennungsbeiträge vor allem in den Paarungen, die mit der zweiten Hauptkomponente Probleme bereiten. Sie trennt vor allem die Grünlandklassen und die *agr*-Klasse. Minimale JM-Werte haben

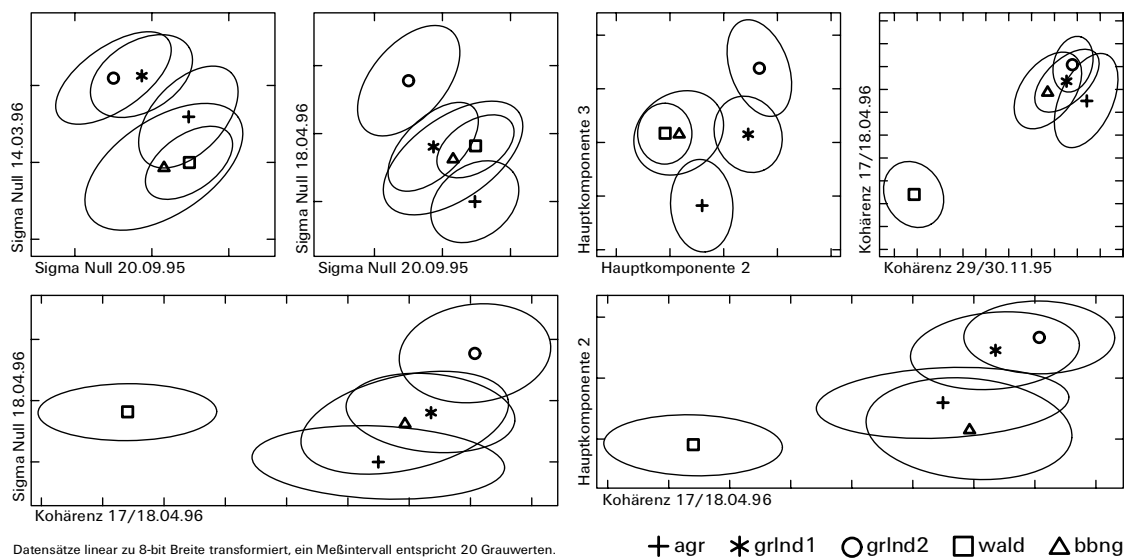


Abbildung 5.33: Spektrale Trennbarkeit verschiedener Nutzungen: Mittelwerte und 1.0σ -Ellipsen der Trainingsgebietssignaturen.

erneut die *bbng/wald*- und außerdem die *bbng/grlnd1*-Paare zu verzeichnen. Die vierte Hauptkomponente liefert für sich genommen nur noch einen geringen Beitrag zur Signaturtrennung.

Die JM-Werte bei Berücksichtigung aller drei Hauptkomponenten zeigt Tabelle 5.39. Im Mittel wird ein JM-Wert von 1008 erreicht. Problematisch erscheint weiterhin die Trennung von Wald- und Siedlungsbereichen, sowie in abgeschwächter Form die Abgrenzung der beiden Grünlandklassen und der *bbng/agr*- und *bbng/grlnd1*-Paare.

Tabelle 5.40: Signaturtrennung in den Hauptkomponenten 2, 3 und 4 bei vereinigter *wald/bbng*-Signatur

Signatur	PC 2			PC 3		
	grlnd1	grlnd2	bbng/wald	grlnd1	grlnd2	bbng/wald
agr	662	818	470	775	1141	814
grlnd1	*	176	962	*	721	62
grlnd2	*	*	1076	*	*	741
JM_{mittel}	694			709		
JM_{min}	176			62		
Signatur	PC 4					
	grlnd1	grlnd2	bbng/wald			
agr	109	392	219			
grlnd1	*	487	291			
grlnd2	*	*	264			
JM_{mittel}	294					
JM_{min}	109					

Da die Trennung von Wald- und Siedlungsbereichen auf Grundlage der Hauptkomponenten nicht möglich erschien, wurden die Trainingsgebiete beider Klassen vereinigt und anschließend erneut die Signaturtrennung untersucht. Tabelle 5.40 zeigt die JM-Werte bei getrennter Betrachtung der Hauptkomponenten und bei gemeinsamer *wald/bbng*-Signatur. Vergleicht man die Werte mit denen in Tabelle 5.38 stellt man fest, daß nun nicht mehr PC 2, sondern die dritte Hauptkomponente den höchsten JM-Mittelwert erhält. Durch die Vereinigung nimmt das durchschnittliche JM-Niveau in PC 2 etwas ab, dieses Defizit wird aber durch die Erhöhung in PC 3 überkompensiert. Für PC 4 sinkt die durchschnittliche Trennungsleistung durch die Vereinigung der Wald- und Siedlungsflächen geringfügig.

Tabelle 5.41: Gesamt-Signaturrennung bei vereinigter *wald/bbng*-Signatur

Signatur	grlnd1	grlnd2	bbng/wald
agr	992	1304	938
grlnd1	*	885	1020
grlnd2	*	*	1228
JM_{mittel}	1061		
JM_{min}	885		

Bei Berücksichtigung aller Hauptkomponenten beträgt der JM-Mittelwert bei vereinigter *bbng/wald*-Signatur, wie Tabelle 5.41 ausweist, 1061. Am problematischsten erscheint die Trennung der Grünlandklassen, deren JM-Wert von 885 aber ausreicht um eine Einbeziehung beider Nutzungsarten in die Klassifikation zu rechtfertigen.

Spalte A in Tabelle 5.44 zeigt das Ergebnis der überwachten ML-Klassifikation bei Nutzung der Trainingsgebiete und vereinigter Wald/Siedlungsklasse. Im linken Teil der Tabelle befindet sich das Ergebnis der TM-Klassifikation (nach Nachbearbeitungen) für den Bearbeitungsausschnitt. Die Aufstellung dient lediglich einem überblickshaften Vergleich, da sich die Klassenhierarchien von TM- und SAR-Klassifikation nicht im einzelnen decken, die Aufnahmezeitpunkte mehrere Jahre versetzt liegen und es sich bei der TM-Klassifikation um eine Sommeraufnahme handelt, während die SAR-Daten im Winterhalbjahr aufgezeichnet wurden. Hinzu kommt, daß die Verortung der Flächen in den prozentualen Angaben nicht enthalten ist und somit die Werte keinen Eindruck von der Genauigkeit des Verfahrens geben können. Die Flächenanteile betreffend ist, zumindest für die Wald- und Siedlungsbereiche, nur mit geringen Änderungen zwischen 1992 und 1995/96 zu rechnen.

Tabelle 5.42: Konfusionsmatrix für das PCA-Klassifikationsergebnis

[%]	agr	grlnd1	grlnd2	bbng/wald	K^\dagger
agr	78.76	6.74	0.00	14.51	13.73
grlnd1	11.90	68.77	17.84	1.49	32.95
grlnd2	0.79	16.27	80.16	13.4	9.25
bbng/wald	5.61	3.66	2.93	87.80	44.07
Gesamtgenauigkeit: 79.58%					

$^\dagger K$: Anteil im Klassifikationsergebnis

Eine Genauigkeitsbetrachtung liefert Tabelle 5.42 in Form einer Konfusionsmatrix auf Grundlage der Testgebiete (vgl. Kap. 5.2.3.1). Die flächengewichtete Gesamtgenauigkeit liegt bei knapp 80%. In den Grünlandklassen fällt die Mehrzahl der falsch klassifizierten Pixel in die jeweils andere Grünlandklasse, absolut ist die Genauigkeit in den *grlnd2*-Flächen mit ca. 80% höher, als in den *grlnd1*-Gebieten. Die falsch klassifizierten *agr*-Flächen fallen mehrheitlich in die *bbng/wald*-Klasse. Die höchste Genauigkeit erreichen die vereinigten Wald- und Siedlungsflächen mit knapp 88%. Sie stellen mit 44.07% auch flächenanteilig die dominante Nutzung im Bearbeitungsausschnitt.

Analog zur Verarbeitung der optischen Satellitendaten wurden im nächsten Verarbeitungsschritt unsicher klassifizierte Pixel aus dem Klassifikationsergebnis zurückgewiesen (vgl. Kap. 5.2.3.2). Die Zurückweisungsschwellen wurden klassenspezifisch unter Berücksichtigung der χ^2 -Verteilungen der Mahalanobis-Distanzwerte zwischen Pixel- und zugehörigen Klassenmittelwerten festgelegt. Tabelle 5.43 zeigt die χ^2 -Werte und entsprechenden Konfidenzschwellen. Das Klassifikationsergebnis nach der Zurückweisung zeigt Spalte B in Tabelle 5.44. Insgesamt wurden 5.30% der Bildelemente zurückgewiesen. Mit knapp 3% wurde die Mehrzahl der negierten Pixel aus der flächenmäßig dominierenden *bbng/wald*-Klasse entfernt.

Zur Verbesserung des Klassifikationsergebnisses wurde abschließend ein fünfstufiges Nachbearbeitungsverfahren angewendet, bei dem verschiedene GIS-Methoden der Nachbarschaftsanalyse zum Einsatz kamen. Zur Trennung von Wald- und Siedlungsgebieten wurde Kohärenzinformation einbezogen. Die Zwischenergebnisse der einzelnen Verfahren sind in den Spalten C bis F in Tabelle 5.44 enthalten, Spalte G zeigt das

Tabelle 5.43: Zurückweisungsschwellen für das PCA-Klassifikationsergebnis

Klasse	χ^2	Konf. Int.
agr	7.23	0.06
grlnd1	6.19	0.10
grlnd2	10.41	0.02
bbng/wald	6.25	0.10

Endergebnis. Im folgenden werden die durchgeführten Verarbeitungen im einzelnen beschrieben.

Die spektrale Ähnlichkeit von *wald/bbng* und *agr* führte innerhalb der Waldgebiete zu *agr*-Fehlklassifizierungen. Diese wurden zunächst mit einem 7·7-Modalfilter eliminiert. Die Matrize bearbeitete, entsprechend dem Ziel der Filterung, nur *agr*-Pixel in deren Nachbarschaft Wald dominiert. Spalte C in Tabelle 5.44 zeigt das Ergebnis der Verarbeitung. Die *agr*-Flächen verlieren 4.08% zugunsten der Waldflächen.

Die spektrale Breite der *wald/bbng*-Klasse führt innerhalb der Grünlandflächen zu Fehlklassifizierungen zugunsten der Wald- und Siedlungsklasse. Um diese zu reklassifizieren wurde zunächst ein 3·3-Modalfilter eingesetzt, der lediglich Wald bei Nachbarschaftsdominanz von Grünland bearbeitete. Die Filterung zeigte in den Grünlandflächen die gewünschte Wirkung, führte aber in den Wald- und Siedlungsrandbereichen zu einer unerwünschten Erosion, die sich in der starken prozentualen Abnahme der Wald- und Siedlungsflächen in Spalte D (Tab. 5.44), vor allem zugunsten der *grlnd1*-Flächen, ausdrückt.

Tabelle 5.44: Verarbeitungsspezifische Landnutzungsverteilungen im Ausschnitt Bröl

TM-Klassen [†]	[%]	SAR-Klassen	A [‡] [%]	B [‡] [%]	C [‡] [%]	D [‡] [%]	E [‡] [%]	F [‡] [%]	G [‡] [%]
bbng1	0.32	bbng	44.07	41.10	45.18	26.97	42.22	8.59	7.12
bbng2	7.16								
wald1	20.09	wald	33.62	28.91	32.95	31.89	31.89	46.02	36.89
wald2	9.19								
grlnd	53.87	grlnd1	32.95	31.89	31.89	46.02	36.89	36.89	44.57
		grlnd2	9.25	8.76	8.76	12.84	9.19	9.19	10.30
bod	4.80	agr	13.73	12.95	8.87	8.87	8.31	8.31	9.10
agr	4.24								
zurückgew.	0.00		0.00	5.30	5.30	5.30	3.40	3.40	0.00

[†] Landsat TM-Klassifikationsergebnis für den Bearbeitungsausschnitt

[‡] A: PCA-Klassifikationsergebnis

B: PCA-Klassifikationsergebnis nach Zurückweisung

C: Landnutzungsverteilung nach *agr*-Manipulation

D: Landnutzungsverteilung nach *wald*-Manipulation

E: Landnutzungsverteilung nach Kohärenzintegration

F: Landnutzungsverteilung nach *wald/bbng*-Trennung

G: Endergebnis

Zur Behebung dieses unerwünschten Nebeneffekts wurde Kohärenzinformation genutzt. Eine unüberwachte 2-Klassen ISODATA-Klassifikation auf Grundlage der Kohärenzbilder von November, März und April lieferte eine zuverlässige Waldmaske, die mit dem Ergebnis der letzten Modalfilter-Bearbeitung verschnitten wurde. Im Zuge der Bearbeitung wurden die Waldflächen aus der Kohärenzklassifikation in den Ergebnisdatensatz übertragen. Spalte E zeigt das Ergebnis, die Wald- und Siedlungsflächen profitieren insbesondere auf Kosten der *grlnd1*-Flächen, die im vorigen Verarbeitungsschritt fälschlicherweise die Waldränder erodierten. Problematisch ist an dieser Stelle die Tatsache, daß die im vorigen Schritt erodierten Siedlungsänder von der aktuellen Verarbeitung nicht erfaßt werden. Dies führt im nächsten Verarbeitungsschritt zu einer syste-

matischen Unterschätzung der Siedlungsfläche, die absolut gesehen allerdings keinen wesentlichen Einfluß auf das Endergebnis ausübt.

Um die Siedlungsbereiche von den Waldgebieten zu trennen, wurde anschließend erneut die Kohärenzklassifikation genutzt. Alle Bildelemente, die im PCA-Klassifikationsergebnis als *wald/bbng* klassifiziert wurden und in der Kohärenzklassifikation nicht zur Waldklasse gehören, wurden zu Siedlung reklassifiziert. Spalte F (Tab. 5.44) zeigt das Ergebnis der Verarbeitung, das für die Siedlungsfläche im Größenordnungsbereich der TM-Klassifikation liegt.

Abschließend wurden die zurückgewiesenen Bildelemente mit dem in Kapitel 5.2.3.3 beschriebenen Werkzeug reklassifiziert. Bei der Feststellung der Nachbarschaftsdominanz wurden die mit hoher Sicherheit klassifizierten Waldflächen nicht berücksichtigt. Bei einem *switch value* von 100 waren 105 Iterationen für die vollständige Reklassifikation notwendig. Um die mit Einzelpixeln stark ineinander streuenden Grünlandbereiche zu „bereinigen“ wurde schließlich eine selektive 3·3-Modalfilterung durchgeführt. Das Endergebnis der Nachbearbeitungen enthält Spalte G in Tabelle 5.44.

Die Konfusionsmatrix für das Klassifikationsergebnis nach den GIS-Bearbeitungen zeigt Tabelle 5.45. Im Vergleich zum originären PCA-Klassifikationsergebnis (Tab. 5.42) steigt die flächengewichtete Gesamtgenauigkeit auf 81 %. Die *agr*- und *grlnd2*-Flächen vergrößern ihren Übereinstimmungsanteil geringfügig auf 79.79 %, bzw. 82.54 %. Die Übereinstimmung bei den *grlnd1*-Flächen steigt um knapp 7 % auf 75.46 %. Die Genauigkeiten der getrennten Wald- und Siedlungsflächen verhalten sich gegenläufig. Während die Übereinstimmung der Waldflächen durch die Qualität der Kohärenzinformation auf 95.62 % steigt, liegt sie bei den, aus einem sekundären „Umkehrschluß“ extrahierten, Siedlungsflächen bei nur 55.35 %. Fehlklassifizierungen von Siedlungsflächen fallen vor allem in die *grlnd1*- und *wald*-Klasse.

Tabelle 5.45: Konfusionsmatrix für das Klassifikationsergebnis nach GIS-Bearbeitungen

[%]	agr	grlnd1	grlnd2	bbng	wald	K [†]
agr	79.79	7.77	1.04	9.33	2.07	9.10
grlnd1	11.15	75.46	11.90	0.37	1.12	44.57
grlnd2	0.79	14.68	82.54	0.79	1.19	10.30
bbng	1.26	18.87	5.66	55.35	18.87	7.12
wald	0.40	1.20	0.80	1.99	95.62	28.91
Gesamtgenauigkeit: 80.98 %						

[†] K: Anteil im Klassifikationsergebnis

Die wesentlichen Ergebnisse der Verarbeitungen visualisiert Abbildung A.10 in Anhang A. Der obere Rahmen zeigt das Klassifikationsergebnis nach der Zurückweisung unsicher klassifizierter Bildelemente (Spalte B in Tab. 5.44). Im mittleren Rahmen ist das Zwischenergebnis nach der Kohärenzintegration zu sehen (Spalte E in Tab. 5.44). Deutlich ist der homogene Charakter der Waldflächen erkennbar. Neben der Qualität der Kohärenzinformation ist an dieser Stelle auch zu berücksichtigen, daß die Größe des Mittelungsfensters bei der Kohärenzbestimmung die räumliche Auflösung auf ca. 80·80m² reduzierte und somit, neben dem inhaltlichen Effekt, auch ein verarbeitungsbedingter, methodischer Einfluß zur homogenen Charakteristik der Waldgebiete aus der Kohärenzklassifikation beiträgt. Der untere Rahmen enthält das Endergebnis der Landnutzungsbestimmung. Die Waldflächen sind von den Siedlungsbereichen getrennt, die zurückgewiesenen Pixel umgebungsbezogen reklassifiziert. Das Problem der Siedlungserkennung unterstreicht nach der Analyse der Konfusionsmatrix (Tab. 5.45) auch der visuelle Eindruck des Endergebnisses. Die im Untersuchungsgebiet zahlreichen kleinen, verstreuten Siedlungsbereiche werden in ihrer Lage gut repräsentiert. Die größeren Agglomerationen werden allerdings in ihrer Ausdehnung und Dichte eher unterschätzt und zeigen zahlreiche eingestreute *grlnd1*- und *grlnd2*-Pixel, die aus Geländeuntersuchungen und Fernerkundungsdatenanalyse nicht bestätigt werden können. Deutlich wird dies vor allem in den Flächen der Ortschaften Nümbrecht, Much und Marienfeld.

5.3.4 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die Auswertung der ERS-1/2 SAR Daten erfolgte in einem dreistufigen Verfahren. Zunächst wurden, nach visuellen Interpretationen und einer Reduzierung des radiometrischen Reliefeffekts, aus vier Rückstreuintensitätsdatensätzen die Nutzungen *agr*, *grlnd1* und *grlnd2* sowie eine Mischklasse, die Wald- und Siedlungsflächen vereinigt, klassifiziert. Das überwachte Klassifikationsverfahren basierte auf Trainingsgebieten mit bekannter Nutzung und einem Maximum Likelihood-Klassifikator. Die Isolierung des Reliefeffekts erfolgte durch eine Hauptkomponententransformation. Die, den Großteil der Varianz des Datensatzes erklärende, erste Hauptkomponente repräsentierte vor allem den Einfluß des Reliefs auf die Radarrückstreuung. Die intensitätsbasierte Klassifikation der Landnutzung erfolgte daher auf Grundlage der drei nachgeordneten Hauptkomponenten unter Ausschluß von PC 1. Anschließend wurde die Güte des Klassifikationsergebnisses auf Grundlage einer Konfusionsmatrix, basierend auf Testgebieten mit bekannter Nutzung, abgeschätzt. Den Abschluß der ersten SAR-Verarbeitungssequenz bildete die Zurückweisung von mit hoher Wahrscheinlichkeit falsch klassifizierten Bildelementen, unter Verwendung klassenspezifischer Zurückweisungsschwellen.

Der zweite Arbeitsschritt basierte auf der Kohärenzanalyse von drei komplexen, interferometrischen SLC-Datenpaaren aus der ERS-1/2 Tandem Mission. Mit einem unüberwachten ISODATA-Klassifikationsverfahren wurden die Waldgebiete zuverlässig isoliert. Eine Trennung weiterer Nutzungen aus der Kohärenzinformation erwies sich nach der nutzungsspezifischen Analyse als wenig erfolgversprechend und erschien wegen der Ergebnisqualität des ersten Verarbeitungsschritts auch nicht erforderlich.

Abschließend wurden verschiedene GIS-Funktionalitäten genutzt, um den Informationsgehalt von Rückstreuintensität und Kohärenz synergetisch zu nutzen und das Klassifikationsergebnis auf der Basis von Nachbarschaftsanalysen zu verbessern. Es erfolgten verschiedene Modalfilterverfahren, die gezielt bestimmte, fehlerhafte Erscheinungen im Klassifikationsergebnis beseitigten. Durch Verschneidung von intensitäts- und kohärenzbasierten Klassifikationsergebnissen konnten Wald- und Siedlungsflächen getrennt werden.

Insgesamt erzielte das Verfahren Ergebnisse, die in erreichter Klassenauflösung und Genauigkeit die Ableitung von HRUs unterstützen können. Zu bedenken ist, daß der beobachtete Aufnahmezyklus das Winterhalbjahr abdeckte und die intensitätsbasierte Klassifikation lediglich auf Grundlage von vier PRI-Szenen durchgeführt wurde. Bei Betrachtung der phänologisch stärker differenzierten Sommerperiode und Berücksichtigung einer größeren Anzahl von PRI-Datensätzen, ist mit differenzierteren Ergebnissen zu rechnen.

Probleme bereiteten vor allem die Siedlungsbereiche, deren Erkennung nicht mit zufriedenstellender Genauigkeit erfolgte. Hierfür sind zum einen verfahrensbedingte Ursachen, wie die im vorigen Kapitel beschriebenen Probleme der Modalfilterverfahren und die Siedlungs/Waldtrennung durch einen Umkehrschluß, maßgeblich. Zum anderen trägt aber auch das Rückstreuverhalten der Flächen selbst zu der problematischen Siedlungserkennung und -trennung im C-Band des ERS bei. Auch eine Trennung unterschiedlicher Waldarten war mit dem vorhandenen Datenmaterial im Untersuchungsgebiet nicht möglich.

Das ausgeprägte Relief im Untersuchungsgebiet machte eine Reduzierung des radiometrischen Terraineffekts in den Intensitätsdatensätzen erforderlich. Diese bediente sich methodisch einer Hauptkomponententransformation. Der Vorteil des Verfahrens liegt in seiner Einfachheit und operationellen Anwendbarkeit. Durch die Überführung der multitemporalen Daten in einen, an der Varianz der Ausgangsdatsätze orientierten, Merkmalsraum mit statistisch voneinander unabhängigen Variablen, lassen sich die raum-zeitlichen Muster des Rückstreuintensitätsverhaltens einer Landschaft extrahieren. Allerdings besteht bei der Einschätzung der quantitativen, physikalischen Relevanz der Hauptkomponentenwerte weiterer Forschungsbedarf (vgl. VERHOEST et al. 1997[289], HENEGBRY 1997[134]). Bei der verfolgten Fragestellung einer thematischen Landnutzungsklassifikation spielte diese Tatsache eine untergeordnete Rolle, sie gewinnt jedoch an Bedeutung, wenn aus den Werten der Hauptkomponenten physikalische Zustände der Oberflächen (z.B. der Wassergehalt des Oberbodens) extrahiert werden sollen. Da Hauptkomponentenanalysen bislang nur in Ausnahmefällen bei der Auswertung von SAR-Daten Verwendung fanden, müssen weitere Untersuchungen zeigen, inwieweit die vorgestellte Methodik auf andere Gebiete übertragbar ist und ob eine Isolierung des radiometrischen Reliefeffekts mittels Hauptkomponententransformation auch unter anderen Rahmenbedingungen (Sensor, Relief, Nutzungsstruktur) Erfolg verspricht. Ein generelles Problem bei der Auswertung ist die Tatsache, daß die chronologische Entwicklung des multitemporalen Intensitätsverhaltens in den Hauptkomponenten nur noch indirekt vorhanden ist. Desweiteren geht durch den Ausschluß der ersten Hauptkomponente auch inhaltliche Information verloren, da diese je nach Ausprägung

der untersuchten Landoberfläche neben dem Reliefeinfluß auch andere stabile Bildelemente repräsentiert (z.B. anthropogene Nutzungen wie Straßen, größere Bauwerke u.ä.).

Kohärenzanalysen wurden bislang nur in geringem Maße für thematische Klassifizierungen genutzt, was vor allem aus der erforderlichen Vorverarbeitung der Daten resultiert, die bislang auf spezialisierte Softwareprodukte angewiesen ist. Diese stehen der Mehrzahl anwendungsbezogener Forschungsprojekte derzeit nicht zur Verfügung. Desweiteren ist die Vergleichbarkeit der Kohärenzwerte unterschiedlicher Termine streng genommen nur nach einer aufwendigen Kalibrierung der Daten gegeben. Um den Informationsgehalt der Kohärenz in multitemporalen und multisensoralen Betrachtungen auszuschöpfen, muß das Interferogramm des untersuchten Bildausschnitts von den Interferenzlinien (*fringes*) befreit werden, da Phasenvariationen innerhalb des räumlichen Mittelungsfensters (vgl. Kap. 2.4.2.3 und 5.3.2.1) zu einer systematischen Unterschätzung der aktuellen Kohärenz führen (SCHWÄBISCH 1997[260]). Notwendige Voraussetzung dieser Kalibrierung ist u.a. ein genaues Digitales Geländemodell. Wie die vorliegende Arbeit belegt, läßt sich aber auch mit vergleichsweise einfachen Verfahren nutzbringende Information aus den Kohärenzdatensätzen extrahieren, der volle Informationsgehalt der Daten wird damit aber keineswegs ausgeschöpft.

Schließlich erschwert auch die Komplexität des Kohärenzverhaltens von Oberflächen und die Vielzahl der einflußnehmenden Parameter bislang eine operationelle Nutzung dieser Information. Wie GEUDTNER bereits 1995[119] feststellt, ist der Einfluß von äußeren Einwirkungen (Wind, Temperatur, Niederschläge, Pflanzenwachstum), auch vor dem Hintergrund der zeitlichen Dekorrelation, bislang kaum bekannt. Zur Klärung sind Untersuchungen mit detaillierten *in situ* Messungen erforderlich, die bis heute nur in geringem Umfang durchgeführt wurden.

Die Modalfilterverfahren im letzten Arbeitsschritt orientierten sich an der visuellen Interpretation der jeweiligen Klassifikations-Zwischenergebnisse und sind somit eng an die konkrete Charakteristik derselben gebunden. Insofern läßt sich der gewählte sequentielle Ablauf nicht ohne weiteres auf Ergebnisse anderer Klassifikationen übertragen. Das Verfahren an sich ist allerdings einfach, operationell verfügbar und robust. Es wurden jeweils Erscheinungen bearbeitet, die relativ gleichmäßig über das Bild verteilt sind, so daß Information aus Teilgebieten ausreicht, um einen an die Fragestellung angepaßten, individuellen Verfahrensablauf zu konstruieren. Die aus der Einfachheit der Methodik resultierende, partielle Informationserosion an unerwünschten Stellen im Klassifikationsergebnis erfordert eine behutsame Anwendung und Kontrolle des Ablaufs (vgl. Kap. 5.2.3.4).

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

In den Abschnitten 5.2.4 und 5.3.4 wurden die Ergebnisse der optischen Fernerkundungsdatenanalysen und der Radardatenauswertungen jeweils getrennt zusammengefaßt und bewertet. Im folgenden werden die Verfahren und Resultate vergleichend diskutiert und unter Bezug auf die, in Kapitel 3 formulierten Arbeitsziele, in den Gesamtzusammenhang der Arbeit gestellt. Abschließend wird der Versuch eines Ausblicks unternommen, der für den Bereich der diskutierten Fragestellung Perspektiven beschreibt, die sich aus aktuellen methodischen Ansätzen und den geplanten, zukünftigen Sensorgenerationen ergeben.

6.1 Vergleichende Diskussion der Landsat TM- und ERS SAR-Datenanalyse

In den vorigen Abschnitten wurden Fernerkundungsdaten unterschiedlichen Charakters im Hinblick auf ihre Aussagefähigkeit bezüglich einer Landnutzungserfassung analysiert. Die Auswertung stand vor dem Hintergrund einer sich anschließenden, distributiven Flußeinzugsgebietsmodellierung, die je nach Fragestellung und anzuwendendem Modell spezifische Anforderungen an Klassenauflösung und Genauigkeit der Ergebnisse stellt. Trotzdem vor dem Eingang in distributive Modellierungsverfahren detaillierte Nutzungsinformation häufig generalisiert wird, wurde versucht, den Informationsgehalt der Daten optimal auszuschöpfen, um einen Eindruck der spezifischen Stärken und Schwächen der Systeme und Daten zu erhalten.

Die Auswertung der Landsat TM-Daten stand vor dem, für die Nutzung optischer Satellitendaten typischen, Problem, daß zum Zeitpunkt des Untersuchungsbeginns aktuelle Daten wegen ungünstiger Witterungsbedingungen (Wolkenbedeckung) nicht zur Verfügung standen. Daher wurden Szenen der Jahre 1986, 1989 und 1992 ausgewertet, die das Siegeinzugsgebiet ohne, bzw. nur mit geringer Wolkenbedeckung zeigen. Das Verfahren orientierte sich pragmatisch an der Tatsache, daß die Landnutzung im Siegeinzugsgebiet relativ stabil, und abgesehen von regelmäßigen landwirtschaftlichen Flächenrotationen nur geringen kurz- bis mittelfristigen Änderungen unterworfen ist. Die TM-Klassifikation wurde anhand der 92er Aufnahme durchgeführt, zum einen handelte es sich bei dieser um die aktuellste Szene, zum anderen wurde sie im August, und damit zu einem phänologisch günstigen Zeitpunkt, aufgenommen. Hauptproblem bei der Auswertung war die Tatsache, daß zum Überflugzeitpunkt kein fernerkundungsspezifischer „ground check“ durchgeführt werden konnte. Die Ausweisung von Trainingsgebieten und die Signaturanalysen basierten auf Material, daß im Rahmen anderer Untersuchungen und unter anderen Gesichtspunkten in den Jahren 1991 und 1992 kartiert wurde. Diese Einschränkung war maßgeblich für die verhältnismäßig geringe Anzahl der Landnutzungsklassen, die mit der überwachten ML-Klassifikation getrennt wurden. Im Hinblick auf die spätere Verwendung des Klassifikationsergebnisses zur Ableitung von HRUs für die distributive Flußeinzugsgebietsmodellierung galt es, die Ergebnisgenauigkeit auf Kosten der Nutzungsdifferenzierung zu optimieren. Eine Trennung weiterer Nutzungen, z.B. eine bessere Grünland- und Agrarflächendifferenzierung, wäre mit gezielten Geländeuntersuchungen zum Überflugtermin durchaus möglich gewesen.

Die optischen Fernerkundungsdatenanalysen wurden mit kommerziellen Softwarepaketen durchgeführt, deren Routinen als operationell verfügbar bezeichnet werden können. Die angewandten Methoden der Vorverarbeitung und Klassifikation folgten, aufgrund der mittlerweile jahrzehntelangen Erfahrung bei der Aus-

wertung optischer Satellitendaten, einer relativ stringenten Verfahrenslogik. Bei der Nachbearbeitung des Klassifikationsergebnisses wurde die Standardfunktionalität des GI-Systems Erdas/Imagine ausgebaut, um komfortabel eine differenzierte Ergebnisverbesserung zu ermöglichen.

Mit der angewandten Methodik konnten die hydrologisch relevanten Nutzungsformen im gesamten Einzugsgebiet der Sieg mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden.

Daten abbildender Radarsysteme finden in jüngerer Zeit in einer zunehmenden Anzahl anwendungsbezogener, geowissenschaftlicher Studien Verwendung. Dennoch kann ihre Anwendung im Vergleich zur Nutzung der Daten optischer Satelliten bislang nur als stiefmütterlich bezeichnet werden. Gründe liegen in der Tatsache, daß die Geometrie und radiometrische Charakteristik der Daten eine aufwendige Prozessierung erfordern. In der Mehrzahl der Studien, die Mikrowellendaten nutzungsspezifisch auswerten, z.B. zum Agrarflächenmonitoring, wird in wenig reliefierten Gebieten gearbeitet, weniger Erfahrung besteht bislang bei der Auswertung von Szenen, in denen, wie im Bröleinzugsgebiet, der Reliefeinfluß die Rückstreucharakteristik dominiert. Die Vielzahl der die Rückstreuung beeinflussenden Parameter kompliziert die Interpretation der Daten, bietet aber über die Möglichkeit der Penetration von Vegetation und Böden auch Chancen, z.B. in der Bestimmung von Bodenfeuchtigkeiten. Zahlreiche Methoden der Radardatenauswertung befinden sich weiterhin im Forschungsstadium und sind nicht als operationell anwendbar zu bezeichnen.

Die bislang monofrequenten und monopolarisierten, satellitengetragenen SAR-Systeme können in vielen geowissenschaftlichen Fragestellungen derzeit nicht mit den existierenden multifrequenten VIS/IR-Systemen konkurrieren, sofern diese bei günstigen Witterungsbedingungen aufzeichnen konnten. Dennoch bieten sich mit der Verfeinerung der Analysemethoden, der Vertiefung des Verständnisses der Rückstrevorgänge und den Verfahren der Radar-Interferometrie für die Zukunft interessante Anwendungsperspektiven. Bereits im Jahr 2000 wird mit dem ASAR an Bord von ENVISAT ein orbitales, multipolarisiertes SAR seine Arbeit aufnehmen. Die zahlreichen existierenden flugzeuggetragenen, multifrequenten, multipolarisierten SAR-Systeme werden in ähnlicher Form langfristig auch auf Orbitalsystemen zum Einsatz kommen.

Das Hauptmotiv der Auswertung von Radardaten lag in ihrer Beleuchtungs- und Bewölkungsunabhängigkeit und der damit verbundenen sicheren, operationellen Verfügbarkeit, die sie für zahlreiche, auf aktuelle Daten angewiesene, geowissenschaftliche Anwendungen interessant erscheinen läßt. Die Zuverlässigkeit und langjährige Konstanz des ERS-Systems legte eine Nutzung von ERS SAR-Daten nahe. Bei der Auswertung des genutzten C-Bands bestehen bereits umfangreiche Erfahrungen (ERS, RADARSAT) und auch langfristig werden derartige Daten zur Verfügung stehen (ENVISAT).

Die Analyse der Radardaten stützte sich auf Aufnahmen aus der ERS-1/2 Tandem Mission (1995/1996), die mit ihrer 24-stündigen Repetition besonders günstige Voraussetzungen für eine interferometrische Datenverarbeitung bereit stellte, da die zeitliche Dekorrelation der Datensätze, im Gegensatz zu Auswertungen aus den 3-, bzw. 35 Tage-Orbits, eine geringere Rolle spielt. Methodische Fragen standen bei der Auswertung im Vordergrund, daher wurden die Untersuchungen nicht auf Gesamteinzugsgebietsebene durchgeführt, sondern in einem, mit Zusatzdaten besonders gut dokumentierten, Teilgebiet.

Dem komplexeren Charakter der SAR-Daten und Analysemethoden entsprechend, gestaltete sich der Auswertungsablauf, im Vergleich zur Analyse der optischen Daten, weniger standardisiert. Die Vorverarbeitungen nutzten zur Speckle-Reduktion und Geokodierung Standardfunktionalitäten des Radarsoft-Moduls von PCI Easi/Pace. Zur Berechnung der Rückstreuoeffizienten wurde eine Prozedur in EASI implementiert. Eine Reduzierung des radiometrischen Reliefeffekts war im Vorfeld der Klassifikation zwingend erforderlich und wurde unter Verwendung einer Hauptkomponententransformation erreicht. Das Verfahren erwies sich als robust und wirkungsvoll. Zur Klärung der Frage, inwieweit sich Hauptkomponentenanalysen generell zur Reduzierung von radiometrischen Reliefeffekten in SAR-Bildern eignen, sind weitere Untersuchungen in anderen Gebieten notwendig.

Radarverfahren erlauben, im Gegensatz zu Verfahren aus dem optischen Bereich, aufgrund des kohärenten Charakters der aktiv ausgesandten Strahlung eine interferometrische Verarbeitung der Daten. Wenngleich bereits in den 60er Jahren Methoden der Radarinterferometrie angewandt wurden (vgl. Kap. 2.4.2.3), beginnen diese erst seit Mitte der 90er Jahre verstärkt in das Blickfeld geowissenschaftlicher Fragestellungen zu gelangen. Gründe liegen u.a. in der operationellen Verfügbarkeit und hohen Orbitstabilität der ERS-Systeme und der ERS-1/2 Tandem Mission, die mit ihrer 24-stündigen Repetition geeignetes Datenmaterial für große Teile der Erdoberfläche zur Verfügung stellte. In der vorliegenden Arbeit wurden interferometrische Kohärenzanalysen in die Klassifikation der Landnutzung einbezogen.

Die Klassifikation der Landnutzung aus den SAR-Daten erfolgte mit einer überwachten ML-Klassifikation der nachgeordneten Hauptkomponenten. Mit auf Nachbarschaftsanalyse basierenden Nachbearbeitungsverfahren konnte, analog zur Auswertung der TM-Daten, das Ergebnis signifikant verbessert werden. Die Kohärenzinformation wurde mit einem automatischen, unüberwachten Verfahren zur „Wald/Nicht-Wald“-Trennung genutzt, das Ergebnis im Rahmen der Nachbearbeitung mit dem Ergebnis der intensitätsbasierten Klassifikation verschnitten. So konnten die Wald- und Siedlungsflächen voneinander getrennt und die Genauigkeit der Waldklassifikation verbessert werden.

Die Auswertung der ERS-Daten stützte sich, wie die TM-Datenanalyse, weitgehend auf operationell verfügbare Instrumente und Methoden. Die Ergebnisse sind, wenngleich Klassenauflösung und Genauigkeit nicht die Qualität der optischen Datenauswertung erreichen, unter Berücksichtigung des Untersuchungszeitraums (Winterhalbjahr) und des ausgeprägten Reliefs im Untersuchungsgebiet durchaus vielversprechend. Die operationelle, vom Wetter weitgehend unabhängige Verfügbarkeit und Möglichkeit der interferometrischen Verarbeitung sind bedeutende Pluspunkte der Radarverfahren.

6.2 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden Landsat TM- und ERS SAR-Daten landnutzungsspezifisch vor dem Hintergrund einer Parameterisierung distributiver, hydrologischer Modelle ausgewertet. Wesentliche Arbeitsziele waren die Erstellung einer Parameterisierungs- und Validierungsbasis für das Siegeinzugsgebiet aus unterschiedlichen Datenquellen, die flächendeckende Klassifikation der Landnutzung im Einzugsgebiet aus Landsat TM-Daten und die Untersuchung, inwieweit sich SAR-Daten zur Landnutzungsbestimmung in einem Mittelgebirgsrelief eignen.

Nach einer kurzen Einführung wurde in Kapitel 2 der Stand der Forschung formuliert. Ausgehend von einer Aufarbeitung der im Kontext dieser Arbeit relevanten räumlichen Diskretisierungsansätze hydrologischer Modellierungsverfahren und der Rolle Geographischer Informationssysteme wurden mögliche Beiträge der Fernerkundung zur Parameterisierung hydrologischer Modelle diskutiert. Aus der Literaturdiskussion wurde der aktuelle Forschungsbedarf abgeleitet. Den Abschluß des Kapitels bildete ein Überblick über die genutzten Satellitenplattformen und die, im Rahmen der vorliegenden Arbeit relevanten, Eigenschaften abbildender Radarsysteme. Schließlich wurden einige Begrifflichkeiten aus dem methodischen Umfeld von Multispektralklassifikationen geklärt.

Kapitel 3 faßte die Arbeitsziele und das methodische Vorgehen unter Bezug auf den formulierten Forschungsbedarf zusammen.

Das vierte Kapitel führte in die Physiographie des Untersuchungsgebiets ein, stellte die genutzten Datenprodukte im Detail vor und beschrieb abschließend die Vorarbeiten zum Aufbau eines „Informationssystems Sieg“, die im wesentlichen aus der Homogenisierung, Aufbereitung und strukturierten Archivierung der bereits vorhandenen Nutzungs-, Boden- und Klimadaten bestanden.

In Kapitel 5 wurden die durchgeführten Arbeiten zusammengefaßt. Abschnitt 5.1 beschrieb den Aufbau der Höhenmodelle für das gesamte Siegeinzugsgebiet und einige Teileinzugsgebiete, sowie die im Vorfeld der Fernerkundungsanalysen sinnvoll erscheinenden, an einer digitalen Reliefanalyse orientierten, GIS-Operationen.

Abschnitt 5.2 widmete sich der Analyse der optischen Satellitendaten. Es wurde eine geschlossene Verarbeitungskette vorgestellt, die von den systemkorrigierten TM-Ausgangsdaten bis zum Endergebnis in Form einer Landnutzungskarte für das Siegeinzugsgebiet am 05.08.1992 reichte. Die Vorverarbeitung umfaßte eine Korrektur der atmosphärischen Einflüsse, die geometrische Referenzierung auf das UTM-System anhand von Polynomialtransformationen, sowie die Normalisierung des Reliefeinflusses auf Grundlage eines Lambert'schen Strahlungsmodells. Die Landnutzungsklassifikation folgte einem hybriden Ansatz und erfolgte mit einer überwachten Maximum Likelihood-Klassifikation. Im Rahmen der Nachbearbeitung wurden unsicher klassifizierte Bildelemente zurückgewiesen und unter Verwendung eines automatischen, auf Nachbarschaftsanalysen beruhenden Verfahrens reklassifiziert. Nach der Eliminierung von Mischpixelercheinungen wurde die Genauigkeit des Ergebnisses vor und nach den Nachbearbeitungen vergleichend, anhand von Testgebieten beurteilt. Die Resultate unterstrichen die Bedeutung der Signaturanalysen im Vorfeld des Klassifikatortrainings, sowie den Einfluß der GIS-gestützten Nachbearbeitungsverfahren auf das Klassifikationsergebnis.

Die Auswertung der ERS SAR-Daten wurde in Abschnitt 5.3 zusammengefaßt. Die Vorverarbeitung der PRI-Daten beinhaltete eine Speckle-Reduktion mittels adaptiver Filterverfahren, die Berechnung der Radarrückstreuoeffizienten und eine geometrische Korrektur unter Berücksichtigung des Digitalen Geländemodells. Aus den SLC-Daten wurden Intensitäts- und Kohärenzbilder berechnet, die anschließend ebenfalls terrain-geokodiert wurden. Im Vorfeld der Klassifikation war eine Reduzierung des radiometrischen Reliefeffekts notwendig, der die Rückstreucharakteristik in weiten Teilen des Untersuchungsgebiets dominierte und somit eine intensitätsbasierte Landnutzungsklassifikation unmöglich machte. Mit einer Hauptkomponententransformation der vier PRI-Ausgangsdatensätze konnte der Einfluß des Reliefs in der ersten Hauptkomponente konzentriert werden. Analog zur TM-Datenauswertung erfolgten anschließend eine, lediglich die drei nachgeordneten Hauptkomponenten berücksichtigende, überwachte ML-Klassifikation, eine Zurückweisung unsicher klassifizierter Bildelemente und deren Reklassifikation. Mit einem unüberwachten Klassifikationsverfahren auf Grundlage von drei Kohärenzbildern wurde eine Waldmaske erzeugt, die im Rahmen GIS-gestützter Nachbearbeitungsverfahren mit dem Hauptkomponenten-basierten Klassifikationsergebnis verschnitten wurde. Mit diesem Vorgehen war es möglich, die sich im Intensitätsverhalten ähnelnden Siedlungs- und Waldflächen voneinander zu trennen und die Genauigkeit der Waldbestimmung zu erhöhen. Im Rahmen der Nachbearbeitung kamen erneut, auf Nachbarschaftsanalysen basierende Verfahren zum Einsatz, mit denen die Qualität des Ergebnisses verbessert werden konnte. Entsprechend der TM-Datenauswertung wurde die Ergebnisgüte anhand von Testgebieten abgeschätzt.

Einen direkten Vergleich zwischen TM- und ERS-basierten Landnutzungs-Klassifikationsergebnissen erschwert die Tatsache unterschiedlicher Aufnahmetermine (1992 bzw. 1995/1996, Sommer bzw. Winter), Methoden (monotemporal bzw. multitemporal), Klassenauflösungen und Untersuchungsgebiete. Festzustellen ist, daß die Ergebnisse der TM-basierten Klassifikation denen der SAR-Datenanalyse sowohl in Klassenauflösung als auch in erreichter Genauigkeit überlegen sind. Während die TM-Daten bei günstigeren Rahmenbedingungen (gezielte Geländeuntersuchungen zum Überflugtermin) eine noch differenziertere Landnutzungserfassung ermöglicht hätten, erscheint die Trennung weiterer Nutzungen aus den vorliegenden SAR-Daten wenig erfolgversprechend. Dennoch wurde auf Grundlage der SAR-Datenauswertungen eine Landnutzungskarte erzeugt, die in Klassenauflösung und erreichter Genauigkeit die HRU-Ableitung im Vorfeld einer distributiven Einzugsgebietsmodellierung unterstützen kann. Vor dem Hintergrund der im Winterhalbjahr und in einem Gebiet mit ausgeprägtem Relief durchgeführten Untersuchungen, sind die Ergebnisse zufriedenstellend. Angesichts der sicheren, wetterunabhängigen Aquisition, der Möglichkeit in Oberflächenmaterialien einzudringen, der Feuchtigkeits- und Rauigkeitssensitivität, sowie den, sich aus der interferometrischen Verarbeitungsmöglichkeit ergebenden, neuen Anwendungen, erscheint die Nutzung von Radardaten für viele geowissenschaftliche Fragestellungen als interessante Alternative, bzw. Ergänzung zur Auswertung optischer Satellitendaten.

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, daß bereits mit relativ einfachen Mitteln SAR-Daten im Hinblick auf eine Landnutzungserfassung in reliefiertem Terrain gewinnbringend auszuwerten sind. Die Vorverarbeitung der Daten erfordert allerdings einen, im Vergleich zu den optischen Auswertungen, größeren methodischen Aufwand. Die reliefinduzierten Hangverkürzungs-, Überlagerungs- und Schatten-Effekte, sowie der Speckle, sind aufnahmesystembedingte Nachteile, deren Wirkung sich durch Terrain-Geokorrektur, adaptive Filterverfahren, radiometrische Relieffkorrekturen u.ä. zwar einschränken, aber nicht gänzlich eliminieren läßt.

Sowohl bei der TM- als auch bei der SAR-Datenanalyse kamen mit den ISODATA- und Maximum Likelihood-Klassifikatoren operationell verfügbare Standardwerkzeuge zur Anwendung. In beiden Fällen konnten nachbarschaftsbasierte Nachbearbeitungsverfahren die Klassifikationsergebnisse signifikant verbessern. Für die Zukunft bleibt abzuwarten inwieweit flexiblere Klassifikationsmethoden, zum Beispiel unter Verwendung von Neuronalen Netzwerken und Ansätzen unscharfer Logik, eine weitere Integration geographischer Zusatzinformation in den Klassifikationsprozeß ermöglichen, um somit die Spanne dessen, was sich dem in Daten und Untersuchungsgebiet eingearbeiteten Analytiker erschließt und dem, was bislang mit automatischen Klassifikationsverfahren reproduzierbar erscheint, zu verkleinern.

6.3 Ausblick

Wie bereits in Kapitel 2.2 festgestellt, basiert die Mehrzahl der Klassifikationsverfahren fernerkundlich gewonnener Bilddaten nach wie vor auf dem Maximum Likelihood-Klassifikator. Wenngleich dieser, vom mathematisch/statistischen Standpunkt aus, strenge Anforderungen an die Grauwertverteilung der Daten

stellt, hat er in der Anwendung seine Flexibilität und Robustheit vielfach auch bei von der Normalverteilung abweichenden Grauwertverteilungen unter Beweis gestellt. Der Nachteil der pixelbasierten Klassifikationsansätze besteht in der Tatsache, daß über die Spektralcharakteristik lediglich ein Aspekt der dateninheränten Information in die Zuweisungsentscheidung eingeht.

Zahlreiche Studien unternehmen, wie die vorliegende Arbeit, den Versuch, im Rahmen von Nachbearbeitungsverfahren Zusatzinformation zur Verbesserung des Klassifikationsergebnisses heranzuziehen. Hierbei kann es sich um Texturparameter, Nachbarschaftswahrscheinlichkeiten, potentielle Flächengrößen und -formen sowie eine Vielzahl anderer geographischer Informationen handeln, die als „local knowledge“ dem Bearbeiter zur Verfügung stehen, sich mit den traditionellen Klassifikations- und Nachbearbeitungsverfahren aber schwer in automatische Abläufe integrieren lassen.

Mit den GI-Systemen stehen heute Werkzeuge zur Verfügung, die räumliche Information flächenscharf vorhalten und als Entscheidungshilfe übergeben können. Um Klassifikationen digitalen Bildmaterials durch Wissensimplementation zu unterstützen, werden in jüngerer Zeit vermehrt Neuronale Netzwerke und Ansätze unscharfer Logik eingesetzt. Diese Verfahren sind je nach Ausprägung in der Lage, der Heterogenität und Komplexität geographischer Zusatzinformation besser gerecht zu werden, als die klassischen, „harten“ Klassifikationsalgorithmen (vgl. Kap. 2.2.7). Sie werden daher in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen und kurz- bis mittelfristig auch als operationelle Methoden einem breiten Anwenderkreis zur Verfügung stehen.

Ähnliches gilt für den methodischen Bereich der Radaranwendungen. Die, in den 90er Jahren stark zunehmende Anzahl von Auswertungen, hat das Verständnis der Rückstreuvorgänge vertieft und in Algorithmen und Modellen verfügbar gemacht, wenngleich in zahlreichen Detailfragen weiterhin Forschungsbedarf besteht, z.B. bei der Quantifizierung von Bodenfeuchtigkeiten und im Umfeld physikalisch basierter, radiometrischer Reliefkorrekturen. Über die interferometrische Auswertung der SAR-Daten erschließt sich derzeit ein breites Anwendungsfeld für die Geowissenschaften, dessen Ausmaß bislang nur in Ansätzen erkennbar ist.

Die räumliche, spektrale und repetitive Auflösung der Sensorsysteme wird sich in naher Zukunft maßgeblich verbessern. Im optischen Bereich stehen zum einen vermehrt Systeme zur Verfügung, die durch ein weites Sichtfeld hohe Repetitionsraten und damit ein zeitlich hoch aufgelöstes Monitoring erlauben (z.B. der Widefield Sensor „WiFS“ auf den IRS-Satelliten), zum anderen werden geplante kommerzielle Systeme, z.B. *Quick Bird*, in naher Zukunft schmale Oberflächenstreifen mit bis zu 1 m geometrischer Nadirauflösung abtasten und somit einen Skalensprung verursachen, der das Anwendungsfeld der Satellitenfernerkundung stark erweitert.

Im Mikrowellenbereich wird mit dem ENVISAT im Jahre 2000 erstmals operationell ein multipolarisiertes SAR-System orbital eingesetzt. Zahlreiche Studien auf Grundlage flugzeug- und Shuttle-getragener, multipolarisierter Systeme lieferten in der Vergangenheit vielversprechende Ergebnisse. Der ENVISAT wird außerdem eine dem WiFS vergleichbare Weitwinkelfunktionalität besitzen. In der Diskussion befindet sich darüber hinaus eine operationelle Erstellung von Kohärenzbildern aus ENVISAT-Daten (SCHWÄBISCH 1997[260]).

Die für 1999 geplante *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) wird über die interferometrische Erstellung eines Höhenmodells mit globaler Abdeckung zwischen 60° nördlicher und südlicher Breite einen weiteren Anwendungsschub initiieren.

Vor dem beschriebenen Hintergrund ist zu erwarten, daß die Bedeutung fernerkundlich gewonnener Information für geowissenschaftlich ausgerichtete Untersuchungen in den kommenden Jahren weiter ansteigen wird. Das zunehmende Gewicht der Fernerkundung als Methode innerhalb der Geographie unterstreicht ENDLICHER (1998[83], S.70), indem er feststellt:

„Es ist schon jetzt abzusehen, daß die Geographische Fernerkundung mit multispektralen, multisensoralen, multitemporalen, multidimensionalen und multiskaligen Ansätzen von einem Randbereich zu einer zentralen Methode der Geographie wird“.

Anhang A

Farbtafeln

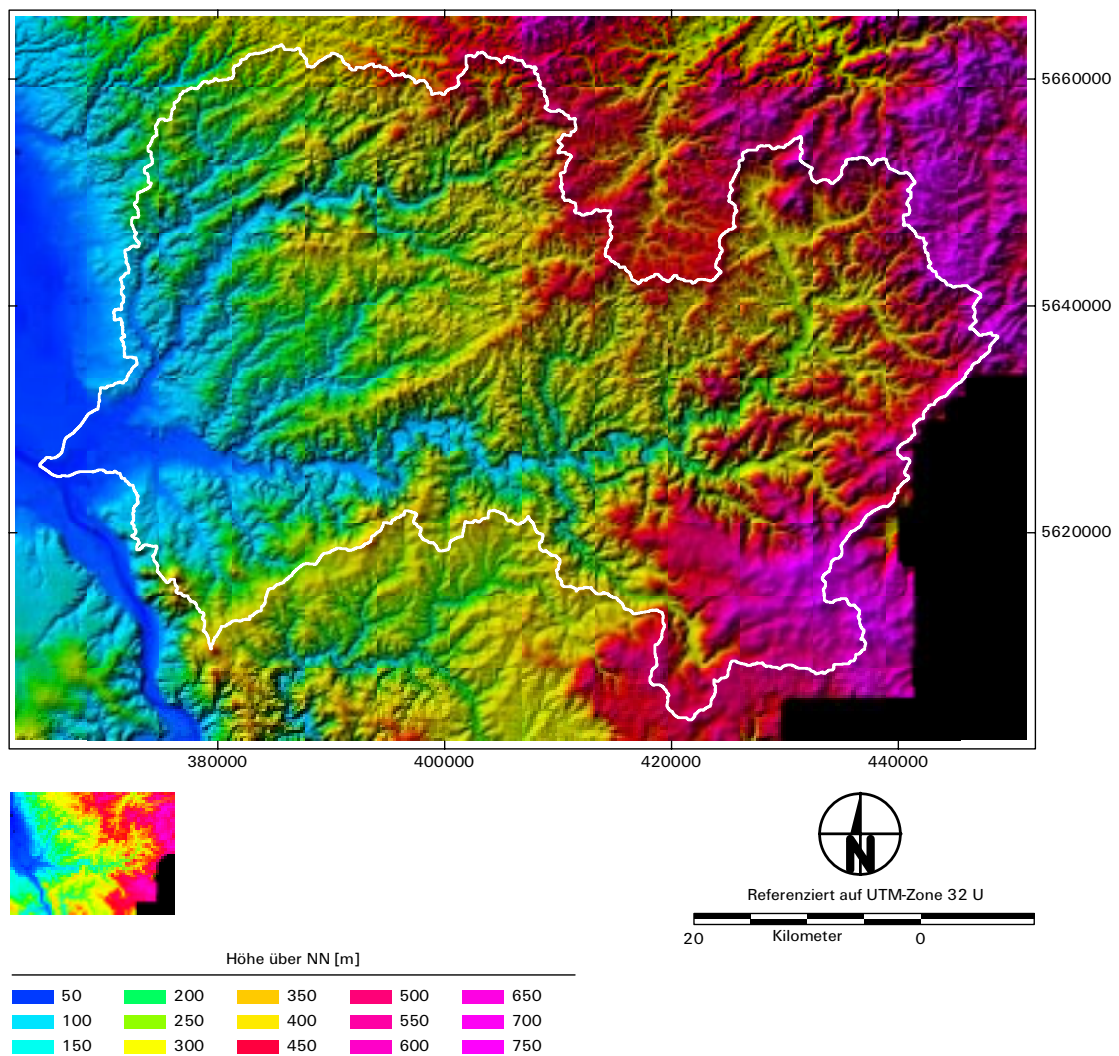


Abbildung A.1: Höhenstufen im Siegeinzugsgebiet (Grundlage: DGM 25-Daten).

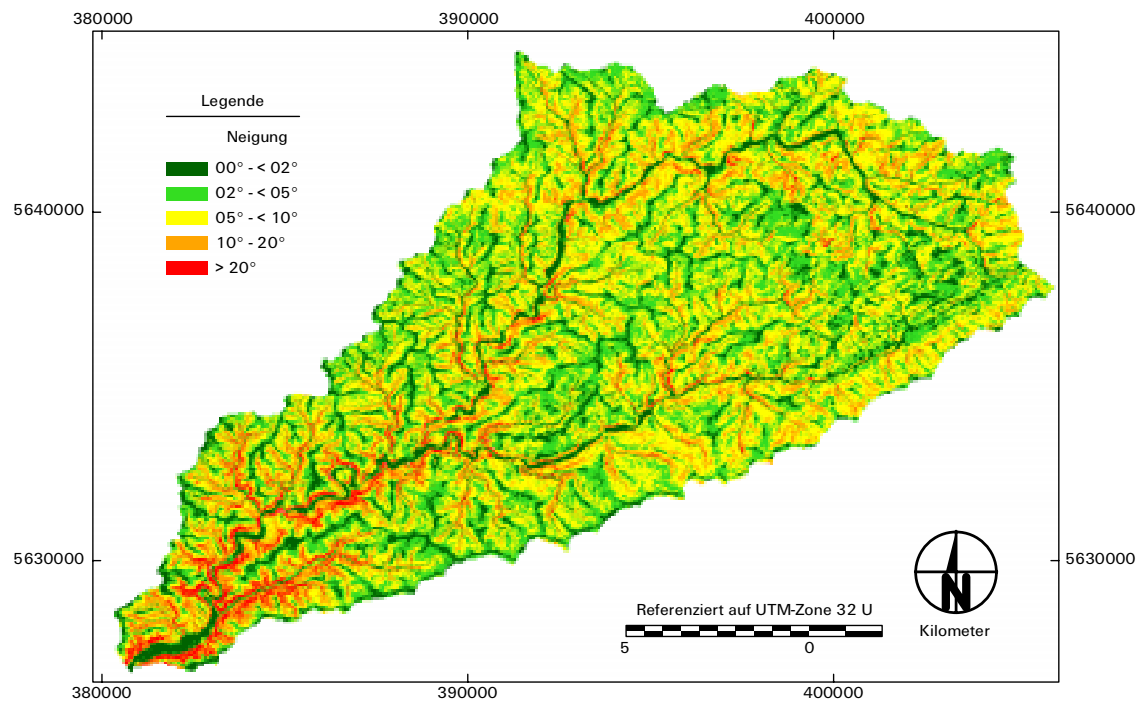


Abbildung A.2: Hangneigungen im Einzugsgebiet der Bröl (Grundlage: DGM 5-Daten).

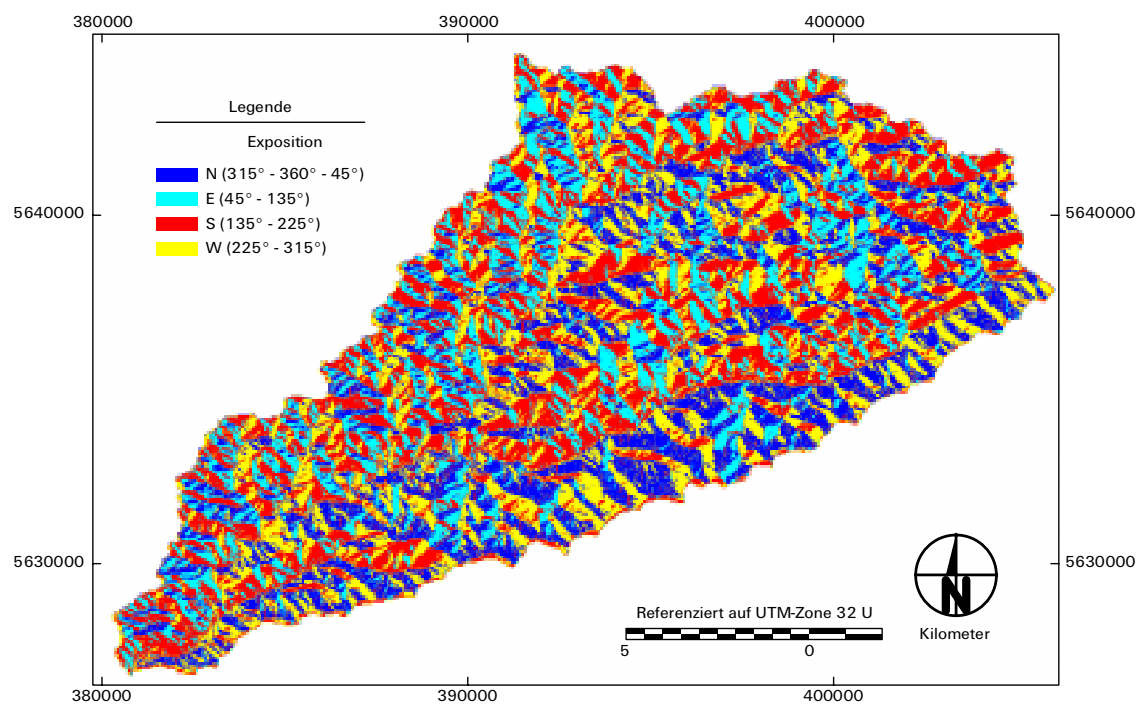


Abbildung A.3: Hangexpositionen im Einzugsgebiet der Bröl (Grundlage: DGM 5-Daten).

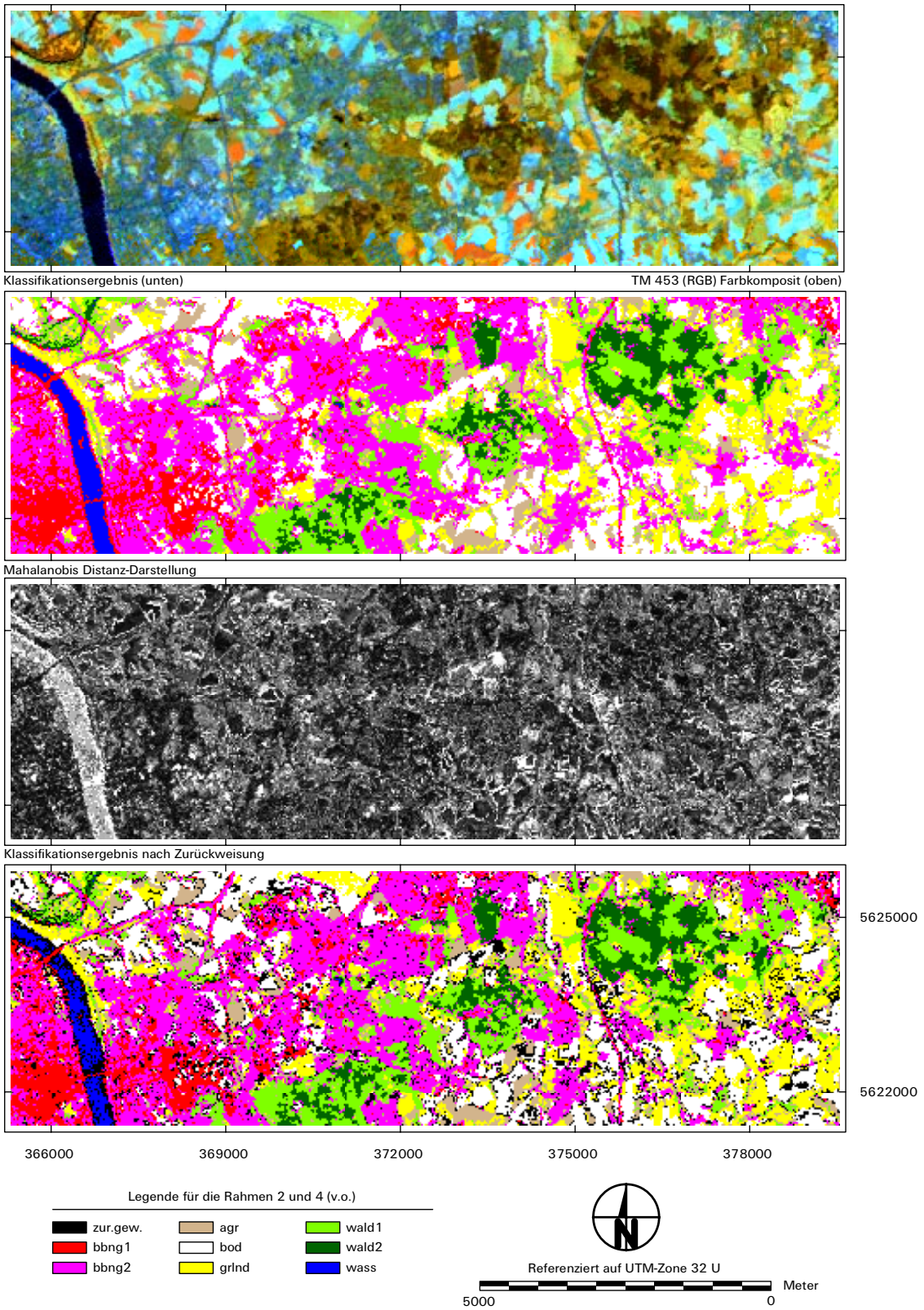
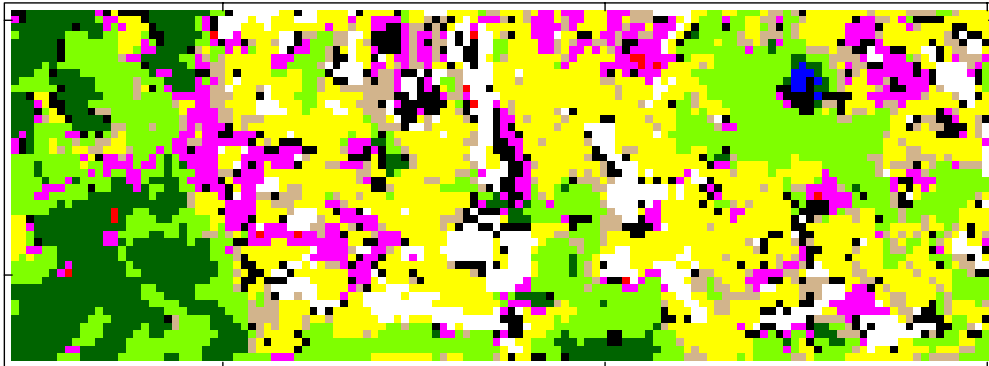
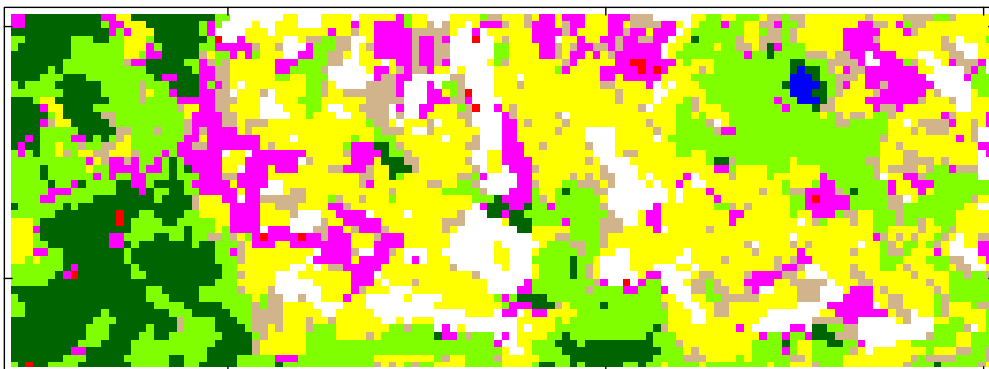


Abbildung A.4: Zurückweisung unsicher klassifizierter Bildelemente.

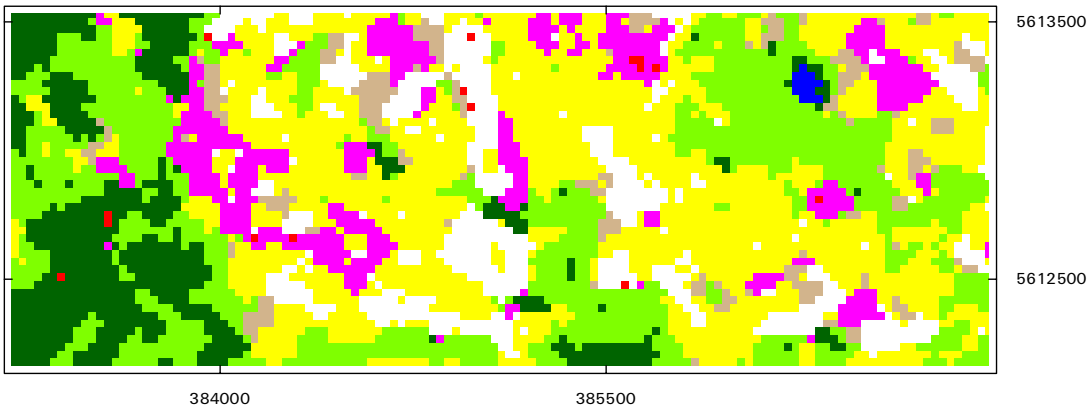
Klassifikationsergebnis nach Zurückweisung



Klassifikationsergebnis nach Zurückweisung und Reklassifikation



Klassifikationsergebnis nach Zurückweisung, Reklassifikation und Mischpixelbereinigung



Legende










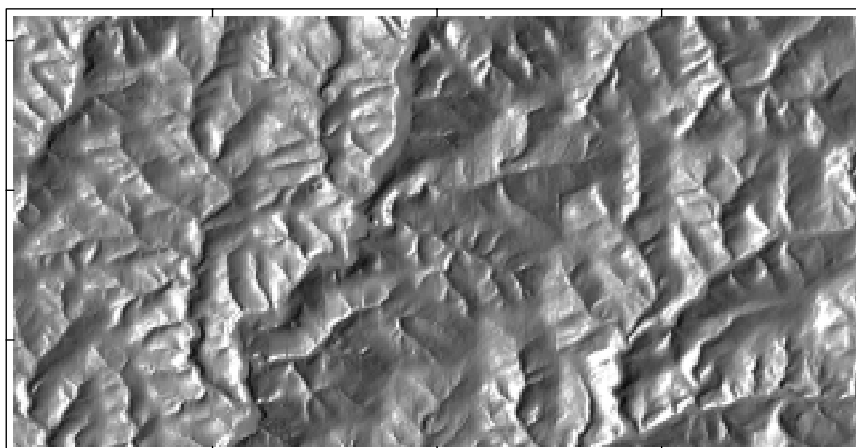
 zur.gew.	 agr	 wald1
 bbng1	 bod	 wald2
 bbng2	 grlnd	 wass

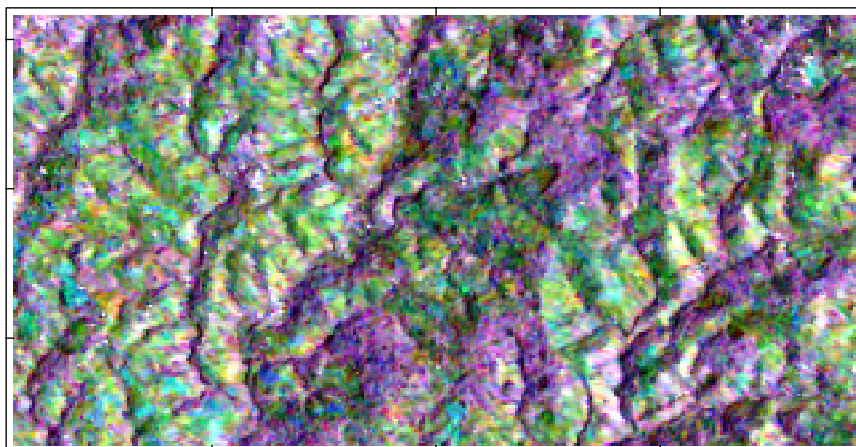


Abbildung A.5: Nachbarschaftsbasierte Reklassifikation und Mischpixeleliminierung.



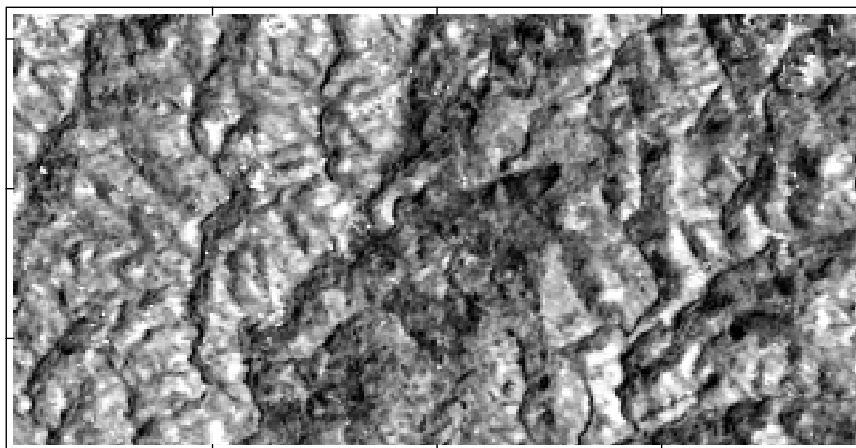
Simuliertes SAR-Bild

DGM 5
Decending Orbit



Multitemporales Intensitätskomposit

18.04.96 (R)
14.03.96 (G)
20.09.95 (B)



Erste Hauptkomponente

aus 4 PRI-Szenen

5638000

5636000

390000

393000

396000



Referenziert auf UTM-Zone 32 U
2 0 2 Kilometer

Abbildung A.6: Radiometrischer Reliefeffekt in den Intensitätsdatensätzen.

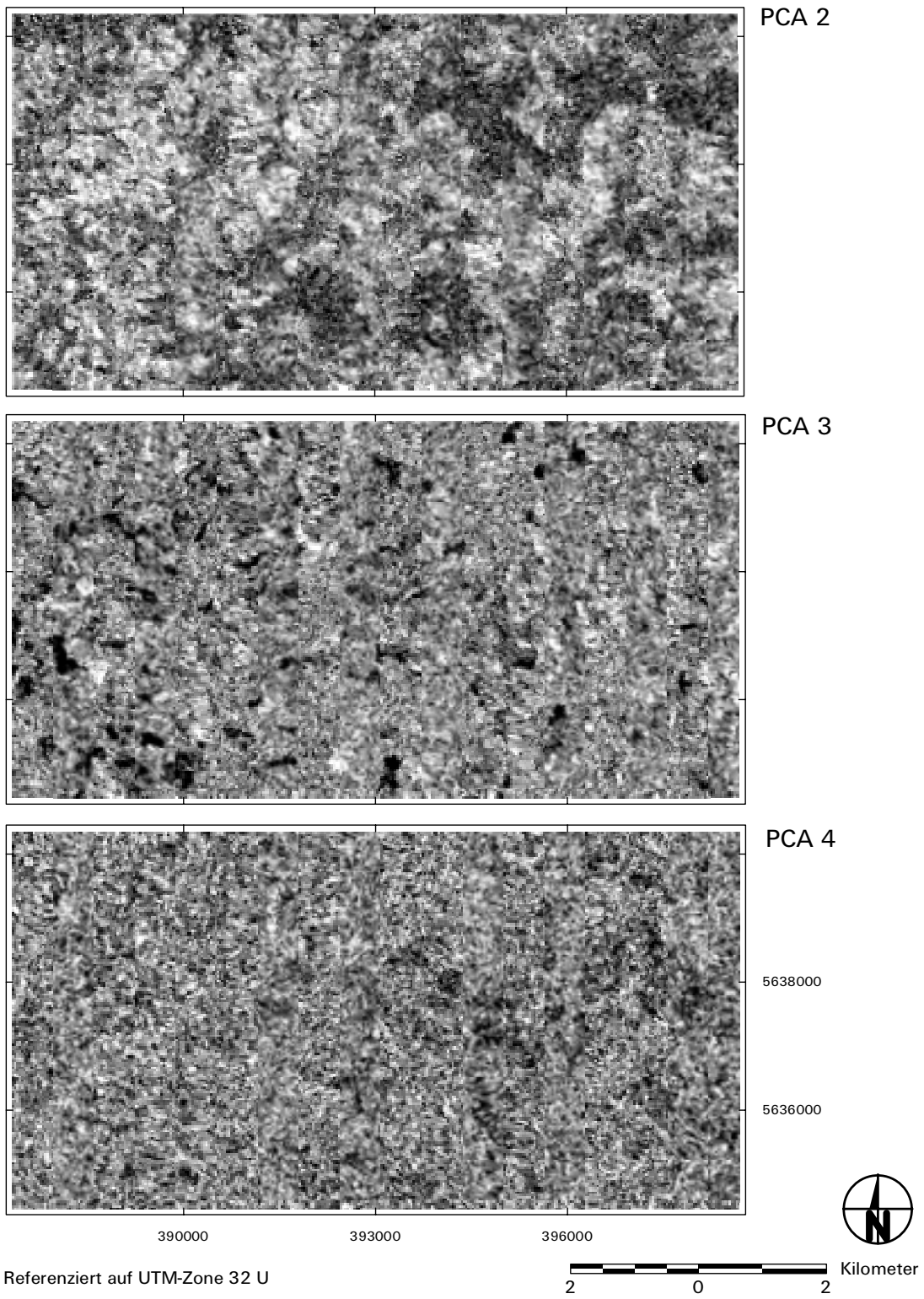
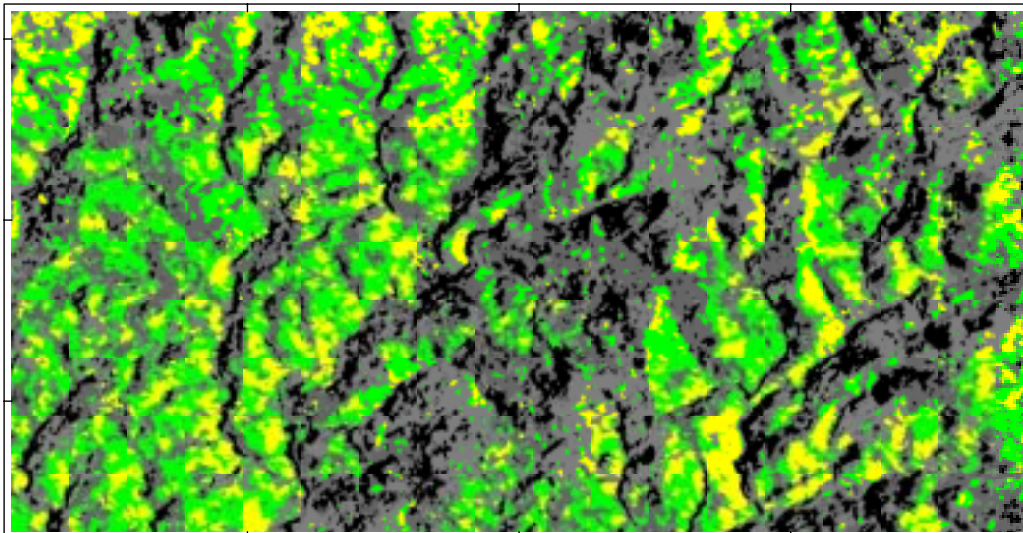


Abbildung A.7: Nachgeordnete Hauptkomponenten.

ISODATA-Klassifikation auf Grundlage multitemporaler Intensitätsinformation



ISODATA-Klassifikation auf Grundlage der Hauptkomponenten 2, 3, 4

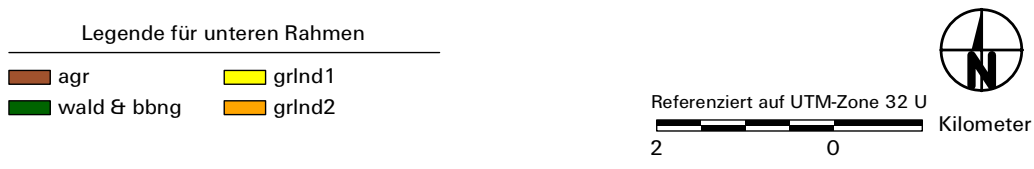
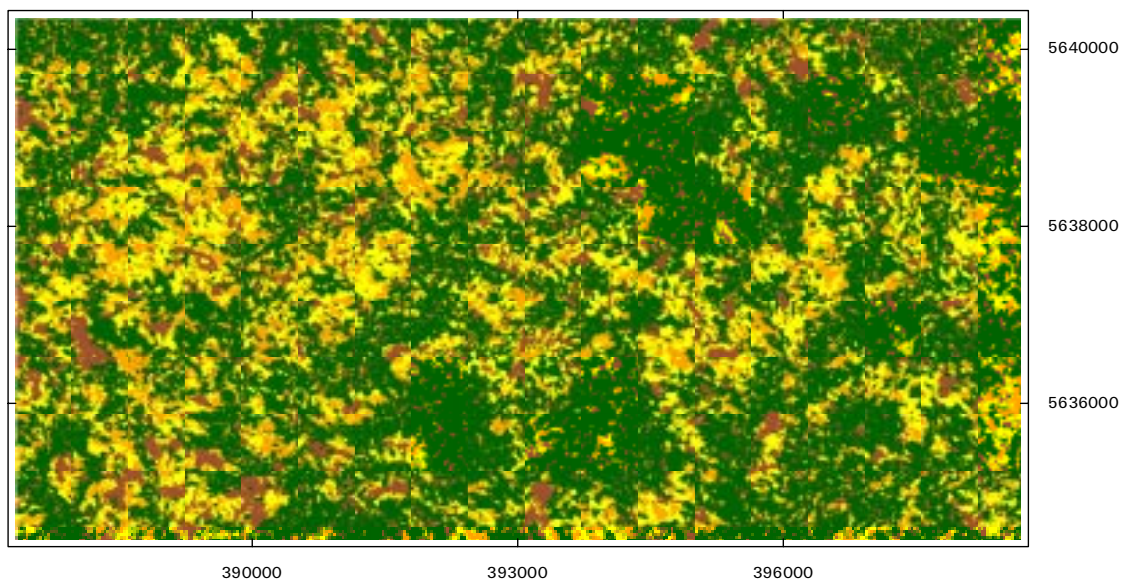


Abbildung A.8: ISODATA-Klassifikationsergebnisse auf Grundlage unterschiedlicher Eingangsdaten.

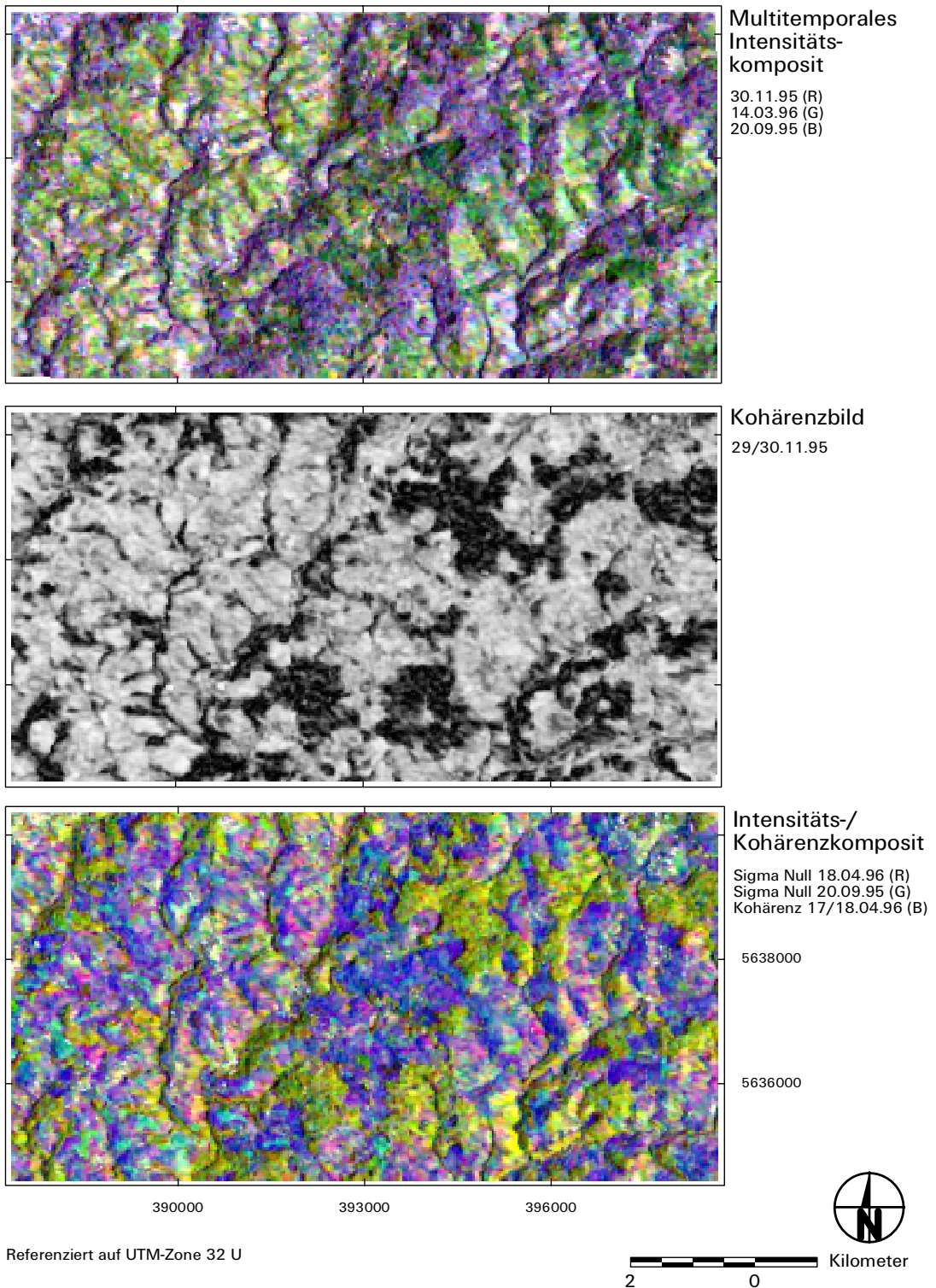


Abbildung A.9: Komplementärer Charakter von Intensitäts- und Kohärenzinformation.

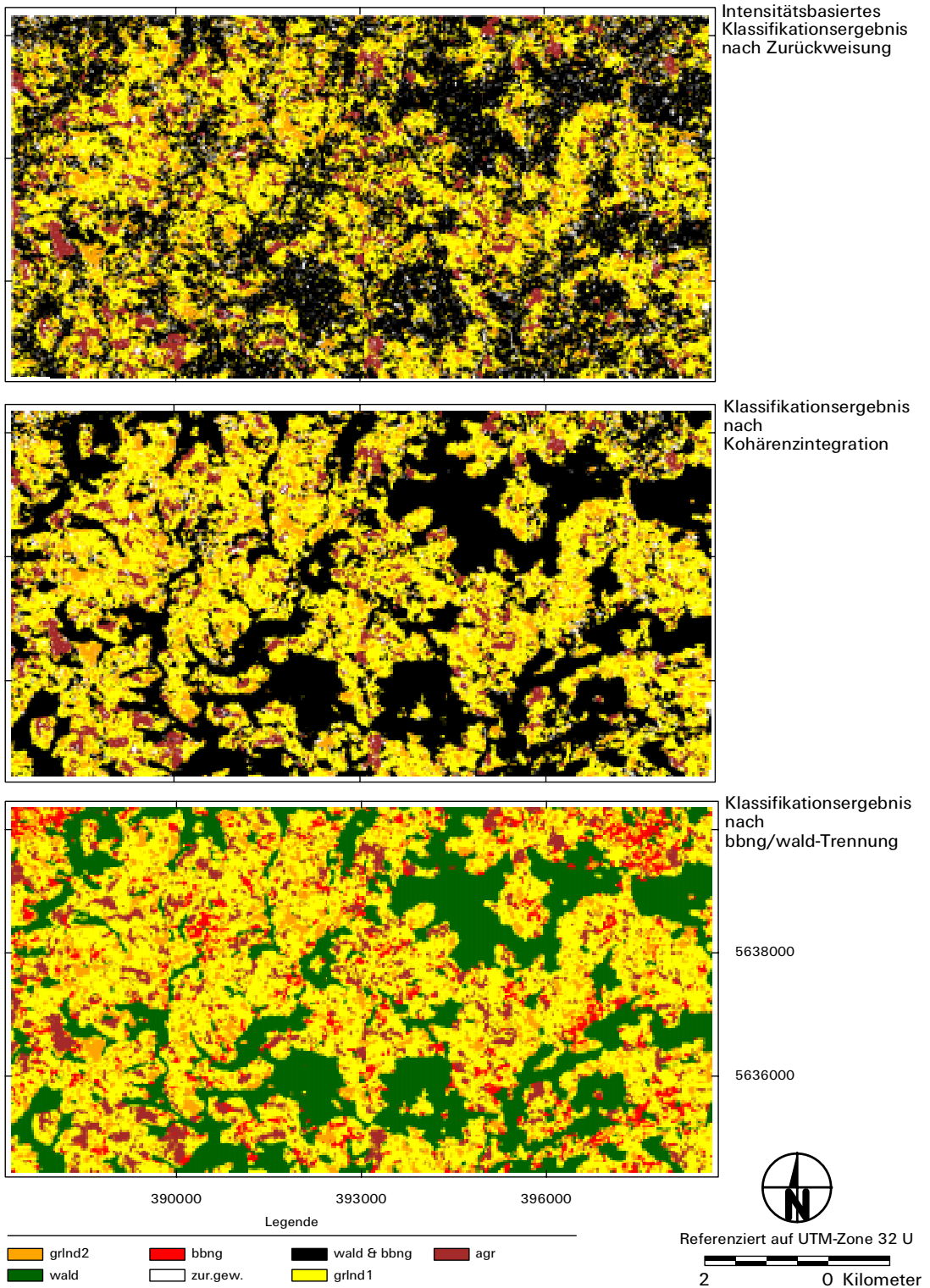


Abbildung A.10: SAR-Klassifikationsergebnisse in unterschiedlichen Stadien der Nachbearbeitung.

Anhang B

Arbeitsablauf einer relativen Referenzierung zweier ERS SLC Tandem-Datensätze

Im folgenden werden die Arbeitsschritte zur relativen Referenzierung eines ERS-1/2 SLC-Tandempaares in tabellarischer Form am Beispiel des Szenenpaares 20.09.1995/21.09.1995 beschrieben. Die Ein- und Ausgabereporte der PCI-INSAR Funktionen:

- ORBCAL (Berechnungen zur Synchronisation der Orbits von ERS-1 und ERS-2),
- REFPHA (Berechnung der Referenzphase),
- CORREL (Berechnung der Parameter zur Grobanpassung und Qualitätsabschätzung) und
- REGPA (Berechnung der Parameter zur Feinanpassung der Datensätze)

werden zusammenfassend vorgestellt, um die in Kapitel 5.3.2 nur überblickshaft beschriebene Prozessierung in ihrem Ablauf zu verdeutlichen.

ORBCAL: Orbit Calculation

SEGMENT HEADER		
S-TYPE Segment type		SAO
ORBCAL parameter: TFIW	0, 0, 2500, 14054	
ORBCAL parameter: IFPAUX		4, 5
ORBCAL parameter: IFPPRC		
ORBCAL parameter: ORDER		3
ORBCAL parameter: ORBITD		D-PAF
ORBCAL parameter: EARTH0		D000
ORBCAL parameter: PHASIGN		NEG
ORBCAL parameter: OISYNC		REFPOINT

TAPE OR FILE INPUT WINDOW		
S-XOFF Tape or file input window x-offset		0
S-YOFF Tape or file input window y-offset		0
S-XSIZ Tape or file input window x-size		2500
S-YSIZ Tape or file input window y-size		14054

WINDOW CORNER COORDINATES		
S-ULLA Upper left corner latitude in deg		51.0468403
S-ULLO Upper left corner longitude in deg		7.8904334
S-URLA Upper right corner latitude in deg		51.1561065
S-URLO Upper right corner longitude in deg		7.1392302
S-LLLA Lower left corner latitude in deg		50.5580664
S-LLLO Lower left corner longitude in deg		7.7041512
S-LRLA Lower right corner latitude in deg		50.6666882
S-LRLO Lower right corner longitude in deg		6.9613143

RESOLUTION	
S-INC1 Incidence angle 1 (image center) in deg	21.532
S-SRPS Slant range pixel spacing in m	7.9050000
Ground range pixel spacing in m	21.5382881
S-AZLS Azimuth line spacing in m	3.9730000
OFFSET BETWEEN IMAGE 1 AND IMAGE 2	
S-POFX Expected pixel offset	-4
S-LOFY Expected line offset	131
BASELINE (WINDOW CENTER)	
S-BPAR Baseline parallel component in m	38.288
S-BPER Baseline perpendicular component in m	149.563
PHASE SIGN	
S-PSGN Sign of phase function (default is NEG)	NEG
FRINGE FREQUENCY (WINDOW CENTER)	
S-FRAN Expected fringe frequency in range in MHz	-2.373277
S-FAZI Expected fringe frequency in azimuth in Hz	-2.06847
Expected fringe period in range in pixels	-7.988955
Expected fringe period in azimuth in pixels	-811.5717
SAR SYSTEM FREQUENCIES AND WAVELENGTH	
S-SFR1 Sampling frequency in range 1 in MHz	18.96
S-SFR2 Sampling frequency in range 2 in MHz	18.96
S-BWR1 Bandwidth in range 1 in MHz	15.55
S-BWR2 Bandwidth in range 2 in MHz	15.55
S-PRF1 Pulse repetition frequency 1 in Hz	1678.712
S-PRF2 Pulse repetition frequency 2 in Hz	1678.712
S-PBW1 Processed bandwidth in azimuth 1 in Hz	1378
S-PBW2 Processed bandwidth in azimuth 2 in Hz	1378
S-WAV1 Wavelength in m	0.056666
DOPPLER CENTROID FREQUENCIES	
S-FD10 Doppler centroid frequency 1 (const) in Hz	465.088
S-FD20 Doppler centroid frequency 2 (const) in Hz	305.714
Doppler centroid freq. difference (const)	159.374
Usable bandwidth in azimuth in Hz	1218.626
LOCAL ELLIPSOID	
S-EMAA Ellipsoid semimajor axis in m	6378137.0000000
S-EMIA Ellipsoid semiminor axis in m	6356752.3142450
ORBIT 1 SYNCHRONIZATION	
Azimuth time of reference point 1 (timeframe)	4.73394732152
Azimuth time of reference point 1 (ref point)	4.74495461249
Azimuth time difference in sec	-0.0110072909717
Azimuth time offset (between image and orbit)	0.0110072909717
Range distance of ref point 1 (timeframe)	843963.227063
Range distance of ref point 1 (ref point)	843975.513899
Range distance difference in m	-12.286836775
ORBIT 2 SYNCHRONIZATION	
Azimuth time of reference point 2 (timeframe)	4.65358606837
Azimuth time of reference point 2 (ref point)	4.6601196275
Azimuth time difference in sec	-0.00653355913029
Azimuth time offset (between image and orbit)	0.00653355913029
Range distance of ref point 2 (timeframe)	843963.227063
Range distance of ref point 2 (ref point)	843958.886693
Range distance difference in m	4.34037015506
ORBIT 1 TIME AND RANGE WINDOW FRAME	
S-ATF1 Azimuth time of first window line in sec	0.559007290972
Azimuth time of last window line in sec	8.93090193401
S-ASP1 Azimuth time increment for one line in sec	0.000595694794581
S-RDF1 Range distance of first window pixel in m	834081.977063
Range distance of last window pixel in m	853844.477063
S-RSP1 Range distance increment for one pixel in m	7.905
ORBIT 2 TIME AND RANGE WINDOW FRAME	
S-ATF2 Azimuth time of first window line (1. pixel)	0.557700645784
Azimuth time of last window line (1. pixel)	8.92955007295

POLYNOMIAL ORBIT 1	
S-OTY1 Orbit type	DESCENDING
S-MXS1 Expected mirror axis	VERT
S-ORD1 Order of polynomial	3
S-C10X Polynomial coefficient 0 x	4479577.03465
S-C10Y Polynomial coefficient 0 y	895104.991322
S-C10Z Polynomial coefficient 0 z	5509591.28854
S-C11X Polynomial coefficient 1 x	5890.26513823
S-C11Y Polynomial coefficient 1 y	-936.035922213
S-C11Z Polynomial coefficient 1 z	-4626.02254313
S-C12X Polynomial coefficient 2 x	-2.48650977762
S-C12Y Polynomial coefficient 2 y	-0.913719743714
S-C12Z Polynomial coefficient 2 z	-2.99603315549
S-C13X Polynomial coefficient 3 x	-0.00104951639478
S-C13Y Polynomial coefficient 3 y	0.000370419160036
S-C13Z Polynomial coefficient 3 z	0.000864307405421

POLYNOMIAL ORBIT 2	
S-OTY2 Orbit type	DESCENDING
S-MXS2 Expected mirror axis	VERT
S-ORD2 Order of polynomial	3
S-C20X Polynomial coefficient 0 x	4479595.8045
S-C20Y Polynomial coefficient 0 y	894954.090797
S-C20Z Polynomial coefficient 0 z	5509616.85877
S-C21X Polynomial coefficient 1 x	5890.23788873
S-C21Y Polynomial coefficient 1 y	-936.252717816
S-C21Z Polynomial coefficient 1 z	-4625.98894352
S-C22X Polynomial coefficient 2 x	-2.48537581514
S-C22Y Polynomial coefficient 2 y	-0.911829818757
S-C22Z Polynomial coefficient 2 z	-2.99603314977
S-C23X Polynomial coefficient 3 x	-0.00111125320921
S-C23Y Polynomial coefficient 3 y	0.000246946530751
S-C23Z Polynomial coefficient 3 z	0.00086430704194

INTERNAL PARAMETERS	
S-TR2L Lower time range for orbit 2 in sec	-2
S-TR2U Upper time range for orbit 2 in sec	11.524
S-RF1X Reference point 1 x in m	4000462.6214993
S-RF1Y Reference point 1 y in m	520073.1515641
S-RF1Z Reference point 1 z in m	4923733.0921097

REFPHA: Calculate Reference Phase

SEGMENT HEADER	
P-TYP Segment type	RPS
REFPHA parameter: RPSIW.	
REFPHA parameter: IFPSAO	3
REFPHA parameter: IFPBML	
REFPHA parameter: PMODEL ELLP	SAO
REFPHA parameter: PVALUE	
REFPHA parameter: ORDER	5

SEGMENT DATA

SEGMENT DATA	
P-PMO Output parameter model	POLYNOMIAL
P-TSX Tape or file window size (x)	2500
P-TSY Tape or file window size (y)	14054
P-ROX RPS window offset (x)	0
P-ROY RPS window offset (y)	0
P-RSX RPS window size (x)	2500
P-RSY RPS window size (y)	14054
P-DTX Sampling interval (x)	1
P-DTY Sampling interval (y)	1
P-NOX Internal integer offset (x)	0
P-NOY Internal integer offset (y)	0
P-SGN Sign of phase function	NEG
P-ORD Order of polynomial	5
P-NCO Number of coefficients	21
Polynomial fit in percent	99.9999795029
Root mean square error	0.0002526715
P-C00 Polynomial coefficient	0.000476674267281
P-C01 Polynomial coefficient	0.887805865152
P-C02 Polynomial coefficient	0.00919458648684
P-C03 Polynomial coefficient	-4.97413657876E-05
P-C04 Polynomial coefficient	6.3718547087E-07
P-C05 Polynomial coefficient	-1.01500747591E-07
P-C06 Polynomial coefficient	4.31686475264E-09
P-C07 Polynomial coefficient	-2.8888514122E-11
P-C08 Polynomial coefficient	-2.86985633503E-12
P-C09 Polynomial coefficient	4.0895353381E-12
P-C10 Polynomial coefficient	-4.15978131353E-13
P-C11 Polynomial coefficient	1.63968157209E-15
P-C12 Polynomial coefficient	1.49587089335E-16
P-C13 Polynomial coefficient	1.25577974323E-16
P-C14 Polynomial coefficient	1.11763660508E-18
P-C15 Polynomial coefficient	2.64715164449E-17
P-C16 Polynomial coefficient	-7.65284220678E-20
P-C17 Polynomial coefficient	-1.39503201596E-21
P-C18 Polynomial coefficient	-6.10966233234E-21
P-C19 Polynomial coefficient	-1.57370557928E-23
P-C20 Polynomial coefficient	-6.24496654257E-25

CORREL: Correlation and Offset Estimation

INPUT DATA

FIL11	/home7/c5makl/slc/0995stand/slc2009.pix
FIL12	/home7/c5makl/slc/0995stand/slc2109.pix
DBIC1	1, 2
DBIC2	1, 2
DBIW1	1400, 9000, 412, 412
IFORM	RE&IM
INIOF (or default)	-4, 131, 50, 50

RESULT

PREF (reference point)	1606.0, 9206.0
OFFST (offset vector)	-5, 123
FINE parameter: IFPRPS	6
FINE parameter: IFPOVS	7
FINE parameter: CHIW	0, 0, 2500, 14036
FINE parameter: CHSZ	64, 256
FINE parameter: CHNO	11, 11
FINE parameter: IPA (or def)	6, 4
FINE parameter: OVSMP	OFF
FINE parameter: ALGO	CFIT

SEGMENT DATA

O-CSX Chip size (x)	64
O-CSY Chip size (y)	256
O-CNX Chip number (x)	11
O-CNY Chip number (y)	11
O-OVP Oversampling	OFF
Quality Mean	0.36389
Root mean square error (x)	0.59128
Root mean square error (y)	0.28454

REGPA: Registration Parameters

SEGMENT HEADER

R-TYP Segment type	REG
REGPA parameter: IFPOVS	7
REGPA parameter: TVAL	
REGPA parameter: PMODEL	POLY2

SEGMENT DATA

R-PMO Parameter model	POLYNOMIAL
R-NPI Number of input points	121
R-NPO Number of output/used points	121
R-RMX Root mean square error (x)	0.044110
R-RMY Root mean square error (y)	0.041823
R-ORD Order of polynomial	2
R-NCX Number of coefficients (x)	6
R-NCY Number of coefficients (y)	6
R-A00 Polynomial coefficient (x)	1.10740559563
R-A01 Polynomial coefficient (x)	0.999431207691
R-A02 Polynomial coefficient (x)	2.19388065232E-06
R-A03 Polynomial coefficient (x)	-9.09897866229E-10
R-A04 Polynomial coefficient (x)	4.31088462158E-08
R-A05 Polynomial coefficient (x)	-4.31156585236E-10
R-B00 Polynomial coefficient (y)	0.0920821284323
R-B01 Polynomial coefficient (y)	9.66110097019E-05
R-B02 Polynomial coefficient (y)	0.999998511625
R-B03 Polynomial coefficient (y)	-6.34607171677E-10
R-B04 Polynomial coefficient (y)	2.36408951346E-08
R-B05 Polynomial coefficient (y)	1.27590862658E-10

Anhang C

Abkürzungen

AMI	Active Microwave Instrument
AOI	Area of Interest
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar (Instrument auf ENVISAT-1)
ASCAS	Alpine Snow Cover Analysis System
ATSR	Along-Track Scanning Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CASI	Compact Airborne Spectrographic Imager
CCRS	Canada Centre for Remote Sensing
CHIRP	Coherent Integration of Radar Pulses
CIR	Colour Infrared
DBMS	Database Management System
DGM	Digitales Geländemodell
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMSP	Defense Meteorological Satellite Program
DWD	Deutscher Wetterdienst
EASI	Engineering Analysis and Scientific Interface
EML	Erdas Macro Language
ENVISAT	Environmental Satellite
ERS	European Remote-Sensing Satellite
ESA	European Space Agency
ESAR	Experimental Synthetic Aperture Radar
ETM	Enhanced Thematic Mapper
GEC	Ellipsoid Geocoded Image
GEM6	Goddard Earth Model 6
GIS	Geographisches Informationssystem
GK	Gauß-Krüger
GMS	Geostationary Meteorological Satellite
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment
GTC	Geocoded Terrain Corrected Image
HRU	Hydrological Response Unit
HRV	High Resolution Visible
HSPF	Hydrological Simulation Program Fortran
IEM	Integral Equation Model
IGPF	Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (= ISPRS, s.u.)
IHDM	Institute of Hydrology Distributed Model
IRS	Indian remote Sensing Satellite
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (= IGPF, s.o.)
InSAR	Interferometric SAR
JERS	Japanese Earth Remote Sensing Satellite
JM	Jeffries-Matusita

LAI	Leaf Area Index
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
LISS	Linear Imaging Self-Scanning Sensor
MIR	Mittleres Infrarot (= SWIR, s.u.)
ML	Maximum Likelihood
MLC	Maximum Likelihood Classification
MMS	Modular Modelling System
MORA	Multitemporal Optimal Resolution Approach
MSS	Multispectral Scanner
NASIM	Niederschlag-Abfluß-Simulationsmodell
nB	nördliche Breite
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Nahes Infrarot
NN	Neuronales Netz, Neural Net
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
öL	östliche Länge
OMS	Object Modeling System
PAF	Processing and Archiving Facility
PC	Principal Component
PCA	Principal Components Analysis
PCT	Principal Components Transform
PRARE	Precise Range and Range-rate Equipment
PRI	Precision Image
PRMS	Precipitation-Runoff Modeling System
RA	Radar Altimeter
RADAR	Radio Detection And Ranging
RAR	Real Aperture Radar
RBV	Return Beam Vidicon
REA	Representative Elementary Area
RMS	Root Mean Square
ROSIS	Reflective Optics System Imaging Spectrometer
SAR	Synthetic Aperture Radar
SAVI	Soil-Adjusted Vegetation Index
SCU	Snow Cover Unit
SFB	Sonderforschungsbereich
SHE	Systeme Hydrologique Europeen
SIR	Shuttle Imaging Radar
SLAR	Side Looking Airborne Radar
SLC	Single Look Complex Image
SML	Spatial Modeler Language
SPANS	Spatial Analysis System
SPOT	Systeme Probatoire d'Observation de la Terre
SR	Simple Ratio
SRM	Snowmelt Runoff Model
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSM/I	Special Sensor Microwave Imager
StAWA	Staatliches Amt für Wasser und Abfall
SWE	Snow Water Equivalent
SWIR	Short Wave Infrared (= MIR, s.o.)
TIR	Thermales Infrarot
üNN	über Normalnull
VIS/IR	visible/infrared
WiFS	Widefield Sensor

Literaturverzeichnis

- [1] M.B. Abbott. An Introduction to the European Hydrological System–Systeme Hydrologique European, SHE.1: History and Philosophy of a Physically-Based Distributed Modelling System. *Journal of Hydrology*, 87:45–59, 1986. [4](#), [5](#)
- [2] M.B. Abbott. An Introduction to the European Hydrological System–Systeme Hydrologique European, SHE.2: Structure of a Physically-Based Distributed Modelling System. *Journal of Hydrology*, 87:61–77, 1986. [4](#), [5](#)
- [3] J. Adinarayana & N. Rama Krishna. Integration of Multi-Seasonal Remotly-Sensed Images for Improved Landuse Classification of a Hilly Watershed Using Geographical Information Systems. *International Journal of Remote Sensing*, 17(9):1679–1688, 1996. [18](#)
- [4] R.F. Adler et al. Estimation of Monthly Rainfall over Japan and Surrounding Waters from a Combination of Low-Orbit Microwave and Geosynchronous IR Data. *J. Appl. Meteor.*, 32:335–356, 1993. [16](#)
- [5] N. Al-Rousan et al. Automated DEM Extraction and Orthoimage Generation from SPOT Level 1 B Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(8):965–974, 1997. [13](#)
- [6] J. Albertz. *Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern: Eine Einführung in die Fernerkundung*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1991. [26](#), [29](#), [30](#)
- [7] G.A. Allen. Standard Reference Evapotranspiration Calculations: REF–ET. In *Proceedings of the Irrigation and Drainage Sessions at Water Forum 1992*, pp. 140–145, Baltimore, 1992. [6](#)
- [8] P. Aplin, P.M. Atkinson & P.J. Curran. Identifying Missing Field Boundaries to Increase the Accuracy of Per-Field Classification of Fine Spatial Resolution Satellite Sensor Imagery. In *Proceedings of the 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 399–402, Tromsø, 1998. [18](#)
- [9] E. Auquiere et al. ERS SAR Time Series Analysis for Maize Monitoring Using Experimental and Modeling Approaches. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. [8](#), [8](#)
- [10] N. Baghdadi, Y. Gauthier & M. Bernier. Capability of Multitemporal ERS-1 SAR Data for Wet-Snow Mapping. *Remote Sensing of Environment*, 60:174–186, 1997. [14](#)
- [11] H.-P. Bähr & T. Vögtle. *Digitale Bildverarbeitung*. Wichmann, Karlsruhe, zweite Auflage, 1991. [23](#)
- [12] P.M. Barbosa, M.A. Casterad & J. Herrero. Performance of Several Landsat 5 Thematic Mapper (TM) Image Classification Methods for Crop Extent Estimates in an Irrigation District. *International Journal of Remote Sensing*, 17(18):3665–3674, 1996. [8](#)
- [13] E.C. Barrett. Satellite Rainfall Monitoring: Recent Progress and Remaining Problems. In M.F. Baumgartner, G.A. Schultz & A.I. Johnson, editors, *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems*, pp. 141–148. IAHS Publication no. 242, 1997. [16](#), [16](#), [16](#)
- [14] H. Basler. *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung und statistischen Methodenlehre*. Physica-Verlag, Würzburg, Wien, 1968. [55](#)

- [15] B. Battrick. ERS User Handbook. *ESA Publications Division*, SP-1148, Rev. 1, 1993. 24
- [16] M.F. Baumgartner & G.M. Apfl. Remote Sensing, Geographic Information Systems and Snowmelt Runoff Models - An Integrated Approach. In M.F. Baumgartner, G.A. Schultz & A.I. Johnson, editors, *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems*, pp. 73–82. IAHS Publication no. 242, 1997. 7, 14
- [17] T. Bayer. Korrektur reliefbedingter radiometrischer Verzerrungen in geocodierten Seasat-A SAR-Bildern am Beispiel des Szenenausschnittes Bonn und Umgebung. *DLR-Forschungsbericht*, DLR-FB 90-54, 1990. 25, 25, 26, 26, 27, 27, 28, 29, 29, 29, 30, 30, 30, 31, 32, 103
- [18] T. Bayer & M. Hilz. Erfassung der kommunalen Flächenversiegelung und Flächennutzung aus hochauflösenden Fernerkundungsdaten. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 65(5-6):158–163, 1997. 8
- [19] A. Becker. Methodische Aspekte der Regionalisierung. *Senatskommission für Wasserforschung*, DFG Mitteilung XI:16–31, 1992. 4
- [20] T. Behl. Untersuchungen zur Stoffverlagerung in der Siegtalaue bei Hennef. Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1994 (unveröffentlicht). 44
- [21] T. Behl et al. Wasser- und Stickstofftransportdynamik in der Bodenzone. *Wasser & Boden*, 48(10):47–51, 1996. 45
- [22] A.S. Belward & J.C. Taylor. The Use of Multitemporal Landsat Data for Improving Crop Mapping Accuracy. In *Symposium of Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management*, pp. 381–386, Enschede, 1986. 8
- [23] M. Benallegue et al. The Use of Radar Backscattering Signals for Measuring Soil Moisture and Surface Roughness. *Remote Sensing of Environment*, 53:61–68, 1995. 11
- [24] U. Bende. Abgrenzung von landnutzungsspezifischen „Chemical Response Units (CHRU's)“ unter Verwendung eines GIS zur Regionalisierung der Stoffdynamik im Einzugsgebiet der Bröl. Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1994 (unveröffentlicht). 42, 43, 44, 85
- [25] U. Bende. Regional Hydrochemical Modelling by Delineating Chemical Hydrological Response Units (CHRUs). In *Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation MODSIM 95*, pp. 233–238, Newcastle, Australia, 1995. 45
- [26] U. Bende. Regional Hydrochemical Modelling by Delineation of Chemical Hydrological Response Units (CHRUs) within a GIS: An Approach of Observing Man-Made Impacts in the Bröl River Catchment (Germany). *Mathematics and Computers in Simulation*, 43:305–312, 1997. 4
- [27] M.A. Beran et al. Regionalization in Hydrology. In *Proceedings of the Ljubljana Symposium*, volume 191. IAHS, 1990. 4
- [28] K.J. Beven. Distributed Models. In M.G. Anderson et al., editors, *Hydrological forecasting*, pp. 405–435. Wiley & Sons, 1985. 4
- [29] K.J. Beven. The Institute of Hydrology Distributed Model. Technical Report 98, Wallingford Institute of Hydrology, 1987. 4
- [30] K.J. Beven & M.J. Kirkby. A Physically-Based Variable Contribution Area Model of Catchment Hydrology. *Hydrological Science Bulletin*, 24:43–69, 1979. 4
- [31] K.J. Beven & I.D. Moore, editors. *Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology*. Wiley & Sons, Chichester, 1993. 49
- [32] G. Blöschl, R.B. Grayson & M. Sivapalan. On the Representative Elementary Area Concept and its Utility for Distributed Rainfall-Runoff Modelling. *Hydr. Proc.*, 9:313–330, 1995. 4

- [33] K. Blyth, D.S. Biggin & R. Ragab. ERS-1 SAR for Monitoring Soil Moisture and River Flooding. In *Proceedings of the Second ERS-1 Symposium*, pp. 839–844, Hamburg, 1993. 15
- [34] K. Bongartz. Geohydrologische Niederschlags-Abflußmodellierung eines Teileinzugsgebietes der Sieg (Sülz) mit dem Modell MMS/PRMS unter Verwendung eines GIS. Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1996 (unveröffentlicht). 4, 44, 45, 54, 65
- [35] M. Borgeaud & U. Wegmüller. On the Use of ERS SAR Interferometry for the Retrieval of Geo- and Bio-Physical Information. In *Proceedings of the ERS SAR Interferometry Workshop FRINGE*, Zürich, 1996. 32
- [36] B. Brisco & R.J. Brown. Multidate SAR/TM Synergism for Crop Classification in Western Canada. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(8):1009–1014, 1995. 18
- [37] K. Bronsveld et al. The Use of Local Knowledge in Land Use/Land Cover Mapping from Satellite Images. *ITC Journal*, 4:349–358, 1994. 18
- [38] R.J. Brown et al. Multi-Temporal ERS-1 for Crop Discrimination. In *Proceedings of the Second ERS-1 Symposium*, pp. 57–62, Hamburg, 1993. 8
- [39] L. Bruzzone, C. Conese, F. Maselli et al. Multisource Classification of Complex Rural Areas by Statistical and Neural-Network Approaches. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(5):523–533, 1997. 18
- [40] D.H. Card. Using Known Map Category Marginal Frequencies to Improve Estimates of Thematic Map Accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(3):431–439, 1982. 76
- [41] G.E. Carlson & W.J. Ebel. Co-Occurrence Matrices for Small Region Texture Measurement and Comparison. *International Journal of Remote Sensing*, 16(8):1417–1423, 1995. 17
- [42] T.N. Carlson & D.A. Ripley. On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. *Remote Sensing of Environment*, 62:241–252, 1997. 9
- [43] I. Champion. Simple Modelling of Radar Backscattering Coefficient over a Bare Soil: Variation with Incidence Angle, Frequency and Polarization. *International Journal of Remote Sensing*, 17(4):783–800, 1996. 27, 30
- [44] N.S. Chauhan. Soil Moisture Estimation under a Vegetation Cover: Combined Active Passive Microwave Remote Sensing Approach. *International Journal of Remote Sensing*, 18(5):1079–1097, 1997. 11
- [45] K.S. Chen et al. A Simple Model for Retrieving Bare Soil Moisture from Radar-Scattering Coefficients. *Remote Sensing of Environment*, 54:121–126, 1995. 11
- [46] K.S. Chen, W.L. Kao & Y.C. Tzeng. Retrieval of Surface Parameters Using Dynamic Learning Neural Network. *International Journal of Remote Sensing*, 16(5):801–809, 1995. 18
- [47] K.S. Chen, Y.C. Tzeng, C.F. Chen et al. Land-Cover Classification of Multispectral Imagery Using a Dynamic Learning Neural Network. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(4):403–408, 1995. 18, 18
- [48] D. Civco. Topographic Normalization of Landsat Thematic Mapper Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(9):1303–1309, 1989. 61
- [49] J.D. Colby. Topographic Normalization in Rugged Terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(5):531–537, 1991. 61
- [50] J.E. Conel. Determination of Surface Reflectance and Estimates of Atmospheric Optical Depth and Single Scattering Albedo from Landsat Thematic Mapper Data. *International Journal of Remote Sensing*, 11(5):783–828, 1990. 57

- [51] F.J. Cortijo & N. Perez De La Blanca. A Comparative Study of some Non-Parametric Spectral classifiers. Application to Problems with High Overlapping Training Sets. *International Journal of Remote Sensing*, 18(6):1259–1275, 1997. 17, 17
- [52] S.N. Coulson. An Overview of FRINGE96 ERS SAR Interferometry Workshop. *Earth Observation Quarterly*, 54:1–4, 1996. 32
- [53] S.A.O. Cousins & W. Arnberg. Criteria for Vegetation Interpretation and their Relationship to Digital Classifications at Different Resolutions. In *Proceedings of the 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 436–440, Tromsø, 1998. 17
- [54] N.H. Crawford & R. Linsley. Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. Technical Report 39, Stanford Univ., Dept. of Civil Engineering, 1966. 3
- [55] E.P. Crist & R.C. Cicone. A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data – The Tasseled Cap. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-22:256–263, 1984. 59
- [56] B. Cyffka, G. Gerold & K.-H. Pörtge. Möglichkeiten der Regionalisierung von Wasser- und Stoffhaushaltsuntersuchungen. *Erdkunde*, 45:220–227, 1991. 4
- [57] K. Daamen. Das hydrologische Flußeinzugsgebietsmodell HSPF und seine Anwendung im Einzugsgebiet der Bröl. Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1993 (unveröffentlicht). 6, 42, 43, 43, 44
- [58] F.M. Danson & S.E. Plummer. Red-Edge Response to Forest Leaf Area Index. *International Journal of Remote Sensing*, 16(1):183–188, 1995. 8
- [59] O. David. A Java-Based Object-Oriented Modeling System Architecture. In *Proc. of the IASTED/ISMM International Conference on Modelling and Simulation*, pp. 198–202, Pittsburgh, 1997. IASED/ACTA PRESS. 5
- [60] O. David. Applied Object-Oriented Modeling in Hydrology: Modeling System Design Aspects. In *Proc. IASTED International Conference on Applied Modelling and Simulation*, pp. 56–60, Banff, 1997. 5
- [61] O. David. Next Generation of Modelling Systems in Hydrology: System Design Challenges. In *Conference Proc. of the 15th IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics*, pp. 21–26, Berlin, 1997. 5
- [62] O. David et al. Objektorientierte Datenbanken in der Hydrologie: Anwendungsbeispiel OMS. In W. Geiger et al., Hrsg., 11. *Internationales Symposium der Gesellschaft für Informatik*, Band 1. Metropolis Verlag, Straßbourg, Marburg, 1997. 4
- [63] V. De Cauwer & R. De Wulf. Potential Use of ERS.SAR Data to Discriminate Natural and Degraded Woody Vegetation Types in Central Africa. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 8
- [64] F. De Grandi. Global Rain Forest Mapping for the TREES-GRFM Project Using the ERS and JERS SAR Sensors: An Overview and Preliminary Results over the African Continent. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 8
- [65] D. De Sève et al. Spatio-Temporal Analysis of Microwave Radiometry of Snow Cover with SSM/I Data in a Taiga Area. In *Proceedings of the 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 383–386, Tromsø, 1998. 14
- [66] G.C. Deane & P.N. Churchill. Mapping Land Cover Types in England and Wales Using Landsat Thematic Mapper Imagery. In *Proceedings of the 19th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 633–641, Ann Arbor, 1985. 7
- [67] M.C. Dobson et al. Land-Cover Classification and Estimation of Terrain Attributes Using Synthetic Aperture Radar. *Remote Sensing of Environment*, 51:199–214, 1995. 7

- [68] Y. Dong & B. Forster. Understanding of Partial Polarization in Polarimetric SAR Data. *International Journal of Remote Sensing*, 17(12):2467–2475, 1996. 28
- [69] Y. Dong, B. Forster & C. Ticehurst. Radar Backscatter Analysis for Urban Environments. *International Journal of Remote Sensing*, 18(6):1351–1364, 1997. 9
- [70] Y. Dong, J.A. Richards & J. Cashman. A Model of Volume Attenuation and Backscattering by Foliage at L- and P-Bands. *International Journal of Remote Sensing*, 16(7):1231–1247, 1995. 31
- [71] N.H.W. Donker. Automatic Extraction of Catchment Hydrologic Properties from Digital Elevation Data. *ITC Journal*, 3:257–265, 199. 49
- [72] C. Dörffler. Landnutzungs-klassifikation auf der Grundlage von multispektralen und multitemporalen Bilddaten für das Bröleinzugsgebiet zur Weiterverarbeitung in einem GIS. Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1994 (unveröffentlicht). 23, 44, 45
- [73] P. Dornberg. Ermittlung des Gebietsniederschlags im Einzugsgebiet der Sieg. Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1992 (unveröffentlicht). 41, 41, 42, 44, 45
- [74] L. Du & J.S. Lee. Fuzzy Classification of Earth Terrain Covers Using Complex Polarimetric SAR Data. *International Journal of Remote Sensing*, 17(4):809–826, 1996. 18
- [75] G. Duchossois, G. Kohlhammer & P. Martin. Completion of the ERS TANDEM Mission. *Earth Observation Quarterly*, 52:1–2, 1996. 13, 22
- [76] G. Duchossois & P. Martin. ERS-1 and ERS-2 Tandem Operations. *Esa Bulletin*, 83:54–60, 1995. 8, 32, 40, 45
- [77] G. Duchossois & R. Zobl. ERS-2: A Continuation of the ERS-1 Success. *Esa Bulletin*, 83:10–11, 1995. 23
- [78] D. Ducrot et al. Classification and Fusion of Optical and Radar Satellite Data for Land Use Extraction. In *Proceedings of the Second International Conference Fusion of Earth Data*, Sophia Antipolis, 1998. 18
- [79] E.E. Ebert. *Results of the Third Algorithm Intercomparison Project (AIP-3) of the Global Precipitation Climatology Project (GPCP)*. BMRC Research Report no. 55, Australian Bureau of Meteorology, Melbourne, 1996. 16
- [80] C. Ehrler, K. Seidel & J. Martinec. Advanced Analysis of Snow Cover Based on Satellite Remote Sensing for the Assessment of Water Resources. In M.F. Baumgartner, G.A. Schultz & A.I. Johnson, editors, *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems*, pp. 93–102. IAHS Publication no. 242, 1997. 13
- [81] M. Eick. Grundwassermodellierung mit dem Modell GWMOBR im Einzugsgebiet des Grundwasserwerks Meindorf. Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1995 (unveröffentlicht). 44
- [82] C. Elachi. *Spaceborne Radar Remote Sensing - Applications and Techniques*. IEEE Press, New York, 1988. 25
- [83] W. Endlicher. Geographie von ganz oben – Entwicklungen und Perspektiven der Erderkundung mit Satelliten. *Geographische Rundschau*, 50(2):66–70, 1998. 123
- [84] W. Endlicher & W. Kirchhof. Die Nutzung von Landsat TM Daten bei der Inventur von Kiefernauaufforstungen in Mittelchile. In *Deutscher Geographentag Saarbrücken 1989: Tagungsbericht und wissenschaftliche Abhandlungen*, S. 106–109, Stuttgart, 1990. 8
- [85] M.E. Engdahl & J.M. Hyypä. Forest Inventory Using Interferometric SAR Techniques. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1996. 8

- [86] B.A. Engel. Methodologies for Development of Hydrological Response Units Based on Terrain, Land Cover, and Soil Data. In *Second International Conference/Workshop on Integrated Geographic Information Systems and Environmental Modelling Proceedings*, 1993. 4, 4
- [87] E.T. Engman. Soil Moisture, the Hydrologic Interface between Surface and Ground Waters. In M.F. Baumgartner, G.A. Schultz & A.I. Johnson, editors, *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems*, pp. 129–140. IAHS Publication no. 242, 1997. 10
- [88] E.T. Engman & N. Chauhan. Status of Microwave Soil Moisture Measurements with Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51:189–198, 1995. 10, 10
- [89] E.T. Engman & J.R. Gurney, editors. *Remote Sensing in Hydrology*. Chapman and Hall, London, 1991. 7
- [90] European Commission. *Centre for Earth Observation (CEO)*. Document reference: CEO/MGMT/5200/226. Directorate General XII, Science, Research and Development, Directorate D - Environment, 1997. 19
- [91] D.J. Evans, J.J. Plaut & E.R. Stofan. Overview of the Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar (SIR-C/X-SAR) Missions. *Remote Sensing of Environment*, 59:135–140, 1997. 32
- [92] L. Eymard & O. Taconet. The Methods for Inferring Surface Fluxes from Satellite Data, and their Use for Atmosphere Model Validation. *International Journal of Remote Sensing*, 16(11):1907–1930, 1995. 57
- [93] K. Fellah et al. Potential and Limitations of Multi-Temporal SAR Data in a Quantitative Approach for Multi-Scalar Hydrological Applications. Synthesis of ERS Alsace/Camargue Pilot Project. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 7
- [94] A. Ferretti, C. Prati & F. Rocca. Recent Advances in INSAR with ERS. In *Proceedings of the 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 800–804, Tromsø, 1998. 13, 32
- [95] T. Fiksel & R. Hartmann. DEM Extraction with the Shape-from-Shading Method Using ERS Scenes in the Antarctic. *GIS*, 7(1):23–28, 1994. 13
- [96] N. Floury, T. Le Toan, J.-C. Souyris et al. Interferometry for Forest Studies. In *Proceedings of the ERS SAR Interferometry Workshop FRINGE*, Zürich, 1996. 8
- [97] W.-A. Flügel. Delineating Hydrological Response Units by Geographical Information System Analyses for Regional Hydrological Modelling Using PRMS/MMS in the Drainage Basin of the River Bröl, Germany. *Hydrological Processes*, 9:423–436, 1995. 4, 42, 45, 45, 45
- [98] W.-A. Flügel. Hydrological Response Units (HRU's) as Modelling Entities for Hydrological River Basin Simulation and their Methodological Potential for Modelling Complex Environmental Process Systems.- Results from the Sieg Catchment. *Die Erde*, 127:43–62, 1996. 2, 3, 4, 4, 4, 5, 5, 5, 7, 37, 45, 45, 45, 54, 54, 65
- [99] W.-A. Flügel, T. Krawulski & R. Smith. Integrated Process Studies to Simulate Hillslope Hydrology and Interflow Dynamics Using the HILLS Model. In *MODSIM 97 International Congress on Modelling and Simulation*, pp. 572–577, Hobart, 1997. 45, 48
- [100] W.-A. Flügel, S. Luckhaus & H. Schöler. Wasserbilanzen, Stoffeintrag, Stofftransport und Wechselwirkungen und regionale Modellierung des hydrologischen Prozeßgefüges im Einzugsgebiet der Sieg. In *Geomorphologische Prozeßforschung und Landschaftsökologie im Bonner Raum*, Nummer 60 in Arbeiten zur Rheinischen Landeskunde, 1991. 43, 45
- [101] W.-A. Flügel & T. Lüllwitz. Using a Distributed Model with GIS for Comparative Hydrological Modelling of Micro- and Mesoscale Catchments in the U.S.A. and in Germany. In *Proceedings of the Symposium Macroscale Modelling of the Hydrosphere*, IAHS Publ. no. 214, Yokohama, 1993. 3, 4, 45

- [102] G.M. Foody. Using Prior Knowledge in Artificial Neural Network Classification with a Minimal Training Set. *International Journal of Remote Sensing*, 16(2):301–312, 1995. 18, 18
- [103] G.M. Foody. Approaches for the Production and Evaluation of Fuzzy Land Cover Classification from Remotely-Sensed Data. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7):1317–1340, 1996. 18
- [104] G.M. Foody & M.K. Arora. An Evaluation of some Factors Affecting the Accuracy of Classification by an Artificial Neural Network. *International Journal of Remote Sensing*, 18(4):799–810, 1997. 18
- [105] C.R. Francis et al. The ERS-2 Spacecraft and Its Payload. *Esa Bulletin*, 83:13–31, 1995. 23
- [106] M.A. Friedl & C.E. Brodley. Decision Tree Classification of Land Cover from Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, 61:399–409, 1997. 18
- [107] V.S. Frost et al. A Model for Radar Images and its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 4(2):157–166, 1982. 88
- [108] R.M. Fuller, G.B. Groom & A.R. Jones. The Land Cover Map of Great Britain: An Automated Classification of Landsat Thematic Mapper Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(5):553–562, 1994. 8
- [109] R.M. Fuller & R.J. Parsell. Classification of TM Imagery in the Study of Land Use in Lowland Britain: Practical Considerations for Operational Use. *International Journal of Remote Sensing*, 11(10):1901–1917, 1990. 8
- [110] A.K. Fung, Z. Li & K.Z. Chen. Backscattering from a Randomly Rough Dielectric Surface. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30(2):356–369, 1992. 12
- [111] M. Gabella, J. Joss & G. Perona. Improving the Effectiveness of Radar for Precipitation Measurements: The 1994 Piedmont Flood as a Case Study. In *Proceedings of the 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 342–345, Tromsø, 1998. 15
- [112] L. Gagnon & A. Jouan. Speckle Filtering of SAR Images - A Comparative Study between Complex-Wavelet-Based and Standard Filters. In *Proceedings of the SPIE-Conference Wavelet Applications in Signal and Image Processing V*, San Diego, 1997. 30, 88
- [113] M. Gahegan & J. Flack. A Model to Support the Integration of Image Understanding Techniques within a GIS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(5):483–490, 1996. 18
- [114] U. Gangkofner. Methodische Untersuchungen zur Vor- und Nachbereitung der Maximum Likelihood Klassifizierung optischer Fernerkundungsdaten. *Münchener Geographische Abhandlungen*, B 24, 1996. 17, 75, 75, 75, 76
- [115] B. Garguet-Duport, J. Girel, J.-M. Chassery et al. The Use of Multiresolution Analysis and Wavelet Transform for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9):1057–1066, 1996. 18
- [116] P. Gege. Klassifizierung von Phytoplankton durch Modellieren der Gewässerabte. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 64(5):147–154, 1996. 15
- [117] R. Gens & J.L. Van Genderen. SAR Interferometry - Issues, Techniques, Applications. *International Journal of Remote Sensing*, 17(10):1803–1835, 1996. 32
- [118] G. Gerold et al. Regionalization of Runoff Process through Aggregation of “Homogeneous Pedo-hydrotopes” under GIS and SARA. In *Int. Conference on Regionalization in Hydrology*, pp. 83–86, Braunschweig, 1997. 3, 5
- [119] D. Geudtner. Die interferometrische Verarbeitung von SAR-Daten des ERS-1. *Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt*, Forschungsbericht 95-28, 1995. 96, 117
- [120] A. Giacomelli, M. Mancini & R. Rosso. Integration of ERS-1 PRI Imagery and Digital Terrain Models for the Assessment of Flooded Areas. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 15

- [121] A. Gitelson et al. Monitoring of Polluted Water Bodies by Remote Sensing. In M.F. Baumgartner, G.A. Schultz & A.I. Johnson, editors, *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems*, pp. 181–188. IAHS Publication no. 242, 1997. [15](#)
- [122] S.J. Goetz. Multi-sensor Analysis of NDVI, Surface Temperature and Biophysical Variables at a Mixed Grassland Site. *International Journal of Remote Sensing*, 18(1):71–94, 1997. [9](#), [10](#)
- [123] R.M. Goldstein et al. Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream. *Science*, 262:1525–1530, 1993. [32](#)
- [124] R.M. Goldstein, H.A. Zebker & C.L. Werner. Satellite Radar Interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping. *Radio Science*, 23:713–720, 1988. [32](#)
- [125] L.C. Graham. Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping. *Proceedings of the IEEE*, 62:763–768, 1974. [32](#)
- [126] D.D. Greenlee. Raster and Vector Processing for Scanned Linework. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53(10):1383–1387, 1987. [51](#)
- [127] G.B. Groom, R.M. Fuller & A.R. Jones. Contextual Correction: Techniques for Improving Land Cover Mapping from Remotely Sensed Images. *International Journal of Remote Sensing*, 17(1):69–89, 1996. [17](#)
- [128] B. Guindon & M. Adair. Analytic Formulation of Spaceborne SAR Image Geocoding and Value-Added Product Generation Procedures Using Digital Elevation Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 18(1):2–12, 1992. [93](#), [94](#), [95](#)
- [129] T. Guneriusson. Backscattering Properties of a Wet Snow Cover Derived from DEM Corrected ERS-1 SAR Data. *International Journal of Remote Sensing*, 18(2):375–392, 1997. [13](#), [14](#)
- [130] M. Habermeyer & C. Schmallius. Ein Algorithmus zur wissensbasierten Klassifikation multitemporaler Radar-Fernerkundungsdaten. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, 5:313–323, 1997. [17](#), [18](#)
- [131] H. Haefner & J. Piesbergen. High Alpine Snow Cover Monitoring Using ERS-1 SAR and Landsat TM Data. In M.F. Baumgartner, G.A. Schultz & A.I. Johnson, editors, *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems*, pp. 113–118. IAHS Publication no. 242, 1997. [14](#)
- [132] W. Hagg & M. Sties. The EPOS-Speckle Filter: A Comparison with some Well Known Speckle-Reduction Techniques. In *Proceedings XVIII ISPRS-Congress*, Wien, 1996. [30](#)
- [133] M. Hallikainen et al. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil - Part 1: Empirical Models and Experimental Observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-23(1):25–34, 1985. [10](#), [11](#)
- [134] G.M. Henebry. Advantages of Principal Components Analysis for Land Cover Segmentation from SAR Image Series. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. [17](#), [30](#), [103](#), [103](#), [116](#)
- [135] G.M. Henebry & H.J.H. Kux. Lacunarity as a Texture Measure for SAR Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 16(3):565–571, 1995. [17](#)
- [136] E.-A. Herland. Operational Use of SAR Interferometry for DEM Generation and Land Use Mapping. In *Proceedings of the ERS SAR Interferometry Workshop FRINGE*, Zürich, 1996. [13](#), [32](#)
- [137] D. Herpertz. Einfluß regionaler Flächendifferenzierungen auf die Ergebnisgenauigkeit des Flußeingzugsgebietsmodells ACRU. - Detailstudien im Einzugsgebiet der Bröl. Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1994 (unveröffentlicht). [44](#)
- [138] G.A. Hills. The Ecological Basis for Land Use Planning. Technical Report 46, Ontario Department of Land and Forest, 1961. [4](#)

- [139] V. Hochschild. *Geomorphologische Kartierung und Untersuchung der Auftaudynamik mit ERS-1-SAR-Daten im Bereich der Antarktischen Halbinsel*. Dissertation, Geographisches Institut der Universität Bremen, 1995. [25](#), [25](#), [26](#), [28](#), [29](#), [29](#), [29](#)
- [140] V. Hochschild & M. Klenke. Comparison of Multifrequency Airborne E-SAR Data with Ground Measurements of Hillslope Hydrology. In *Proceedings of the Second International Conference Fusion of Earth Data*, Sophia Antipolis, 1998. [27](#), [98](#)
- [141] L.D. Hopkins. Methods for Generating Land Suitability Maps: A Comparative Evaluation. *Am. Inst. Pla. Journal*, 10:386–400, 1977. [4](#)
- [142] R.E. Horton. Erosional Development of Streams and their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 56:275–370, 1945. [3](#)
- [143] Zhenglin Hu, Shafiqul Islam & Yizong Cheng. Statistical Characterization of Remotely Sensed Soil Moisture Images. *Remote Sensing of Environment*, 61:310–318, 1997. [11](#)
- [144] X. Huang & J.R. Jensen. A Machine-Learning Approach to Automated Knowledge-Base Building for Remote Sensing Image Analysis with GIS Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(10):1185–1194, 1997. [18](#)
- [145] X. Huang & Y.-Q. Jin. A Simple Method to Estimate the Soil Wetness and Surface Roughness by Using Active/Passive Microwave Data. *Remote Sensing of Environment*, 53:212–214, 1995. [11](#)
- [146] S.K. Jenson & J.O. Domingue. Extracting Topographic Features from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11):1593–1600, 1988. [51](#)
- [147] E.J. Kaminsky, H. Barad & W. Brown. Textural Neural Network and Version Space for Remote Sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 18(4):741–762, 1997. [18](#)
- [148] I. Kanellopoulos & G.G. Wilkinson. Strategies and Best Practice for Neural Network Image Classification. *International Journal of Remote Sensing*, 18(4):711–725–, 1997. [18](#)
- [149] M.A. Karam et al. A Microwave Polarimetric Scattering Model for Forest Canopies Based on Vector Radiative Transfer Theory. *Remote Sensing of Environment*, 53:16–30, 1995. [28](#)
- [150] V. Karathanassi, C. Iossifidis & D. Rokos. Texture-Based Classification Methods for the Prediction of Urban Growth. In *Proceedings of the 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 441–446, Tromsø, 1998. [9](#)
- [151] G. Kattenborn et al. High Resolution Detection and Monitoring of Changes Using ERS-1 Time Series. In *Proceedings of the Second ERS-1 Symposium*, pp. 635–642, Hamburg, 1993. [10](#)
- [152] R.E.J. Kelly et al. Characteristic Snow and Ice Properties of a Norwegian Ice Cap Determined from Complex ERS SAR. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. [14](#)
- [153] S. Kempke. Limnologische Untersuchungen zur Gewässergüte und ihre Abhängigkeit von der Landnutzung in den Einzugsgebieten der Bröl und des Hanfbaches. Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1994 (unveröffentlicht). [43](#), [44](#)
- [154] W. Keydel. Radarverfahren zur Satellitenfernerkundung am Beispiel des ERS-1. *Die Geowissenschaften*, 9(4–5):102–110, 1991. [26](#), [26](#)
- [155] R. Kidd & G. Lemoine. Application of a Conditioned Classification Methodology for Optical and SAR Data in the MARS-STAT Project: A Case Study. In *Proceedings of the Second International Conference Fusion of Earth Data*, Sophia Antipolis, 1998. [18](#)
- [156] M.J. Kirkby. *Hillslope Hydrology*. John Wiley & Sons, New York, 1978. [3](#)
- [157] G.W. Kite & N. Kouwen. Watershed Modeling Using Land Classifications. *Water Resources Research*, 28(12):3193–3200, 1992. [4](#), [4](#)

- [158] W. Klaassen, M. Van Der Linden & A. Ballast. SAR Sensing of Vegetation Wetness: The First Results. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 9
- [159] M. Klenke. Aufbau eines hydrologischen Informationssystems für das Einzugsgebiet der Sieg: Erfassung von Landnutzungsstrukturen aus Fernerkundungsdaten. *Salzburger Geographische Materialien*, 26:303–308, 1997. 7
- [160] M. Klenke. Using Backscatter and Coherence Information from Air- and Spaceborne SAR Imagery for the Delineation of Hydrological Response Units in a Mesoscale Catchment in Germany. In *Proceedings of the 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 316–319, Tromsø, 1998. 8
- [161] S.T. Knick, J.T. Rotenberry & T.J. Zarriello. Supervised Classification of Landsat Thematic Mapper Imagery in a Semi-Arid Rangeland by Nonparametric Discriminant Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(1):79–86, 1997. 7
- [162] C.C. Kontoes & D. Rokos. The Integration of Spatial Context Information in an Experimental Knowledge-Based System and the Supervised Relaxation Algorithm – Two Successful Approaches to Improving SPOT-XS Classification. *International Journal of Remote Sensing*, 17(16):3093–3106, 1996. 17
- [163] T. Krawulsky. Bodenwasserdynamik und Stoffverlagerung im Hennefer Siegbogen. Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1995 (unveröffentlicht). 44
- [164] D.T. Kuan et al. Adaptive Restoration of Images with Speckle. *IEEE Trans. ASSP.*, 35(3):373–383, 1987. 88
- [165] C.D. Kummerow & L. Giglio. A Passive Microwave Technique for Estimating Rainfall and Vertical Structure Information from Space. Part 1: Algorithm Description. *J. Appl. Meteor.*, 33:3–18, 1994. 16
- [166] C.D. Kummerow & L. Giglio. A Passive Microwave Technique for Estimating Rainfall and Vertical Structure Information from Space. Part 2: Applications to SSM/I Data. *J. Appl. Meteor.*, 33:19–34, 1994. 16
- [167] N.J. Lambert et al. Spectral Characterization and Regression-Based Classification of Forest Damage in Norway Spruce Stands in the Czech Republic Using Landsat Thematic Mapper Data. *International Journal of Remote Sensing*, 16(7):1261–1287, 1995. 8
- [168] E.F. Lambin & D. Ehrlich. Combining Vegetation Indices and Surface Temperature for Land-Cover Mapping at Broad Spatial Scales. *International Journal of Remote Sensing*, 16(3):573–579, 1995. 10
- [169] Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). *Produkte 1996/97*. Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, Bonn, 1996. 46
- [170] L.G. Lanza & F. Siccardi. Climatology of Rainfall Observed from Satellite and Surface Data in the Mediterranean Basin. In M.F. Baumgartner, G.A. Schultz & A.I. Johnson, editors, *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems*, pp. 165–172. IAHS Publication no. 242, 1997. 16
- [171] R.M. Lark. A Reappraisal of Unsupervised Classification 1: Correspondence between Spectral and Conceptual Classes. *International Journal of Remote Sensing*, 16(8):1425–1443, 1995. 34, 64
- [172] R.M. Lark. A Reappraisal of Unsupervised Classification 2: Optimal Adjustment of the Map Legend and a Neighborhood Approach for Mapping Legend Units. *International Journal of Remote Sensing*, 16(8):1445–1460, 1995. 34
- [173] R.M. Lark. Contributions of Principal Components to Discrimination of Classes of Land Cover in Multi-Spectral Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 16(4):779–787, 1995. 17, 70

- [174] O. Laugier et al. High Temporal Detection and Monitoring of Flood Zone Dynamic Using ERS Data Around Catastrophic Natural Events: The 1993 and 1994 Camargue Flood Events. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 15
- [175] H. Laur, P. Bally, P. Meadows, J. Sanchez, B. Schaettler & E. Lopinto. Derivation of the Backscattering Coefficient σ^0 in ESA ERS SAR PRI Products. *ESA Publications Division*, ES-TN-RS-PM-HL09, Issue 2, Rev. 4, 1997. 90, 90, 92, 93
- [176] S. Le Hègarat-Masclé et al. Application of Shannon Information Theory to a Comparison between L- and C-Band SIR-C Polarimetric Data versus Incidence Angle. *Remote Sensing of Environment*, 60:121–130, 1997. 28
- [177] T. Le Toan, F. Ribbes & N. Floury. Forest Observations by ERS and JERS Data. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 8
- [178] G.H. Leavesley et al. Precipitation Runoff Modeling System: User's Manual. Technical Report 83-4238, USGS Water Resources Investigations, 1983. 4, 6
- [179] G.H. Leavesley et al. The Modular Modelling System (MMS) - A Modelling Framework for Multi-disciplinary Research and Operational Applications. In *GIS and Environmental Modelling - Progress and Research Issues*, pp. 155–158, Fort Collins, 1996. 3, 4, 4, 4
- [180] J.S. Lee. Refined Filtering of Image Noise Using Local Statistics. *Computer Graphic and Image Processing*, 15:380–389, 1981. 88
- [181] J.S. Lee et al. Speckle Filtering of Synthetic Aperture Radar Images: A Review. *Remote Sensing Reviews*, 8:313–340, 1994. 30, 30, 88
- [182] T.H. Lee, J.E. Janowiak & P.A. Arkin. *Atlas of Products from the Algorithm Intercomparison Project 1: Japan and Surrounding Oceanic Regions June–August 1989*. Univ. Corp. for Atmospheric Research, Boulder, CO, 1991. 16
- [183] G. Lemoine et al. Methodological Advancements in Using ERS SAR Data for Crop Area Estimation. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 8
- [184] C. Leprieur, J. Durrand & J. Peyron. Influence of Topography on Forest Reflectance Using Landsat Thematic Mapper and Digital Terrain Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(4):491–496, 1988. 61
- [185] T.M. Lillesand & R.W. Kiefer. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, New York, third edition, 1994. 1
- [186] G. Liu & J.A. Curry. Retrieval of Precipitation from Satellite Microwave Measurement Using both Emission and Scattering. *J. Geophys. Res.*, 97(9):959–974, 1992. 16
- [187] A. Lopes et al. Structure Detection and Statistical Adaptive Speckle Filtering in SAR Images. *International Journal of Remote Sensing*, 14(9):1735–1758, 1993. 88, 88
- [188] A. Lopes, R. Touzi & E. Nezry. Adaptive Speckle Filters and Scene Heterogeneity. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 28(6):992–1000, 1990. 88, 88, 88
- [189] D. Luca, M. Datcu & K. Seidel. Multiresolution Analysis of DEMs: Error and Artifact Characterization. In *Proceedings of the ERS SAR Interferometry Workshop FRINGE*, Zürich, 1996. 13, 32
- [190] T. Lüllwitz. *Vergleichende Hydrologische Modellierung mit dem Modell PRMS unter Anwendung von Geographischen Informationssystemen*. Dissertation, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1993. 44, 65
- [191] D.R. Maidment. GIS and Hydrologic Modelling. In *Proceedings of the First International Symposium/Workshop on GIS and Environmental Modelling*, Boulder, Colorado, 1991. 3, 4
- [192] M. Mangolini & O. Arino. ERS-SAR and Landsat-TM Multitemporal Fusion for Crop Statistics. *Earth Observation Quarterly*, 51:11–15, 1996. 18

- [193] L. Marinelli et al. Flood Mapping Using ERS Tandem Coherence Image: A Case Study in South France. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 15
- [194] M. Märker. Bodenchemische und bodenphysikalische Untersuchungen an ausgewählten Hangstandorten als Mittel für die Interpretation der reliefgesteuerten Hangwasserdynamik. Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1996 (unveröffentlicht). 44
- [195] N.D.A. Mascarenhas, G.J.F. Banon & A.L.B. Candeias. Multispectral Image Data Fusion under a Bayesian Approach. *International Journal of Remote Sensing*, 17(8):1457–1471, 1996. 18
- [196] D. Massonnet et al. The Displacement Field of the Landers Earthquake as Mapped by Radar Interferometry. *Nature*, 364:138–142, 1993. 32
- [197] N.M. Mattikalli. Integration of Remotely-Sensed Data with a Vector-Based Geographical System for Land-Use Change Detection. *International Journal of Remote Sensing*, 16(15):2813–2828, 1995. 10
- [198] N.M. Mattikalli & E.T. Engman. Microwave Remote Sensing and GIS for Monitoring Surface Soil Moisture and Estimation of Soil Properties. In M.F. Baumgartner, G.A. Schultz & A.I. Johnson, editors, *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems*, pp. 229–236. IAHS Publication 242, 1997. 12
- [199] C. Mätzler, T. Strozzi, T. Weise et al. Microwave Snowpack Studies Made in the Austrian Alps during the SIR-C/X-SAR Experiment. *International Journal of Remote Sensing*, 18(12):2505–2530, 1997. 14
- [200] W. Mauser. Agricultural Land-Use Classification in the Upper Rhine Valley Using Multitemporal TM-Data. In *Proceedings of the Landsat Thematic Mapper Applications Workshop: Result of the ESA/Earthnet Pilot Projects*, Frascati, 1987. 8
- [201] W. Mauser et al. Bestimmung hydrologischer Modellparameter mittels Fernerkundung. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 65(5-6):170–177, 1997. 6, 12
- [202] W. Mauser et al. The Contribution of Microwave Data to Distributed Hydrologic Modeling. In *Proceedings Third ERS-1 Scientific Symposium Florence*, 1997. 5, 5
- [203] W. Mauser et al. The Contribution of Remote Sensing Data to Distributed Hydrologic Modeling. In *Proceedings of the 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Tromsø, 1998. 1
- [204] A.M.J. Meijerink. Conceptual Modelling for Surface-Groundwater Interactions Based on Hydrotopes, Identified by Remote Sensing. In M.F. Baumgartner, G.A. Schultz & A.I. Johnson, editors, *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems*, pp. 149–156. IAHS Publication no. 242, 1997. 4
- [205] A.M.J. Meijerink et al. Introduction to the Use of Geographic Information Systems for Practical Hydrology. Technical Report 23, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), 1994. 4, 53
- [206] G. Meinel et al. Kartierung von Flächennutzungsänderungen mittels Landsat-TM-Daten: Methodische Untersuchungen im Raum Dresden. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 64(5):163–175, 1996. 9
- [207] H.-G. Mendel & F. Portmann. Soil Moisture Estimation in Hydrological Mesoscale Modelling Using ERS SAR Data. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 11
- [208] E. Meynen et al. *Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands*, Bd. 2. Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde und Raumordnung, 1962. 42
- [209] C. Michl. Simulation der Grundwasserdynamik mit dem Strömungsmodell MODFLOW unter Verwendung eines GIS im Einzugsbereich des Wasserwerks Meindorf, untere Sieg. Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1994 (unveröffentlicht). 44, 45

- [210] F.P. Miranda, L.E.N. Fonseca, J.R. Carr et al. Analysis of JERS-1 (Fuyo-1) SAR Data for Vegetation Discrimination in Northwestern Brazil Using the Semivariogram Textural Classifier (STC). *International Journal of Remote Sensing*, 17(17):3523–3529, 1996. 7, 17
- [211] G.G. Moisen et al. Merging Regional Forest Inventory Data With Satellite-Based Information Through Non Linear Regression Methods. In *Proceedings of the Second International Conference Fusion of Earth Data*, Sophia Antipolis, 1998. 18
- [212] B.J. Moorman. Advances in Glacial Hydrology Using Remote Sensing. In *Proceedings of the 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 367–370, Tromsø, 1998. 14
- [213] M.S. Moran et al. Combining Multifrequency Microwave and Optical Data for Crop Management. *Remote Sensing of Environment*, 61:96–109, 1997. 18, 27
- [214] R. Mülders. Anwendung des NASIM-Modells zur hydrologischen Modellierung im Bröleinzugsgebiet. Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1992 (unveröffentlicht). 6, 44
- [215] H. Murai & S. Omatu. Remote Sensing Image Analysis Using a Neural Network and Knowledge-Based Processing. *International Journal of Remote Sensing*, 18(4):811–828, 1997. 18
- [216] R.B. Myneni et al. Optical Remote Sensing of Vegetation: Modeling, Caveats, and Algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 51:169–188, 1995. 9
- [217] M.S. Naceur et al. Extraction of Textural Information by Fusion of Cartographic and Remotely Sensed Data. In *Proceedings of the Second International Conference Fusion of Earth Data*, Sophia Antipolis, 1998. 18
- [218] T. Nagler & H. Rott. The Application of ERS-1 SAR for Snowmelt Runoff Modelling. In M.F. Baumgartner, G.A. Schultz & A.I. Johnson, editors, *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems*, pp. 119–128. IAHS Publication no. 242, 1997. 14
- [219] J.E. Nash. The Form of Instantaneous Unit Hydrograph. In *IAHS Publ. no. 45, General Assembly of Toronto, vol. III: Surface Water, Prevision, Evaporation*, Toronto, 1957. 3
- [220] E. Nezry et al. Control Systems Principles Applied to Speckle Filtering and to the Retrieval of Geophysical Parameters through Radarsat and ERS Bayesian Data Fusion. In *Proceedings of the Second International Conference Fusion of Earth Data*, Sophia Antipolis, 1998. 30
- [221] M.-L. Nordberg. Vegetation and Biomass Changes in Mountainous Areas in Sweden Using Satellite and Airborne Imaging Scanner Data. In *Proceedings of the 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 431–435, Tromsø, 1998. 9
- [222] J.B. Odenweller & K.I. Johnson. Crop Identification Using Landsat Temporal-Spectral Profiles. *Remote Sensing of Environment*, 14:39–54, 1984. 7
- [223] P.E. O'Neill, N.S. Chauchan & T.J. Jackson. Use of Active and Passive Microwave Remote Sensing for Soil Moisture Estimation through Corn. *International Journal of Remote Sensing*, 17(10):1851–1865, 1996. 11, 11
- [224] M.J. Ortiz, A.R. Formaggio & J.C.N. Epiphanyo. Classification of Croplands through Integration of Remote Sensing, GIS, and Historical Database. *International Journal of Remote Sensing*, 18(1):95–105, 1997. 18
- [225] J.L. Palacio-Prieto & L. Luna-González. Improving Spectral Results in a GIS Context. *International Journal of Remote Sensing*, 17(11):2201–2209, 1996. 18
- [226] J.R. Palmer & R.E. Jacobson. Comparism of the Effectiveness of the Principal Components Transform for Enhancing Contrast between Closely Similar Colours with a Method Based on System Exposure Response Differences. *International Journal of Remote Sensing*, 16(8):1541–1555, 1995. 17

- [227] G. Palubinskas. Classification of Agricultural Crop Types Using SPOT HRV and ERS-1 SAR Data in the Test Site Ostalb (South Germany). *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 64(5):155–162, 1996. 18
- [228] G. Palubinskas, R.M. Lucas, G.M. Foody et al. An Evaluation of Fuzzy and Texture-Based Classification Approaches for Mapping Regenerating Tropical Forest Classes from Landsat-TM Data. *International Journal of Remote Sensing*, 16(4):747–759, 1995. 17, 18
- [229] J.D. Paola & R.A. Schowengerdt. The Effect of Neural-Network Structure on a Multispectral Land-Use/Land-Cover Classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(5):535–544, 1997. 18
- [230] P. Paolo et al. ERS-1 SAR Sensitivity to Hydrological Parameters: A Comparison with SIR-C and AIRSAR Data. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 8
- [231] K.P. Papathanassio, A. Reigber & M. Coltelli. On the Interferometry Coherence: A Multifrequency and Multitemporal Analysis. In *Proceedings of the ERS SAR Interferometry Workshop FRINGE*, Zürich, 1996. 27, 32
- [232] H.L. Penman. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proc. Roy. Soc.*, A193:120–146, 1948. 3
- [233] E. Peschl. *Analytische Geometrie*. Bibliographisches Institut, Mannheim, 1961. 70
- [234] B. Petersen. Untersuchungen zur Abgrenzung geohydrologisch homogener Bodenklassen im Einzugsgebiet des Pleisbachs unter Verwendung eines geographischen Informationssystems. Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1993 (unveröffentlicht). 44
- [235] G.W. Petty. The Status of Satellite-Based Rainfall Estimation over Land. *Remote Sensing of Environment*, 51:125–137, 1995. 16, 16, 16, 16
- [236] J.R. Philips. An Infiltration Equation with Physical Significance. *Soil Sci.*, 77:153–175, 1954. 3
- [237] J. Plate. Skalen in der Hydrologie: Zur Definition von Begriffen. *Senatskommission für Wasserforschung*, DFG Mitteilung XI:33–44, 1992. 4
- [238] J.C. Price & W.C. Bausch. Leaf Area Index Estimation from Visible and Near-Infrared Reflectance Data. *Remote Sensing of Environment*, 52:55–65, 1995. 9
- [239] F. Quiel. Landnutzungskartierung mit Landsat-Daten. Technischer Bericht 17, Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Schriftenreihe Fernerkundung in Raumordnung und Städtebau, 1986. 8
- [240] V.S. Raptis et al. Assessment of Different Data Fusion Methods for the Classification of an Urban Environment. In *Proceedings of the Second International Conference Fusion of Earth Data*, Sophia Antipolis, 1998. 9
- [241] E.W. Reiche. WASMOD: Teilmodell eines gebietsbezogenen Simulationssystems zur Erstellung von regionalen Wasser- und Stoffbilanzen. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme*, B42:85–100, 199. 3, 6
- [242] R. Rennert. Monitoring von Gewässergüte mit Fernerkundungsmethoden. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 65(1):4–9, 1997. 15, 15
- [243] J.A. Richards. Radar Backscatter Modelling of Forests: A Review of Current Trends. *International Journal of Remote Sensing*, 11(7), 1990. 31
- [244] J.A. Richards. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer-Verlag, Berlin, 1994. 7, 17, 23, 25, 28, 30, 35, 64, 70, 70
- [245] L.A. Richards, W.R. Gardner & G. Ogata. Physical Processes Determining Water Losses from Soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 20:310–314, 1956. 3

- [246] R. Richter. A Fast Atmospheric Correction Algorithm Applied to Landsat TM Images. *International Journal of Remote Sensing*, 11(1), 1990. 57
- [247] R. Richter. *A Spatially-Adaptive Fast Atmospheric Correction Algorithm - ERDAS IMAGINE-ATCOR2 User Manual (Version 1.0)*. Geosystems GmbH, first edition, 1996. 57
- [248] A.E.E. Rogers & R.P. Ingalls. Venus: Mapping the Surface Reflectivity by Radar Interferometry. *Science*, 165:797–799, 1969. 32
- [249] M. Rombach & W. Mauser. Multi-Annual Analysis of ERS Surface Soil Moisture Measurement of Different Land Uses. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 11, 12
- [250] D. Rosenfeld & G. Gutman. Retrieving Microphysical Properties of Cloud Tops by Multispectral Analysis of AVHRR Data. In *11th International Conference on Clouds and Precipitation*, Montreal, Quebec, 1992. 16
- [251] A. Rosenqvist. Monitoring of Tropical Tree Crops by JERS-1 and ERS-1 SAR Data. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 8
- [252] G. Rufino, A. Moccia & S. Esposito. DEM Generation by Means of ERS Tandem Data. In *Proceedings of the ERS SAR Interferometry Workshop FRINGE*, Zürich, 1996. 13, 32
- [253] S.S. Saatchi & E. Rignot. Classification of Boreal Forest Cover Types Using SAR Images. *Remote Sensing of Environment*, 60:270–281, 1997. 8
- [254] J. San Miguel-Ayanz. Synergy of Optical and Polarimetric Microwave Data for Forest Resource Assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 17(18):3647–3663, 1996. 18
- [255] M. Schaale & R. Furrer. Land Surface Classification by Neural Networks. *International Journal of Remote Sensing*, 16(16):3003–3031, 1995. 18
- [256] G.G. Schaber, J.F. McCauley & C.S. Breed. The Use of Multifrequency and Polarimetric SIR-C/X-SAR Data in Geologic Studies of Bir Safsaf, Egypt. *Remote Sensing of Environment*, 59:337–363, 1997. 28
- [257] T. Schmidt. Die Abschätzung der Bodenerosion auf landwirtschaftlich genutzten Flächen des Rhein-Sieg Kreises mit dem Computersimulationsmodell OPUS. Diplomarbeit, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1996 (unveröffentlicht). 44
- [258] C. Schullius. Advancing North - A Siberian Boreal Forest Map with ERS-2 and JERS-1. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 8
- [259] C.G.J. Schotten et al. Assessment of the Capabilities of Multi-Temporal ERS-1 SAR Data to Discriminate between Agricultural Crops. *International Journal of Remote Sensing*, 16(14), 1995. 8
- [260] M. Schwäbisch. SAR-Interferometrie - Technik, Anwendungen, Perspektiven. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 65(1):22–29, 1997. 32, 33, 34, 34, 96, 117, 123
- [261] A. Semmel. *Geomorphologie der Bundesrepublik Deutschland*. Geographische Zeitschrift, Beihefte. Franz Steiner Verlag, 1972. 41
- [262] A.K. Skidmore, B.J. Turner, W. Brinkhof et al. Performance of a Neural Network: Mapping Forests Using GIS and Remotely Sensed Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(5):501–514, 1997. 18
- [263] A.M. Smith et al. Complementarity of Radar and Visible-Infrared Sensors in Assessing Rangeland Condition. *Remote Sensing of Environment*, 52:173–180, 1995. 18
- [264] C. Smith, N. Pyden & P. Cole. *Erdas Field Guide*. Erdas Inc., third edition, 1995. 34, 61, 64, 70
- [265] D.M. Smith. Speckle Reduction and Segmentation of Synthetic Aperture Radar Images. *International Journal of Remote Sensing*, 17(11):2043–2057, 1996. 30

- [266] J.A. Smith, T.L. Lin & K.J. Ranson. The Lambertian Assumption and Landsat Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46(9):1183–1189, 1980. 61
- [267] L.C. Smith & D.E. Alsdorf. Flood Monitoring from Tandem ERS Phase Coherence Maps: Ob River, Siberia. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 15
- [268] F. Spitzer. Bestimmung der Überbauungsdichte aus digitalen Satellitenbildern. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 65(3):102–104, 1997. 9
- [269] H. Staudenrausch. Hydrologische Modellierung mit MMS/PRMS in einem mesoskaligen, semiariden Einzugsgebiet in der Gebirgsrandzone der Drakensberge in Südafrika. Diplomarbeit, Institut für Geographie, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 1996 (unveröffentlicht). 54, 65
- [270] H. Staudenrausch. Entwicklung und Evaluierung von Netzwerktopologien für homogene hydrologische Modelleinheiten durch GIS-Methoden. *Salzburger Geographische Materialien*, 26:405–410, 1997. 6, 6
- [271] O. Stebler, P. Pasquali, D. Small et al. Analysis of ERS-SAR Tandem Time-Series Using Coherence and Backscattering Coefficient. In *Proceedings of the ERS SAR Interferometry Workshop FRINGE*, Zürich, 1996. 32
- [272] S.V. Stehman. Selecting and Interpreting Measures of Thematic Classification Accuracy. *Remote Sensing of Environment*, 62:77–89, 1997. 17
- [273] J.J. Stibig. *Untersuchungen zum Anwendungspotential von SPOT- und TM-Daten für die digitale land- und forstwirtschaftliche Landnutzungsklassifikation anhand von Simulations- und Originalaufnahmen*. Dissertation, Abteilung für Luftbildmessung und Fernerkundung der Universität Freiburg i.Br., 1988. 8
- [274] R. Stolz, G. Riegler & W. Mauser. Evaluation of ERS Data for Biomass Estimation of Meadows. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 9
- [275] M.M. Stuebe & D.M. Johnston. Runoff Volume Estimation Using GIS Techniques. *Water Resources Bulletin*, 26(4):611–620, 1990. 4
- [276] P.H. Swain & S.M. Davis. *Remote Sensing: The Quantitative Approach*. MacGraw-Hill, New York, 1978. 66, 70
- [277] A.N. Swamy & P.A. Brivio. Hydrological Modeling of Snowmelt in the Italian Alps Using Visible and Infrared Remote Sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 17(16):3169–3188, 1996. 13, 13
- [278] O. Taconet et al. Taking into Account Vegetation Effects to Estimate Soil Moisture from C-Band Radar Measurements. *Remote Sensing of Environment*, 56:52–56, 1996. 11
- [279] P. Teymouri. *Geohydrologische Wasserhaushaltsuntersuchungen in Teileinzugsgebieten der Sieg*. Dissertation, Geographische Institute der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1996. 44
- [280] S. Thiemann & H. Kaufmann. Secchi Depth and Chlorophyll-a Determination Using Field Spectrometer and Airborne Hyperspectral Data in the Mecklenburg Lake District, Germany. In *Proceedings of the 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 324–328, Tromsø, 1998. 15
- [281] J.R.G. Townshend. Agricultural Land-Cover Discrimination Using Thematic Mapper Spectral Bands. *International Journal of Remote Sensing*, 5(4):681–698, 1984. 7
- [282] A. Tribe. Automated Recognition of Valley Lines and Drainage Networks from Grid Elevation Models: A Review and a New Method. *J. Hydrol.*, 139:263–293, 1992. 5
- [283] P.A. Troch, Z. Su & F.P. De Troch. Remote Sensing of Surface Soil Moisture Using EMAC/ESAR Data. *Earth Observation Quarterly*, 53:17–21, 1996. 12

- [284] L. Tsang, J.A. Kong & R.T. Shin. *Theory of Microwave Remote Sensing*. Wiley & Sons, New York, 1985. 30
- [285] F.T. Ulaby, R.K. Moore & A.K. Fung. Fundamentals and Radiometry. In *Microwave Remote Sensing, 1*, pp. 1–456. Norwood, 1981. 10, 25
- [286] F.T. Ulaby, R.K. Moore & A.K. Fung. Surface Scattering and Emission Theory. In *Microwave Remote Sensing, 2*, pp. 457–1064. Norwood, 1982. 10, 25, 26, 27, 28, 28, 29
- [287] F.T. Ulaby, R.K. Moore & A.K. Fung. From Theory to Applications. In *Microwave Remote Sensing, 3*, pp. 1065–2162. Norwood, 1986. 10, 25
- [288] F. Van Der Meer. What Does Multisensor Image Fusion Add in Terms of Information Content for Visual Interpretation. *International Journal of Remote Sensing*, 18(2):445–452, 1997. 18
- [289] N. Verhoest et al. Spatial Soil Moisture Mapping through Multi-Temporal Analysis of ERS-SAR PRI Data. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 116
- [290] S.P. Vyas, M.D. Steven & K.W. Jaggard. Leaf Area Estimation for Sugar Beet Yield Prediction Using ERS SAR Data. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 8
- [291] L. Wald. Data Fusion: A Conceptual Approach for an Efficient Exploitation of Remotely-Sensed Data. In *Proceedings of the Second International Conference Fusion of Earth Data*, Sophia Antipolis, 1998. 18
- [292] L. Wald et al. Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: Assessing the Quality of Resulting Images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(6):691–699, 1997. 18
- [293] Y. Wang, F.W. Davis, J.M. Melack et al. The Effects of Changes in Forest Biomass on Radar Backscatter from Tree Canopies. *International Journal of Remote Sensing*, 16(3):503–513, 1995. 8
- [294] Y. Wang & D. Dong. Retrieving Forest Stand Parameters from SAR Backscatter Data Using a Neural Network Trained by a Canopy Backscatter Model. *International Journal of Remote Sensing*, 18(4):981–989, 1997. 8, 9, 18, 30
- [295] T.A. Warner & M. Shank. An Evaluation of the Potential for Fuzzy Classification of Multispectral Data Using Artificial Neural Networks. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(11):1285–1294, 1997. 18
- [296] U. Wegmüller. Soil Moisture Monitoring with ERS SAR Interferometry. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 12
- [297] U. Wegmüller et al. Forest Mapping Using ERS Repeat-Pass SAR Interferometry. *Earth Observation Quarterly*, 49:4–7, 1995. 8, 100
- [298] U. Wegmüller & C.L. Werner. Land Applications Using ERS-1/2 Tandem Data. In *Proceedings of the ERS SAR Interferometry Workshop FRINGE*, Zürich, 1996. 32
- [299] A. Weimann et al. Soil Moisture Estimation with ERS-1 SAR Data in the East-German Loess Soil Area. *International Journal of Remote Sensing*, 19(2):237–243, 1998. 11
- [300] C.L. Werner, S. Hensley, P.A. Rosen et al. Comparison of Repeat Track Interferometric Correlation Signatures from ERS-1, ERS Tandem, SIR-C, and JERS-1. In *Proceedings of the ERS SAR Interferometry Workshop FRINGE*, Zürich, 1996. 32
- [301] M.G. Wooding. Satellite Radar in Agriculture, Experience with ERS-1. *Earth Observation Quarterly*, 49:22–24, 1995. 8
- [302] M.G. Wooding, A.D. Zmuda & G.H. Griffiths. Crop Discrimination Using Multi-Temporal ERS-1 SAR Data. In *Proceedings of the Second ERS-1 Symposium*, pp. 51–56, Hamburg, 1993. 8

- [303] X. Wu, K.-H. Thiel & A. Wehr. The Effects of Different Land Covers on the Accuracy of Interferometric DEM. In *Proceedings of the ERS SAR Interferometry Workshop FRINGE*, Zürich, 1996. 13
- [304] H. Xu, M.D. Steven & K.W. Jaggard. Monitoring Leaf Area of Sugar Beet Using ERS-1 SAR Data. *International Journal of Remote Sensing*, 17(17):3401–3410, 1996. 8
- [305] D.A. Yocky. Multiresolution Wavelets Decomposition Image Merger of Landsat Thematic Mapper and SPOT Panchromatic Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9):1067–1074, 1996. 18
- [306] H.A. Zebker et al. The TOPSAR Interferometric Radar Topographic Mapping Instrument. In *Proceedings of IGARSS 92*, pp. 1595–1597, Houston, 1992. 32
- [307] H.A. Zebker & R.M. Goldstein. Topographic Mapping from Interferometry Synthetic Aperture Radar Observations. *Journal of Geophysical Research*, 91(B5):4993–4999, 1986. 32
- [308] E. Zeidler, Hrsg. *Teubner-Taschenbuch der Mathematik*. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1996. 73
- [309] X. Zhuang, B.A. Engel, X. Xiong et al. Analysis of Classification Results of Remotely Sensed Data and Evaluation of Classification Algorithms. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(4):427–433, 1995. 17
- [310] B. Zhukov & D. Oertel. Multi-Sensor Multi-Resolution Technique and its Simulation. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 64(1):11–21, 1996. 18
- [311] M. Zink et al. Microwave Remote Sensing for Monitoring Forest Vitality. In *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, 1997. 9
- [312] J.P. Zuttermeister. Evaluating TM Data for SRS Crop Acreage and Production Estimates. Technical Report RSB-85-02, U.S. Department of Agriculture Statistical Research Service, SRS Staff, 1985. 8