

**Informationsgehalt von ERS-1/-2 SAR-Daten
zur Erfassung der Arteninventare und des Zustandes
landwirtschaftlich genutzter Böden und Vegetation**

**Eine Untersuchung in Agrarregionen Bayerns unter Einbeziehung von Fachdaten aus
Geoinformationssystemen und Satellitendaten optischer Sensoren**

Dissertation
zur Erlangung des Grades
"Doktor
der Naturwissenschaften"

am Fachbereich Geowissenschaften
der Johannes Gutenberg-Universität
in Mainz

Andreas Hagemeister
geb. in Osterode am Harz

Mainz, Januar 2001

Jahr der mündlichen Prüfung: 2001

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Verzeichnis verwandter Abkürzungen und Symbole.....	X
1 Einleitung	1
1.1 Fernerkundung in der Landwirtschaft	3
1.2 Wissenschaftliche Zielsetzung.....	5
1.3 Stand der Forschung.....	6
2 Grundlagen der Radarfernerkundung.....	9
2.1 ERS-1/-2 Sensorcharakteristik	9
2.2 Physikalische Grundlagen der Radarfernerkundung.....	10
2.2.1 Radargleichung.....	10
2.2.2 Statistische Eigenschaften des Radarsignals.....	11
2.2.3 Bildgebung und synthetische Apertur	11
2.3 Laufzeitcodierung und Reliefeinfluß.....	12
2.4 Rückstreumechanismen landwirtschaftlicher Kulturen.....	14
2.4.1 Materialeigenschaften.....	15
2.4.2 Strukturelle Eigenschaften.....	15
2.4.3 Volumenstreuung.....	16
2.5 Ableitung kalibrierter Rückstreukoeffizienten σ^0 aus ERS SAR SLC-Daten.....	17
2.6 Grundlagen der SAR-Interferometrie.....	18
2.6.1 Kohärenz	19
2.6.2 Das interferometrische Signal	20
2.6.3 Anwendungsfelder der SAR-Interferometrie.....	20
3 Untersuchungsgebiet.....	22
3.1 Geographischer Überblick	22
3.2 Allgemeine Klimabetrachtung	23
3.3 Pflanzenphänologie	24
3.4 Geologischer Überblick.....	25
3.5 Geomorphologischer Überblick.....	25
3.6 Bodenlandschaften und Leitböden.....	26
3.7 Nutzung der Böden, Landschafts- bzw. Agrarstruktur.....	27

4 Bildverarbeitung von ERS SAR-Daten	29
4.1 Datengrundlage	29
4.2 Kalibrierung	30
4.3 Koreferenzierung.....	31
4.4 Bildverbesserung durch Hauptkomponententransformation	31
4.5 Geocodierung	32
4.6 Korrektur reliefbedingter Radiometrieverzerrungen.....	36
4.7 Interferometrische Verarbeitungskette	37
4.7.1 Koregistrierung.....	37
4.7.2 Interferogrammgenerierung	38
4.7.3 Korrektur der aufnahmegeometriebedingten Phase	39
4.7.4 Beurteilung der interferometrisch verarbeiteten Tandem-Bildpaare.....	40
4.8 Untersuchung der <i>Speckle</i> -Statistik.....	42
4.9 Ableitung schlagbezogener bildstatistischer Kennwerte.....	43
5 Satellitendaten optischer Sensoren	46
5.1 Verwendete Satellitensysteme und Datengrundlage	46
5.2 Geocodierung	47
5.3 Ableitung schlagbezogener Bildparameter.....	47
6 GIS-Datengrundlage, -Datenaufbereitung und GIS-Aufbau	48
6.1 Ground Truth-Daten.....	49
6.1.1 Konzept der dreistufigen Ground Truth-Datenerhebung.....	49
6.1.2 Ground Truth-Datenerhebung der Stufe 1 (Meßprogramm).....	51
6.1.3 Ground Truth-Datenerhebung der Stufe 2 (Schlagbonitur)	53
6.1.4 Landnutzungskartierungen (Stufe 3)	56
6.1.5 Zeitreihenumfang der verfügbaren Ground Truth-Daten	56
6.1.6 Digitale Erfassung aktueller Schlaggrenzen	57
6.1.7 Ground Truth-Datenhaltung und GIS Anbindung.....	59
6.2 Externe GIS Daten	59
6.2.1 Digitale topographische Rasterdaten und ATKIS25	59
6.2.2 Reliefdaten	59
6.2.3 Klimadaten.....	60
6.2.4 Phänologische Daten	64
6.2.5 Bodendaten.....	65
7 Zeitreihenanalyse der Radarrückstreuung	67
7.1 Temporaler Verlauf der Radarrückstreuung landwirtschaftlicher Kulturen.....	68
7.2 Vergleich der Rückstreuzeitprofile zwischen den Kulturen	76
7.2.1 Getreide.....	76
7.2.2 Kartoffel, Zuckerrübe, Raps und Mais	78
7.3 Interannueller Vergleich der Radarsignaturen	80

7.4 Störeinflüsse auf die Radarsignaturen	83
7.4.1 Orbitaler Einfluß.....	83
7.4.2 Niederschlagseinfluß	85
7.4.3 Windeinfluß.....	89
7.5 Detektion von Zeitfenstern zur Trennbarkeit von Fruchtarten	91
7.6 Zusammenfassung und Diskussion	94
8 Klassifizierung.....	96
8.1 Klassifizierungsstrategie.....	96
8.1.1 Schlagbezogene Klassifizierung.....	99
8.1.2 Aufteilung des Untersuchungsgebietes in naturräumliche Einheiten.....	102
8.1.3 Integration von Kohärenzdaten	105
8.1.4 Kombination von ERS- und optischen Fernerkundungsdaten	106
8.2 Ausgewählte überwachte Klassifizierungsverfahren	107
8.2.1 Neuronale Netze	107
8.2.2 <i>Maximum-Likelihood</i> -Klassifizierungsverfahren	110
8.3 Auswahl der Merkmale und Aufnahmezeitpunkte	111
8.3.1 Beurteilung der diskriminatorischen Eigenschaften der Merkmalsvariablen .	112
8.3.2 Ergebnisse der Diskriminanzanalyse zur Kanalauswahl	113
8.3.3 Erweiterung durch Bildkanäle optischer Sensoren.....	116
8.4 Klassifizierungsergebnisse.....	118
8.5 Frühzeitige Erfassung der Landnutzung	127
8.6 Hierarchischer Klassifizierungsansatz.....	129
8.6.1 Methode	129
8.6.2 Ergebnisse der hierarchischen Klassifizierung	131
8.7 Diskussion zur Klassifizierung	132
8.8 Ausblick zur Klassifizierung.....	134
9 Ableitung bio- und bodenphysikalischer Parameter aus ERS SAR-Daten.....	135
9.1 Zielsetzung.....	135
9.2 Modellierung der Radarrückstreuung.....	136
9.2.1 Typisierung existierender Modelle.....	136
9.2.2 Vorgehensweise zur Ableitung bio- und bodenphysikalischer Parameter	138
9.3 Modellierung der Bodenfeuchte vegetationsfreier Flächen.....	139
9.3.1 Physikalische Zusammenhänge.....	139
9.3.2 Bodenfeuchtemessung im Gelände mit <i>Time Domain Reflectometry</i>	142
9.3.3 Datenauswahl und Definition des Gültigkeitsbereichs	143
9.3.4 Einfluß der Bodenart des Oberbodens	144
9.3.5 Einfluß der kleinskaligen Bodenrauigkeit.....	146
9.3.6 Einfluß der Reihenrichtung	147
9.3.7 Einfluß des lokalen Einfallswinkels	150
9.3.8 Ergebnisse der Bodenfeuchtemodellierung.....	153

9.3.9 Bodenfeuchtemonitoring mit Hilfe von SAR-Zeitreihen	157
9.3.10 Zusammenfassung zur σ^0 -Bodenfeuchte-Beziehung vegetationsfreier Böden	159
9.4 Pflanzenparameter	160
9.4.1 Einflußfaktoren.....	160
9.4.2 Zeitliche Entwicklung wichtiger Pflanzenparameter	161
9.4.3 Angewandte Modelle.....	162
9.4.4 Ergebnisse des <i>Water-Cloud</i> Modells.....	164
9.4.5 Ergebnisse der einfachen Regressionsanalysen mit Pflanzenparametern.....	166
9.4.6 Ableitung von Pflanzenparametern	169
9.4.7 Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse.....	173
9.5 Diskussion zur Ableitung bio- und bodenphysikalischer Parameter	174
10 ERS-1/-2 Tandem interferometrische Kohärenz zur Bestimmung von Pflanzenwuchshöhen.....	176
10.1 Einführung	176
10.2 Methode	177
10.3 Zeitreihenbetrachtung von Kohärenz und Wuchshöhe	177
10.4 Zusammenhang zwischen Wuchshöhe und Kohärenz	179
11 Zusammenfassung und Diskussion.....	181
12 Literatur	187

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 2-1: Auflösung des Radars mit synthetischer Apertur (L = synthetisch verlängerte Antenne, D = die wirkliche Länge der Antenne) (nach LILLESAND & KIEFER 1994)
- Abb. 2-2: Reliefeinflüsse auf die SAR-Bildgeometrie (nach SCHREIER 1993, S. 174)
- Abb. 2-3: Steuernde Faktoren der Radarrückstreuung von vegetationsbedeckten Erdoberflächen (nach DOBSON et al. 1995)
- Abb. 2-4: Wellenstreuung in Abhängigkeit der Bodenrauigkeit (nach ELACHI 1988)
- Abb. 3-1: Geographische Lage des Untersuchungsgebietes und seine Abdeckung mit ERS-Daten sowie TK25-Blattschnitten
- Abb. 3-2: Phänologischer Kalender für die Region Isar-Inn-Schotterplatten: Frühe, mittlere und späte Eintrittstermine der phänologischen Jahreszeiten (60 Stationen in der Höhenlage 310-670 m über NN; Zeitraum 1951-1990) (nach Bay. Klimaforschungsverbund 1996)
- Abb. 3-3: Bodenkundlich-geologischer Schnitt durch die Lößlehmlandschaft bei Pfaffenhofen a.d. Ilm (TK25 Blatt 7435) (nach WITTMANN et al. 1981, S. 23)
- Abb. 4-1: Falschfarbendarstellung dreier Hauptkomponenten einer ERS SAR-Zeitreihe (links). Einzelnes ERS SAR-Bild überlagert von GIS-Polygonen der Flurkarte 1 : 5000, Blatt NO 14-2 (rechts)
- Abb. 4-2: Prinzip der Geocodierung einer Bildzeile (nach SCHREIER 1993; S. 117)
- Abb. 4-3: Interferometrische Verarbeitungsschritte von ERS SAR SLC-Daten
- Abb. 4-4: Interferometrische Verarbeitung der ERS-1/-2 Tandem Daten vom 10.05./11.05.96 am Beispiel eines ca. 5 x 5 km² großen Gebietsausschnittes bei Scheyern
- Abb. 4-5: Gegenüberstellung von Intensitäts- und Kohärenzbildern zu unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten für den Bereich Scheyern (Bildausschnitt ca. 5 x 5 km²)
- Abb. 4-6: Histogramme der gemessenen ERS-2 Rückstreuwerte für 1997 am Beispiel eines großen Winterweizenschlages mit überlagelter Rayleigh-Verteilung
- Abb. 6-1: Aufbau des Geoinformationssystems
- Abb. 6-2: Lage der Ground Truth-Referenzflächen innerhalb des Untersuchungsgebietes am Beispiel des Untersuchungsjahres 1998. Rot: Referenzflächen (Stufe 1); orange: Boniturflächen (Stufe 2); gelb: Kartiergebiete (Stufe 3)
- Abb. 6-3: Feld-GIS-System mit Eingabemaske zur Bonitur des Pflanzenbestandes
- Abb. 6-4: GIS-Boniturdaten am Beispiel der Parameter EC-Stadium (links) und Deckungsgrad (rechts) diverser Kulturen am 31.05.1997 im Boniturgebiet Dietersheim
- Abb. 6-5: Arbeitsablauf zur Erstellung der aktuellen digitalen Schlaggeometrie
- Abb. 6-6: Anpassung der vektorisierten Flurkarte auf die aktuelle Schlageinteilung anhand einer IRS-1C Szene
- Abb. 6-7: Klimatische und phänologische Zonierung des Untersuchungsgebietes anhand der Parameter Sommerniederschlag, tägliche Sonnenscheindauer im April und Eintrittsdatum der Gelbreife des Winterweizens (Klimaatlas von Bayern; Bayer. Klimaforschungsverbund 1996)
- Abb. 6-8: GIS-Verarbeitungsschritte zur Ableitung schlagbezogener statistischer Niederschlagskennwerte
- Abb. 6-9: Zuweisung von flächenanteilig gewichteten Bodenkennwerten nach vektorieller Verschneidung von Bodenkarte und Schlaggrenzen-Polygonen
- Abb. 7-1: Zeitlicher Verlauf der mittleren Radarrückstreuung Sigma⁰ in Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung auf Basis von 65 Winterweizenschlägen des Jahres 1998
- Abb. 7-2: Zeitlicher Verlauf der mittleren Radarrückstreuung Sigma⁰ in Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung auf Basis von 36 Wintergerstesschlägen des Jahres 1998

- Abb. 7-3: Zeitlicher Verlauf der mittleren Radarrückstreuung Σ_0 in Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung auf Basis von 36 Sommergersteslägen des Jahres 1998
- Abb. 7-4: Zeitlicher Verlauf der mittleren Radarrückstreuung Σ_0 in Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung auf Basis von 16 Winterappsslägen des Jahres 1998
- Abb. 7-5: Zeitlicher Verlauf der mittleren Radarrückstreuung Σ_0 in Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung auf Basis von 60 Maisslägen des Jahres 1998
- Abb. 7-6: Zeitlicher Verlauf der mittleren Radarrückstreuung Σ_0 in Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung auf Basis von 39 Kartoffelslägen des Jahres 1998
- Abb. 7-7: Zeitlicher Verlauf der mittleren Radarrückstreuung Σ_0 in Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung auf Basis von 12 Zuckerrübenschlägen des Jahres 1998
- Abb. 7-8: Vergleich der Radarrückstreuung und Pflanzenentwicklung zwischen Winterweizen, Wintergerste und Sommergerste 1998
- Abb. 7-9: Zeitprofile von Winterweizen, Wintergerste und Sommergerste des Anbaujahres 1998 unter Berücksichtigung der Standardabweichungen
- Abb. 7-10: Zeitprofile von Kartoffel, Zuckerrübe, Raps und Mais des Anbaujahres 1998 unter Berücksichtigung der Standardabweichungen
- Abb. 7-11: Temporaler Verlauf der mittleren Radarrückstreuung von Winterweizen in den Untersuchungsjahren 1996-1998 (mit EC-Stadien)
- Abb. 7-12: Temporaler Verlauf der mittleren Radarrückstreuung von Wintergerste in den Untersuchungsjahren 1996-1998 (mit EC-Stadien)
- Abb. 7-13: Temporaler Verlauf der mittleren Radarrückstreuung von Mais in den Untersuchungsjahren 1997-1998 (mit EC-Stadien)
- Abb. 7-14: Temporaler Verlauf der mittleren Radarrückstreuung von Raps in den Untersuchungsjahren 1997-1998 (mit EC-Stadien)
- Abb. 7-15: Temporaler Verlauf der mittleren Radarrückstreuung von Sommergerste in den Untersuchungsjahren 1996-1998 (mit EC-Stadien)
- Abb. 7-16: Lage des Untersuchungsgebietes innerhalb der Tracks 165 und 437 (Zusatzszenen)
- Abb. 7-17: Multitemporale Signaturen von Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste und Kartoffel getrennt nach ERS-2 Aufnahmepositionen
- Abb. 7-18: Tagesniederschlagssummen und mittlere Radarrückstreuung der Hauptfruchtarten 1997 (berücksichtigte Schläge: Boniturgebiete Hollern u. Dietersheim; DWD-Niederschlagsstation Neufahrn)
- Abb. 7-19: Tagesniederschlagssummen und mittlere Radarrückstreuung der Hauptfruchtarten 1998 (berücksichtigte Schläge: Boniturgebiet Kranzberg; DWD-Niederschlagsstation Sünzhausen)
- Abb. 7-20: Windeinfluß am Beispiel des Speichersees bei München (Maßstab ca. 1 : 137 000)
- Abb. 7-21: Trennbarkeitskoeffizienten zwischen zwei Fruchtarten als Funktion der Zeit
- Abb. 8-1: Prozeßkette der schlagbasierten multitemporalen ERS-2 Klassifizierung mit Hilfe topographischer Flurkarten, Landnutzungskartierungen und Bilddaten optischer Systeme
- Abb. 8-2: Schlagbezogene mittlere Rückstreuwerte der ERS-2 Zeitreihe vom 07.03.-25.07.1998
- Abb. 8-3: Datengrundlage der Grobsegmentierung des Untersuchungsgebietes (Maßstab 1 : 720 000)
- Abb. 8-4: Vergleich zwischen ERS-Intensitätswerten und Kohärenzwerten einzelner Fruchtarten (nach KÜHBAUCH et al. 1999, S. 85)
- Abb. 8-5: Netzwerktopologie eines mehrschichtigen *Feedforward Backpropagation* Netzwerkes
- Abb. 8-6: Neuronenmodell nach MCCULLOCH & PITTS (in HERTZ 1991)
- Abb. 8-7: Klassifizierungsergebnisse 1996 als Gesamtgenauigkeit in Prozent
- Abb. 8-8: Klassifizierungsergebnisse 1997 als Gesamtgenauigkeit in Prozent

- Abb. 8-9: Klassifizierungsergebnisse 1998 als Gesamtgenauigkeit in Prozent
- Abb. 8-10: Ergebnisse der schlagbezogenen multitemporalen ERS-Klassifizierung 1997 am Beispiel der Teilgebiete Garching, Scheyern und Thalhausen
- Abb. 8-11: Ergebnisse der schlagbezogenen multitemporalen ERS-Klassifizierung 1998 am Beispiel der Teilgebiete Garching, Scheyern und Thalhausen
- Abb. 8-12: Ablaufschema der hierarchischen Klassifizierung von 7 Fruchtarten am Beispiel der ERS-Zeitreihe von 1998
- Abb. 8-13: Zeitprofile der mittleren Rückstreuung von 7 Fruchtarten 1998
- Abb. 9-1: Zeitliche Veränderung der Rückstreuanteile von Boden, Pflanzen und Pflanze-Boden zur Gesamtrückstreuung am Beispiel von Winterweizen (nach WOODING et al. 1995)
- Abb. 9-2: Beziehung zwischen Dielektrizitätskonstante und Bodenfeuchte in Abhängigkeit der vier Bodenartengruppen
- Abb. 9-3: Tagesniederschläge und mittlere Bodenfeuchte der Meßschläge 1998 als Funktion der Zeit
- Abb. 9-4: Regressionsgeraden der linearen Beziehungen zwischen Radarrückstreuung und Bodenfeuchte (mv) für vier verschiedene Bodenarten
- Abb. 9-5: Definierte Bodenrauhigkeitsklassen
- Abb. 9-6: Zeitreihenprofile der Radarrückstreuung von Kartoffelschlägen 1997
- Abb. 9-7: Situation ausgewählter Schläge zur Untersuchung des Reihenrichtungseffektes
- Abb. 9-8: Rückstreukoeffizienten von Mais und Kartoffel in Abhängigkeit der Reihenrichtung
- Abb. 9-9: Häufigkeitsverteilung des lokalen Einfallswinkels, basierend auf den Boniturflächen 1998
- Abb. 9-10: Rückstreuung als Funktion des Einfallswinkels für drei verschieden raue Oberflächen (nach DOBSON & ULABY 1986)
- Abb. 9-11: Beziehungen zwischen volumetrischer Bodenfeuchte und Radarrückstreukoeffizient, differenziert nach Bodenrauhigkeitsklassen
- Abb. 9-12: Beziehungen zwischen volumetrischer Bodenfeuchte und Radarrückstreukoeffizient einzelner Bodenrauhigkeitsklassen, differenziert nach Bodenarten
- Abb. 9-13: Mittlere Bodenfeuchte vegetationsfreier Schläge des Teilgebietes Garching, abgeleitet aus ERS-2 SAR-Daten vom 07.03.1998
- Abb. 9-14: Rückstreumechanismen einer vegetationsbedeckten, rauhen Bodenoberfläche (nach SCHOUPS et al. 1998)
- Abb. 9-15: Zeitliche Entwicklung wichtiger Pflanzenparameter 1997 für Winterweizen
- Abb. 9-16: Zeitliche Entwicklung wichtiger Pflanzenparameter 1998 für Winterweizen
- Abb. 9-17: Radarrückstreuung gegenüber modellierter Rückstreuung für WW, WG, SG, MA und RA
- Abb. 9-18: Beziehungen zwischen Radarrückstreuung und Pflanzenparametern von Winterweizen der Meßjahre 1997 und 1998
- Abb. 9-19: Mittlere Frischmasse in t/ha von Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterroggen, Triticale und Winterraps, abgeleitet aus ERS SAR-Daten vom 11.04.1998 am Beispiel des Teilgebietes Garching
- Abb. 9-20: Zeitliche Entwicklung der Frischmasse von Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Triticale und Winterraps, abgeleitet aus ERS SAR-Daten vom 22.03., 26.04. und 31.05.1997 am Beispiel des Teilgebietes Garching
- Abb. 10-1: Gegenüberstellung von Kohärenzbildern zu unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten für den Gebietsausschnitt Scheyern (Bildausschnitt ca. 5 x 5 km²)
- Abb. 10-2: Kohärenzsignaturen und Wuchshöhenverläufe der 5 Hauptfruchtarten 1996
- Abb. 10-3: Linearer Zusammenhang zwischen Kohärenz und Wuchshöhe landwirtschaftlicher Kulturarten während der frühen Vegetationsperiode

Tabellenverzeichnis

- Tab. 2-1: Sensorcharakteristik des AMI und Radaraltimeters von ERS-1 und ERS-2
- Tab. 3-1: Klimatische Kenngrößen der Landschaftsräume des Untersuchungsgebietes
- Tab. 3-2: Landwirtschaftliche Anbauverhältnisse im Untersuchungsgebiet (nach Bodennutzungserhebungen des Bay. Landesamtes für Statistik und Datenverarbeitung, aus FETZER et al. 1986)
- Tab. 4-1: ERS-1/-2 SAR-Daten der Untersuchungsjahre 1996 bis 1998 (in lfd. Kalendertagen)
- Tab. 4-2: ERS-1/-2 Tandem-Bildpaare mit Basislinien und durchschnittlichen Kohärenzwerten
- Tab. 4-3: Schlagbezogene Kennwerte, abgeleitet aus ERS SAR-Daten und DGM
- Tab. 5-1: Eigenschaften der verwendeten Satellitensysteme
- Tab. 5-2: Multitemporale Abdeckung des Untersuchungsgebietes mit Landsat TM, SPOT und IRS-1C
- Tab. 6-1: Zusammensetzung, Umfang und Flächenstatistik der Referenzflächen 1996 bis 1998
- Tab. 6-2: Bestandes- und Bodenparameter der intensiv beprobten Schläge (Stufe 1)
- Tab. 6-3: Erfassung von Besonderheiten im Pflanzenbestand und/oder vegetationsfreier Oberflächen
- Tab. 6-4: Wetterbeobachtungen zu den ERS-Überflugsterminen am Beispiel 1997
- Tab. 6-5: Anzahl und mittlere Flächengrößen der Schläge in den Boniturgebieten 1997 und 1998
- Tab. 6-6: Bestandes- und Bodenparameter der bonitierten Schläge (Stufe 2)
- Tab. 6-7: Flächenstatistik der kartierten Landnutzungsgebiete
- Tab. 6-8: Verfügbare Ground Truth Daten zu den ERS-Aufnahmetermen der Jahre 1996-1998
- Tab. 6-9: Klimadaten des DWD
- Tab. 6-10: Phänologische Daten zu zehn Hauptfruchtarten, differenziert nach Gemeindegebieten (Periode 1980-1996) (mittlere Kalendertage)
- Tab. 6-11: Auszug aus der relationalen Bodendatenbank des Bodeninformationssystems
- Tab. 7-1: Einteilung der Trennbarkeiten zweier Fruchtarten anhand des Trennbarkeitskoeffizienten T
- Tab. 8-1: Naturräumliche Gliederung des Untersuchungsgebietes unter radar-relevantem Aspekt
- Tab. 8-2: Prozentuale Anteile der Hauptfruchtarten an der Ackerfläche, differenziert nach Naturräumen auf Basis der Landnutzungskartierungen 1996-1998
- Tab. 8-3: Potentielle Merkmalsvariablen zur Fruchtartenklassifizierung
- Tab. 8-4: Kanalauswahl 1996 gemäß mittlerem Diskriminanzkoeffizienten (bj), differenziert nach Teilgebieten und Gesamtgebiet
- Tab. 8-5: Kanalauswahl 1997 gemäß mittlerem Diskriminanzkoeffizienten (bj), differenziert nach Teilgebieten und Gesamtgebiet
- Tab. 8-6: Kanalauswahl 1998 gemäß mittlerem Diskriminanzkoeffizienten (bj), differenziert nach Teilgebieten und Gesamtgebiet
- Tab. 8-7: Kanalauswahl 1996 unter Einbeziehung von Bilddaten optischer Systeme gemäß mittlerem Diskriminanzkoeffizienten (bj), differenziert nach Teilgebieten und Gesamtgebiet
- Tab. 8-8: Kanalauswahl 1997 unter Einbeziehung von Bilddaten optischer Systeme gemäß mittlerem Diskriminanzkoeffizienten (bj), differenziert nach Teilgebieten und Gesamtgebiet
- Tab. 8-9: Kanalauswahl 1998 unter Einbeziehung von Bilddaten optischer Systeme gemäß mittlerem Diskriminanzkoeffizienten (bj), differenziert nach Teilgebieten und Gesamtgebiet
- Tab. 8-10: Anzahl der zu klassifizierenden Schläge der Jahre 1996-1998, differenziert nach Teilregionen
- Tab. 8-11: Klassifizierungsergebnis NMS 1998 (Differenzierung in 6 Zielklassen; ML-Klassifikator)

- Tab. 8-12: Klassifizierungsergebnis NMS 1998 (Differenzierung in 11 Zielklassen; ML-Klassifikator)
- Tab. 8-13: Klassifizierungsgenauigkeiten (in %) bei sukzessiver Einschränkung der ERS-Zeitreihe
- Tab. 8-14: Mit Radarfernerkundungsdaten erzielbare Klassifizierungsgenauigkeiten in Abhängigkeit von den Systemeigenschaften der SAR-Sensoren (nach ULABY 1998)
- Tab. 9-1: Bodenartengruppen und repräsentative Bodentypen nach Clusteranalyse
- Tab. 9-2: Datenauswahlkriterien zur Beschreibung des Reihenrichtungseffektes bei Kartoffel und Mais
- Tab. 9-3: Beziehung zwischen Radarrückstreuquerschnitt und volumetrischer Bodenfeuchte in Abhängigkeit von der Bodenrauigkeitsklasse (BRK) ohne Korrektur des Einfallswinkels
- Tab. 9-4: Beziehung zwischen Radarrückstreuquerschnitt und volumetrischer Bodenfeuchte in Abhängigkeit von der Bodenrauigkeitsklasse (BRK) nach Korrektur des Einfallswinkels
- Tab. 9-5: Volumetrische Bodenfeuchte und Radarrückstreubeziehungen für C-Band Konfiguration (nach SHOSHANY et al. 2000)
- Tab. 9-6: Angepaßte Parameter für das *Water-Cloud* Modell in Abhängigkeit der Hauptkulturarten
- Tab. 9-7: Korrelationskoeffizienten (r) zwischen ERS-Rückstreuung und einzelnen Bestandesparametern aller beprobten Kulturarten der Meßkampagne 1997-1998; gesamte Vegetationsperiode
- Tab. 9-8: Korrelationskoeffizienten (r) zwischen ERS-Rückstreuung und einzelnen Bestandesparametern aller beprobten Kulturarten der Meßkampagne 1997-1998; bis einschließlich der Entwicklung vegetativer Pflanzenteile (EC 49) bzw. Reihenschluß (EC 39)
- Tab. 9-9: Korrelationskoeffizienten (r) zwischen ERS-Rückstreuung und einzelnen Bestandesparametern aller beprobten Kulturarten der Meßkampagne 1997-1998; ab Erscheinen der Blütenanlage (EC 50) bzw. nach Reihenschluß (EC 40)
- Tab. 9-10: Invertierung der Regressionsmodelle zur Ableitung der Frischmasse (FM), Trockenmasse (TM) und absoluten Wassermenge (WM) der Kulturarten WW, WG, SG und RA
- Tab. 9-11: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse zwischen der Radarrückstreuung und den gemessenen Pflanzenparametern für Getreide ab dem Zeitpunkt des Ährenschiebens
- Tab. 10-1: Kohärenzsignaturen weiterer landwirtschaftlicher Kulturarten
- Tab. 10-2: Lineare Beziehungen zwischen der Wuchshöhe (h) und der interferometrischen Kohärenz (γ)

Verzeichnis verwandter Abkürzungen und Symbole

ADC	Analog-Digital-Wandler
ALK	Amtliches Liegenschaftskataster
AMI	Active Microwave Instrument
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
ATSR	Along Track Scanning Radiometer
B	Basislinie der interferometrischen Aufnahmekonfiguration
BayGLA	Bayerisches Geologisches Landesamt
BayLBA	Bayerische Landesanstalt für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur
BayLVA	Bayerisches Landesvermessungsamt
BBCH-Skala	Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyle Pflanzen
BML	Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites
CoV	Variationskoeffizient
DEM	Dachauer- und Erdinger Moos (übergeordnete Raumeinheit innerhalb des Untersuchungsgebietes)
DGM	Digitales Geländemodell
DGPS	Differential Global Positioning System
DHM	Digitales Höhenmodell
DLR	Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V.
D-PAF	German Processing and Archiving Facility
DWD	Deutscher Wetterdienst
EMAP	ERS-1/-2 Data for Monitoring Agricultural Land Use as a long term Project
ENVISAT	European Environmental Polar Orbit Earth Observation Mission
ERS	European Earth Remote Sensing Satellite
ESA	European Space Agency
ESRIN	European Space Agency's Centre in Frascati bei Rom, Italien
EU	Europäische Union
Exp	Hangexposition
exz	Exzeß
Φ	Interferometrische Phase
FK	Feldkapazität
FM	Frischmasse
γ	Kohärenz
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik (der Europäischen Union)
GEC	Geocoded Ellipsoid Corrected
GIS	Geographisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
GPV	Gesamtporenvolumen
GTC	Geocoded Terrain Corrected
HH	Horizontal polarisiert senden und empfangen
INS	Institut für Navigation der Universität Stuttgart
IR	Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums
IRS-1C	Indian Remote Sensing Satellite 1C
JERS	Japanese Earth Resources Satellite
KA	Kartoffel
λ	Wellenlänge
LACIE	Large-Area Crop Inventory Experiment
LAI	Blattflächenindex
Landsat TM	Land Remote Sensing Satellite Thematic Mapper
Ld	Lagerungsdichte
Li	Local incidence angle (Einfallswinkel)
MA	Mais
MARS	Monitoring Agriculture by Remote Sensing

ML	Maximum Likelihood Klassifikationsverfahren
nFK	Nutzbare Feldkapazität
NIR	Nahes Infrarot
NMS	Nördliche Münchener Schotterebene (übergeordnete Raumeinheit innerhalb des Untersuchungsgebietes)
PAF	Prozessierungs- und Archivierungszentren der ESA (D-PAF: Deutschland; UK-PAF: Großbritannien; I-PAF: Italien)
PAN	Panchromatischer Kanal mit einem breiten Spektralband im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums
RA	Raps (Winterraps)
Rd	Range distance (Abstand zwischen Radarantenne und Target)
RMS	Root Mean Square (mittlere quadratische Abweichung)
S	Sand
SAR	Synthetic Aperture Radar
SG	Sommergerste
σ^0	Radarrückstreuquerschnitt (Sigma0)
SIR-C	Shuttle-getragenes SAR-System mit L- und C-Band-Sensor
ske	Verteilungsschiefe
SKT	Skelettgehalt (des Bodens)
SLC	Single Look Complex Data (gevierteltes Teilbild eines Gesamtbildes)
SLCI	Single Look Complex Data Full Frame (Gesamtbild)
Slo	Hangneigung
SPOT	Système Pour l'Observation de la Terre
SWIR	Kurzwelliges Infrarot
T	Ton
THL	Tertiärhügelland (übergeordnete Raumeinheit innerhalb des Untersuchungsgebietes)
TIR	Thermales Infrarot
TM	Trockenmasse
U	Schluff
VIS	Sichtbarer Bereich des elektromagnetischen Spektrums
VV	Vertikal polarisiert senden und empfangen
WG	Wintergerste
WGS84	World Geodetic System 1984
WM	Wassermenge
WW	Winterweizen
X-SAR	Shuttle-getragenes SAR-System mit X-Band-Sensor
Ψ	Phasenwert des Einzelsignals
ZR	Zuckerrübe

1 Einleitung

Satellitengetragene Fernerkundungssensoren zeichnen seit fast drei Jahrzehnten kontinuierlich Eigenschaften der Erdoberfläche sowie der Atmosphäre in unterschiedlichen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums auf. Die erhobenen Daten dienen in Kombination mit atmosphärischen Parametern als Grundlage für die Beschreibung von Zuständen sowie der Modellierung von komplexen Systemen in den verschiedensten naturwissenschaftlichen Disziplinen.

Entscheidende Voraussetzung für den operationellen Einsatz von Fernerkundungsdaten in diversen Anwendungsbereichen sind eine globale Abdeckung, eine ständige Verfügbarkeit sowie eine den Anwendungszielen angepaßte geometrische, radiometrische, spektrale und temporale Auflösung.

Optische und infrarote Fernerkundungssysteme haben im operationellen Einsatz bereits gezeigt, daß sie ein Großteil dieser Anforderungen erfüllen. Probleme ergeben sich jedoch in Klimazonen mit häufiger Wolkenbedeckung oder im Zusammenhang von zeitkritischen Anwendungen, die besonders für landwirtschaftliche Fragestellungen typisch sind. Hierzu werden häufig Fernerkundungsdaten zu exakt definierten Zeitpunkten und/oder Zeitreihen in kontinuierlichen Intervallen benötigt, die nur von Radarsystemen, wie z.B. ERS-1/-2, bereitgestellt werden können.

Im Gegensatz zu optischen Systemen ermöglichen diese, von aktiven SAR-Systemen (*Synthetic Aperture Radar*) aufgezeichneten Bilddaten, eine beleuchtungs- und weitgehend wetterunabhängige Beobachtung der Erdoberfläche, da die Mikrowellenstrahlen Dunst und Bewölkung nahezu ungehindert durchdringen.

Radarbilddaten unterscheiden sich jedoch grundsätzlich von denen optischer Sensoren. Ursache dafür ist, daß es sich bei Radaraufnahmen um Rückstreumuster im Mikrowellenbereich handelt, bei denen die Wellenlänge des Signals (zwischen 0,1 und 100 cm) mit den geometrischen Abmessungen von Strukturen auf den reflektierenden Flächen vergleichbar ist. Dies führt dazu, daß Radaraufnahmen stets durch erhebliche Signalfluktuationen (*Speckle*) geprägt sind, die das Bild verrauscht erscheinen lassen. Neben den strukturellen Eigenschaften wird das Rückstreuverhalten ferner durch die dielektrischen Eigenschaften (Feuchte) der beleuchteten Objekte beeinflusst (ULABY et al. 1986a). Eine weitere Besonderheit von Radaraufnahmen ist die reliefbedingte Radiometrieverzerrung aufgrund des schrägen Beleuchtungswinkels (BÄHR & VÖGTLE 1998). Die völlig verschiedene Abbildungscharakteristik von Radarbilddaten im Vergleich zu Aufnahmen optischer Sensoren hat zur Folge, daß einerseits für ihre Auswertung und Interpretation neue, adäquate Methoden und Verfahren der Bildverarbeitung entwickelt werden müssen, andererseits aber zusätzliche Informationen über die Eigenschaften der beleuchteten Objekte abgeleitet werden können (EVANS 1992; KASISCHKE et al. 1997).

Vor diesem Hintergrund entwickelten sich die zentralen Fragestellungen dieser Arbeit:

- Welchen Informationsgehalt besitzen ERS-1/-2 SAR-Daten zur Erfassung der Arteninventare und des Zustandes landwirtschaftlich genutzter Böden und Vegetation?
- Welche Verfahrensabläufe und Methoden sind nötig, um diesen Informationsgehalt zu erschließen?
- Wie können nichtfernerkundliche Daten zielführend in den Auswertungsprozeß integriert werden?

Entsprechend dieser Fragestellungen gliedert sich der Aufbau der Arbeit neben den einleitenden Kapiteln zur Datengrundlage in ein Kapitel *Bildverarbeitung*, in dem die vorverarbeitenden Schritte zur Klassifizierung, wie SAR-Daten Kalibrierung, Koreferenzierung, Segmentierung und Merkmalsextraktion, dargestellt werden. Da eine multitemporale Klassifizierung durchgeführt wird, werden im Kapitel *Zeitreihenanalyse* die zeitlichen Verläufe der Radarrückstreuung, die Detektion geeigneter Zeitfenster zur Klassentrennung sowie mögliche Störeinflüsse detailliert untersucht. Im Kapitel *Klassifizierung* wird eine Methode zur Merkmalsauswahl angewandt sowie die Ergebnisse dreier Klassifizierungsverfahren vergleichend gegenübergestellt. Die Ableitung bio- und bodenphysikalischer Zustandsgrößen steht am Ende der Auswertungskette. Auf den Ergebnissen der Klassifizierung aufbauend, können schließlich spezifische Modelle zur Ableitung von Parametern erarbeitet werden, die den Vegetationsbestand (z.B. Biomasse) bzw. die Bodenoberfläche (z.B. Bodenfeuchte) detaillierter beschreiben.

Obige Fragestellungen waren auch Gegenstand des Forschungsvorhabens EMAP (**E**RS-1 /-2 **D**ata for **M**onitoring **A**gricultural Land Use as a long term **P**roject), in das vorliegende Arbeit thematisch eingebunden war.

Das Verbundprojekt EMAP¹ wurde vom Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten (BML) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR vormals DARA²) zu gleichen Teilen gefördert (95 HS 017 BML; 50 EE 9613/4 DLR; AO2.D141 ESA) und vom 01.04.1996 bis zum 31.05.1999 durchgeführt. Die ca. 10 ERS-Szenen pro Jahr wurden von der European Space Agency (ESA) zur Verfügung gestellt.

Nichtfernerkundliche Daten wurden vom Bayerischen Geologischen Landesamt (Bay-GLA), dem Bayerischen Landesvermessungsamt (BayLVA), dem Deutschen Wetterdienst (DWD) und der Bayerischen Landesanstalt für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur (BayLBA) zur Verfügung gestellt.

¹ EMAP setzte sich aus folgenden Projektpartnern zusammen: Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau (LSAPB) der Universität Bonn als *Principal Investigator* der ESA, Institut für Navigation (INS) der Universität Stuttgart, DaimlerChrysler Aerospace Jena Opttronik (DJO) und Institut für Biomathematik und Biometrie der GSF-Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, Neuherberg bei München (GSF).

² Deutsche Agentur für Raumfahrtangelegenheiten.

1.1 Fernerkundung in der Landwirtschaft

Schon zu Beginn der 70er Jahre wurden in den USA mit dem *Large-Area Crop Inventory Experiment* (LACIE) Konzepte entwickelt, um kostenintensive Agrarinventuren durch ein Agrarinformationssystem auf der Basis von Satellitenbilddaten zu ersetzen. Ein entscheidender Entwicklungsschritt erfolgte durch den Start des Landsat-Programms 1972, mit dessen Multispektralsensor es erstmals gelang, für die großstrukturierten Anbauflächen Nordamerikas Fruchtarten zu identifizieren und deren Anbaufläche zu bestimmen (STEINBORN & BARWINSKI 1995).

Auch innerhalb der Europäischen Union (EU) wird seit 1988 der operationelle Einsatz von Fernerkundung in der Landwirtschaft gefördert, da zur Implementierung einer effizienten und nachhaltigen Agrarpolitik immer noch grundlegende Kenntnisse über Anbauflächen, Veränderungen der Produktionssysteme (z.B. der speziellen Intensität oder Fruchtfolgegestaltung) und Ertragsschätzungen fehlen.

Konkrete politische Bedeutung gewinnen entsprechende Untersuchungen durch die Beschlüsse der EU im Rahmen der gemeinsamen Agrarpolitik (GAP). Laut neuerlichem Beschluß des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Mai 2000 über den Einsatz von Flächenstichprobenerhebungen und Fernerkundung in der Agrarstatistik im Zeitraum 1999-2003 sollen zwei zentrale Vorhaben auf Gemeinschaftsebene realisiert werden:

1. Flächenschätzungen für die wichtigsten Kulturen zu erstellen.
2. Die Überwachung des Zustands der Kulturen bis zur Ernte zu gewährleisten, um auf dieser Grundlage frühzeitig Schätzungen der Erträge und Erntemengen zu ermöglichen.

Als zentrales Projekt zur Flächen- und Ertragsschätzung wurde 1988 vom Generaldirektorat für Landwirtschaft der EU in Zusammenarbeit mit dem statistischen Amt der EU (Eurostat) das MARS-Projekt (**M**onitoring **A**griculture by **R**emote **S**ensing) eingeführt. Im Rahmen des 10-jährigen Projektes soll die Technik der Satellitenfernerkundung zur Beobachtung landwirtschaftlicher Kulturen zur Operationalität weiterentwickelt werden. Durch die Integration der Satellitenfernerkundung in das agrarstatistische System der EU erhofft man sich eine länderübergreifende, hohe Objektivität der Informationsgrundlage, eine Standardisierung der Methodik und Vergleichbarkeit der Ergebnisse sowie eine schnelle Verfügbarkeit flächendeckender Daten (KING & MEYER-ROUX 1990). Die vier Hauptaktionen des MARS-Projektes stellen sich nach VOSSEN & MEYER-ROUX (1994) wie folgt dar:

1. Durchführung von Regionalinventuren.
2. Beobachtung von Vegetationsbedingungen und Ertragsindikatoren.
3. Erstellung von Modellen für Ernteertragsprognosen.
4. Schnelle EU-weite Flächen- und Ertragsprognosen für die wichtigsten Anbaufrüchte.

Die ursprünglich rein agrarstatistische Zielsetzung des MARS-Projektes wurde aufgrund des erhöhten Kontrollaufwandes innerhalb der EU-Agrarreform auf Überwachungsmethoden mit Unterstützung von Fernerkundungstechniken ausgeweitet (DELINCE et al. 1994).

Überwachungsaufgaben innerhalb der EU

Im Zuge der Agrarreform veranlaßte der Ministerrat der EU 1992, politische Maßnahmen zur Reduzierung landwirtschaftlicher Überschüsse und zur Verringerung der Produktionsintensität, zum Erhalt und zur Erweiterung von Ausgleichsflächen sowie zur Landschaftspflege durchzuführen und Abstand von der Politik der Preisstützung landwirtschaftlicher Produkte zu nehmen. Als Einkommensentschädigung können seit 1992/93 die Landwirte Anträge für eine flächenbezogene Ausgleichszahlung stellen.

Diese finanzielle Unterstützung nehmen etwa zwei Drittel der insgesamt ca. 600.000 Landwirte in Deutschland in Anspruch. Da nach geltendem EU-Recht die Mitgliedsstaaten verpflichtet sind, 5% aller Anträge vor Ort auf ihre Richtigkeit zu überprüfen, entsteht ein Kontrollaufwand von ca. 30.000 Anträgen pro Jahr (RELIN 1996).

Um den daraus resultierenden Verwaltungsaufwand zu reduzieren und zu objektivieren, unterstützt der Europäische Ausrichtungs- und Garantiefond Landwirtschaft seit 1992 alle EU-Mitgliedsstaaten, innovative fernerkundungsgestützte Kontrollverfahren anzuwenden. Einer Studie des JRC (Joint Research Centre) zufolge werden seit 1992 in zehn Ländern der EU Methoden der Fernerkundung zur Kontrolle der Antragsdaten eingesetzt (VAN DE STEENE & DELINCE 1992).

Damit die fernerkundungsgestützten Kontrollen nicht durch Bewölkung oder Sensorausfälle gefährdet werden, findet im Rahmen der EU auch eine Prüfung von Aufnahmesystemen im Mikrowellenbereich auf ihre Einsatzfähigkeit statt.

Zeitdynamische Erfassung von Landnutzungssystemen

Landnutzungssysteme unterliegen heutzutage starken Veränderungen hinsichtlich der Fruchtfolgegestaltung oder der Anbauintensität bestimmter Fruchtarten, da die Landwirte ihre Produktionssysteme den jeweiligen wirtschaftlichen, technologischen oder politischen Rahmenbedingungen rasch anpassen (BAEUMER 1994). Die Veränderungen der Landnutzungssysteme, die aus diesen Anpassungsreaktionen resultieren, können bei nicht standortgerechten Nutzungsformen und -intensitäten weitreichende ökologische Konsequenzen nach sich ziehen (Stoffeinträge, Stoffentzüge und -austräge, Bodenbearbeitung, etc.).

Zur Sicherung einer nachhaltigen, umweltschonenden Erzeugung von Nahrungsmitteln, Futtermitteln und pflanzlichen Rohstoffen wäre daher eine zeitdynamische Erfassung der Landnutzungssysteme von großer Bedeutung. Hierzu scheinen Radardaten der konventionellen SAR-Systeme besonders geeignet zu sein, da sie aufgrund ihrer Unabhängigkeit vom Wolkenbedeckungsgrad der Atmosphäre und dem Beleuchtungszustand der Erdoberfläche sowie ihrer hohen Systemstabilität ein langfristiges Monitoring ermöglichen.

1.2 Wissenschaftliche Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist die Untersuchung des Anwendungspotentials von ERS-1/-2-SAR-Daten zur fernerkundlichen Erfassung landwirtschaftlicher Landnutzungen und ihres Zustandes in einem Untersuchungsgebiet, das durch unterschiedliche naturräumliche Gegebenheiten charakterisiert ist.

Aufeinander aufbauende Teilziele sind dabei:

1. Verständnis der multiplen Einflußfaktoren auf die Radarrückstreuung.
2. Zeitreihen- und Trennbarkeitsanalyse fruchtartenspezifischer Radarrückstreuprofile.
3. Entwicklung einer radarspezifischen, multitemporalen Klassifizierungsstrategie unter Einbeziehung nichtfernerkundlicher Informationen.
4. Fruchtartenklassifizierung, einschließlich der Evaluierung verschiedener Varianten bezüglich des Klassifikators, der thematischen Auflösung, der Integration interferometrischer Kohärenzbilder, der Kombination mit Daten optischer Sensoren und der Beurteilung regionaler Unterschiede.
5. Ableitung bio- und bodenphysikalischer Parameter aus den SAR-Daten zur Zustandsbeschreibung von Fruchtartenbeständen und Eigenschaften der Bodenoberfläche.

Die vorliegende Arbeit ist so konzipiert, daß eine typische Region intensiver landwirtschaftlicher Nutzung Deutschlands untersucht wird, die sich hinsichtlich der naturräumlichen Gegebenheiten (Relief, Boden, Wachstumsbedingungen und Anbaupraktiken der Landwirte) in mehrere Teilgebiete untergliedern läßt, so daß Einflüsse der Teilgebietscharakteristik auf die Ergebnisse überprüft werden können.

Voraussetzung für eine zielführende Untersuchung der kausalen Beziehungen zwischen den Eigenschaften des Bodens bzw. des Pflanzenbestandes und der Radarrückstreuung ist der Aufbau einer schlagbezogenen Datenbank. Diese setzt sich aus Bildparametern (mittlerer Rückstreukoeffizient, Variationsmaße, Histogrammparameter, etc.) der ERS SAR-Daten und in situ gemessenen Pflanzen- und Bodenparametern zusammen, die von zahlreichen Referenzflächen in den einzelnen Teilgebieten der Untersuchungsregion zeitgleich mit den ERS-Aufnahmen über einen Untersuchungszeitraum von drei Vegetationsperioden (1996-1998) erhoben wurden.

Die ergänzenden nichtfernerkundlichen Daten, die zur Untersuchung regionaler Aspekte und witterungsbedingter Effekte benötigt werden, erforderten ferner den Aufbau eines Geographischen Informationssystems (GIS) mit folgenden Schlüsselfunktionen:

- Bereitstellung von Geodaten wie Bodeninformationen, geländemorphologische und topographische Informationen und Informationen zu regionalisierten phänologischen und meteorologischen Elementen.

- Erfassung und Bereitstellung von schlagbezogenen Landnutzungsdaten größerer Landschaftsausschnitte (Referenzgebiete) zur Trainierung von Klassifikatoren und Validierung der Klassifizierungsergebnisse.
- Erfassung und Bereitstellung von Geometriedaten der Schlaggrenzen und deren Relation zu den erhobenen bio- und bodenphysikalischen Parametern der Ground Truth-Kampagnen.

Für eine Bewertung der ERS-Daten im Sinne der Zielsetzung sind alle systembedingten Parameter in Beziehung zu den beobachteten Objekten zu setzen; insbesondere das Verhältnis zwischen dem geometrischen Auflösungsvermögen des Sensors (ca. 25 x 25 m) und der durchschnittlichen Größe der Landnutzungseinheiten limitiert bestimmte Anwendungen. Bezogen auf das überwiegend kleinstrukturierte Untersuchungsgebiet beschränkten sich daher die Auswertungen grundsätzlich auf schlagbezogene Eigenschaften.

1.3 Stand der Forschung

Seit Beginn der 90er Jahre haben entscheidende Entwicklungen in der Radarfernerkundung stattgefunden, die nicht zuletzt durch die Einführung satellitengetragener SAR-Systeme wie ERS-1/-2, JERS-1 und RADARSAT ausgelöst und vorangetrieben wurden. Die zuverlässige, kontinuierliche Verfügbarkeit von SAR-Daten mit erstaunlich konstanter radiometrischer Stabilität (ERS: $\pm 0,25$ dB) führte dazu, daß neben den grundlagenorientierten Forschungsschwerpunkten verstärkt Anwendungsforschung in den verschiedenen geowissenschaftlichen Disziplinen und bei der Umweltbeobachtung der Erdoberfläche betrieben wurde.

Dabei standen zunächst ozeanographische Themenfelder im Vordergrund, wie beispielsweise die Untersuchung der Meeresoberfläche hinsichtlich Wellenfronten und ozeanische Zirkulation, das Monitoring von Meereseis und Eisbedeckungsgrad oder die Detektion von marinen Ölkontaminationen.

Durch die Empfindlichkeit des SAR-Sensors in bezug auf die Rauigkeit der Oberfläche und deren dielektrische Eigenschaften (Feuchtigkeitsgrad) ergab sich aber auch ein Potential für terrestrische Applikationen im Bereich der Land- und Forstwirtschaft, Ökologie und Umweltforschung, der Geologie und des Katastrophenmonitorings. Bekannte Anwendungen sind die Klassifizierung und das Monitoring der Landnutzung, raum-zeitliche Erfassung von Überflutungen sowie die Detektion von Rodungsaktivitäten und Waldbrand-schäden im tropischen Regenwald.

Interferometrische Anwendungen (DGM-Erzeugung, Bewegungsdetektion von Gletschern, etc.) wurden insbesondere durch die Tandem-Mission von ERS-1 und ERS-2 gefördert.

Aus der Vielzahl der Themenfelder, in die sich die Radarforschung bis heute diversifiziert hat, sind folgende drei Themenfelder für vorliegende Arbeit von besonderer Bedeutung:

- In vielen Bereichen der SAR-Technologie (z.B. Kalibrierung) und Vorverarbeitung von SAR-Bildern kann heute auf quasi-operationelle Verfahren zurückgegriffen wer-

den (LAUR et al. 1998). Zum Standard zählen Programme zur qualitativ hochwertigen Geocodierung und Orthorektifizierung (SCHREIER 1993; ULABY 1998). Auch die Koreferenzierung (relative Entzerrung) von SAR-Szenen, die für die Auswertung multitemporaler ERS-Daten und die interferometrische Weiterverarbeitung entscheidend ist, kann mit Genauigkeiten im Subpixelbereich durchgeführt werden (GEUDTNER 1995). Weiterer Forschungsbedarf besteht hingegen noch im Bereich der automatischen Segmentierung von SAR-Bilddaten (u.a. wichtiger Verarbeitungsschritt zur Ableitung von Parzellengrenzen). Bestehende Techniken basieren überwiegend auf sogenannten Fusionsalgorithmen (*region-growing by merging*) und/oder Algorithmen zur Kantendetektion (WHITE 1994; QUEGAN et al. 1993; WEULE 1994; AURICH & WEULE 1995; HEATH et al. 1998). Eine interessante Erweiterung des *region-growing by merging* Verfahrens besteht in der Integration eines rasterbasierten Formparameters, der bei der Fusion zweier Segmente die Plausibilität der geometrischen Form des neu entstehenden Segments evaluiert und somit die Qualität der Segmentierung auch bei stark *speckle*-gestörten SAR-Daten entscheidend verbessert (GÜNZL & HELLWICH 2000). Ein neuartiges Konzept zur Mustererkennung und Abgrenzung flächenhafter Objekte gleicher Merkmalsausbildung basiert auf einem fraktal-hierarchischen Segmentierungsverfahren (BAATZ 1999).

- Im Bereich der Klassifizierung kann festgestellt werden, daß überwachte *Maximum-Likelihood*-Klassifizierungen kombiniert mit einem objekt- bzw. schlagbasierten Ansatz weit verbreitet sind (WOODING et al. 1995; REMONDIERE & LAUR 1998). Alternativ dazu werden wissensbasierte, hierarchische Klassifizierungsansätze evaluiert (DOBSON et al. 1995; BAN & HOWARTH 1999). Da der Informationsgehalt einzelner SAR-Szenen des ERS-1/-2, JERS-1 oder RADARSAT in Bezug auf eine Bildklassifizierung beschränkt ist, zielen aktuelle Forschungen verstärkt auf eine Erweiterung der Datenbasis durch die Mitnutzung von Merkmalen der Texturstatistik erster und zweiter Ordnung (KUROSU et al. 1999; SOARES et al. 1997; HAACK & BECHDOL 2000) sowie der Kohärenz (WEGMÜLLER et al. 1995; KÜHBAUCH et al. 1999). Neue Methoden zur Extraktion geeigneter synthetischer Bildkanäle aus hochdimensionalen Merkmalsräumen (*feature extraction*) werden von HUBER & DUTRA (1998), PIERCE et al. (1998a) und HABERMEYER (1999) vorgestellt. Eine sinnvolle Ergänzung für die Klassifizierung größerer Landschaftsausschnitte stellt nach LEMOINE & KIDDS (1998) eine wissensbasierte Grobsegmentierung des Untersuchungsgebietes dar, die unter Zuhilfenahme zusätzlicher GIS-Informationsquellen aus den Bereichen Bodeninformation, Relief, und Agrarmeteorologie erfolgen kann. Positive Synergieeffekte und damit verbesserte Klassifizierungsergebnisse sind nach KELLNDORFER et al. (1998a; 1998b), HAACK et al. (2000) und KUPLICH et al. (2000) durch Kombinationen mehrerer Sensoren zu erzielen. Dies gilt sowohl für Kombination verschiedener Radarsensoren (ERS/JERS; ERS/RADARSAT) als auch für Kombinationen von Radar- mit optischen Sensoren (ERS/Landsat TM; ERS/SPOT; ERS/IRS).
- Ein weiterer Forschungsschwerpunkt konzentriert sich auf die Entwicklung von Algorithmen zur Ableitung bio- und bodenphysikalischer Parameter aus SAR-Daten für ter-

restrische (land- und frostwirtschaftliche) Anwendungen, deren Status umfassend von SAICH et al. (1995) und BORGEAUD & SAICH (1999) dokumentiert wird. Im Mittelpunkt des Interesses stehen dabei indikative Parameter, die den Zustand und die Vitalität des Pflanzenbestandes beschreiben und Aufschluß über die Produktions- bzw. Ertragsbewertungen geben können. Dies schließt in erster Linie die Pflanzenparameter Biomasse, Feuchte bzw. Wassergehalt, Dichte und Entwicklungsstadium ein.

Großes Interesse gilt auch der Ableitung der oberflächennahen Bodenfeuchte aus SAR-Daten (DU et al. 1999; DUBOIS et al. 1995; ENGMAN & CHAUHAN 1995; GIACOMELLI et al. 1995; HOEBEN & TROCH 1998; LE TOAN et al. 1998; MATTIKALLI et al. 1998; SCHOUPS et al. 1998; SHOSHANY et al. 1998; SHOSHANY et al. 2000; ULABY et al. 1996; WANG et al. 1997; WEGMÜLLER 1997). Informationen über die raum-zeitlichen Veränderungen der Bodenfeuchte können u.a. als Indikator für die Wasserversorgung der Pflanzen, als Eingangsparameter für Modellierungen zur Bodenerosion und Evapotranspiration sowie zur Ermittlung des Bewässerungsbedarfs oder geeigneter Zeitpunkte für bestimmte Bodenbearbeitungsmaßnahmen dienen (BRUCKLER & WITONO 1989; DEMIRCAN 1995; SAICH et al. 1995).

Für die Rückstreumodellierung vegetationsfreier Oberflächen ist die Bodenrauigkeit neben der Bodenfeuchte von größter Bedeutung (BEAUDOIN et al. 1989; BEAUDOIN et al. 1990; BENALLEGUE et al. 1995; CHEN et al. 1995; COLPITTS 1998; EVANS et al. 1992; ULABY 1998). Forschungsaktivitäten zu diesem Themen umfassen auch neue Methoden zur Beschreibung, Messung und Parametrisierung verschiedener Rauigkeitskomponenten (BORGEAUD et al. 1995; BORGEAUD & BELLINI 1998; DAVIDSON et al. 1998; MANNINEN et al. 1998; MATTIA et al. 1998; OH & KAY 1998).

Große Anstrengungen wurden in den letzten Jahren unternommen, robuste Algorithmen zur Ableitung der gewünschten Parameter aus Radardaten zu entwickeln, die zunehmend physikalische Gesetzmäßigkeiten berücksichtigen und für ein breites Spektrum von Sensorparametern gültig sind. Bekannte Ansätze zur Rückstreumodellierung von Pflanzenbeständen sind das MIMICS (*Michigan Microwave Canopy Scattering Model*) (ULABY et al. 1990) sowie das RT2 (*2nd Order Radiative Transfer Model*) (SAICH et al. 1995). Zur Modellierung der Rückstreuung von Bodenoberflächen wird häufig das IEM (*Integral Equation Method*) (FUNG et al. 1992; FUNG et al. 1996) bzw. das MEM (*Michigan Empirical Model*) (OH et al. 1992) eingesetzt. Die aus den physikalischen Modellen gewonnenen Erkenntnisse stellen eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung und das Design neuer Radarsensoren dar (SAICH et al. 1995).

Die praktische Anwendbarkeit der theoretischen Modelle wird allerdings durch ihre Komplexität, ihren hohen Parametrisierungsaufwand und ihre Anforderungen an bestimmte Systemparameter (multifrequente, -polarisierte, -angulare SAR-Systeme) behindert (SAICH et al. 1995; COOKMARTIN et al. 1998). Dies hat zur Folge, daß im Fall von ERS-Daten vielfach auf empirische oder semi-empirische Modelle zurückgegriffen werden muß, deren räumliche und zeitliche Übertragbarkeit in der Regel nicht gegeben ist (SAICH et al. 1995; BORGEAUD & SAICH 1999).

2 Grundlagen der Radarfernerkundung

Radarfernerkundungssysteme sind aktive Systeme, die im Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums mit Wellenlängen zwischen etwa 1 cm und 1 m operieren. Die Hochfrequenzimpulse, die von einer Antenne auf das abzubildende Gebiet gesendet werden, werden von den beleuchteten Geländeobjekten zurückgestreut und in einem späteren Verarbeitungsschritt in ein Bild umgesetzt (KRÄTZSCHMAR & HELLMANN 1999).

2.1 ERS-1/-2 Sensorcharakteristik

ERS-1¹ und ERS-2 (*European Remote Sensing Satellite*) sind zwei von der European Space Agency (ESA) betriebene Radarsatelliten. Beide Systeme befinden sich in polnahen sonnensynchronen Orbits mit einer Inklination von 98,52°. An Bord der nahezu baugleichen Satelliten sind hauptsächlich drei Sensoren installiert: (1) ein C-Band AMI (*Active Microwave Instrument*), (2) ein K-Band Radar Altimeter (im Nadir ausgerichtet) und (3) ein ATSR (*Along Track Scanning Radiometer*) als passives Instrument, bestehend aus einem Infrarot- und Mikrowellenempfänger. Das AMI kann dabei in einem der drei folgenden Modi arbeiten: (1) SAR (*Synthetic Aperture Radar*) Bildmodus, (2) SAR Wellenmodus oder (3) Windmodus. Letzterer dient zur Messung von Windgeschwindigkeit und -richtung mit Hilfe eines Scatterometers (LILLESAND & KIEFER 1994). Beide Satelliten befinden sich auf Flughöhen von 782-785 km. Die Bildwiederholungsrate beträgt in der momentanen multidisziplinären Phase 35 Tage. Aufgrund von Überlappungen des aufgenommenen Geländestreifens (*swath*) kann die Wiederholungsrate auf 17 Tage verkürzt werden. Während der Tandemphase, die am 03.06.1996 beendet wurde, überflogen ERS-1 und ERS-2 gleiche Gebiete im Abstand von 24 Stunden.

Die technischen Merkmale beider Satelliten sind in Tab. 2-1 zusammengefaßt:

Tab. 2-1: Sensorcharakteristik des AMI und Radaraltimeters von ERS-1 und ERS-2

	ERS-1	ERS-2				
Launch	25.07.91	20.04.95				
Sensor	Spektrale Bänder	Frequenz	Polarisation	Einfalls-Winkel	Räumliche Auflösung	Swath width (km)
AMI (Active Microwave Instrument)						
SAR Bildmodus	C-Band	5,3 GHz	VV	23°	12,5-28 m	100 km
SAR Wellenmodus	C-Band	5,3 GHz	VV	23° ± 0,5°	30 m	5 x 5 km
Wind Scatterometer	C-Band	5,3 GHz	VV	25°- 59° 18°- 47°	50 km	500 km
Radar Altimeter						
	K-Band	13,8 GHz			10 cm Höhe	1,3°

¹ Aufgrund technischer Probleme wurde der Betrieb des ERS-1 am 10.03.2000 endgültig eingestellt.

Die Mikrowellenimpulse werden beim ERS-1/-2 mit einer Pulswiederholfrequenz von ca. 1680 Hz in linear-vertikaler Polarisation¹ im Frequenzbereich von 5,3 GHz (C-Band) emittiert und in gleicher Polarisation kohärent registriert. Die Kohärenz (s. Kapitel 2.6.1) der Radarsignale wird für die Erzeugung einer entfernungsunabhängigen Azimutauflösung genutzt, indem durch die Flugbewegung des Trägersystems mit der relativ kleinen Antenne des Sensors (10 m) und der späteren kohärenten Integration im SAR-Prozessor die Apertur einer großen Antenne synthetisiert wird. Detaillierte Erläuterungen zur Arbeitsweise und Funktionalität des SAR gibt ELACHI (1988).

2.2 Physikalische Grundlagen der Radarfernerkundung

2.2.1 Radargleichung

Die Radargleichung stellt die Beziehung zwischen der abgestrahlten Leistung des Systems und der von der Antenne empfangenen Leistung her. Sie berücksichtigt technische und physikalische Eigenschaften des Radarsystems und des reflektierenden Targets. Für ein monostatisches System, bei dem die Sendeantenne gleichzeitig die Empfangsantenne ist, ist die empfangene Leistung P_r bei Streuung an einem Target gegeben durch

$$P_r(\theta_a, \phi_a) = \frac{P_t G^2(\theta_a, \phi_a) \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \cdot \sigma, \quad \text{Gl. 2-1}$$

wobei (θ_a, ϕ_a) die Richtung von der Antenne zum Target im Abstand R angibt, P_t die Sendeleistung, λ die Wellenlänge und $G(\theta_a, \phi_a)$ die Antennencharakteristik ist. Die Eigenschaft des Targets spiegelt sich im Radarrückstreuquerschnitt (*radar cross section*) σ wider, dessen räumliche Ausdehnung sehr viel kleiner als die Breite des Radarstrahls ist. Ein solcher Streuer wird Punktstreuer genannt, auch wenn er eine komplexe Geometrie und anisotrope Streueigenschaften haben kann. Er hat die physikalische Einheit einer Fläche und beschreibt die relative Stärke der Streueigenschaften eines Targets in eine bestimmte Richtung als *effektive Streufläche* und ist unabhängig vom Abstand R .

Die Streuung an ausgedehnten Targets erhält man durch Integration über die ausgeleuchtete Fläche A :

$$P_r(\theta) = \iint \frac{P_t G^2(\theta_a, \phi_a) \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \cdot \sigma^0 dA, \quad \text{Gl. 2-2}$$

mit θ dem Einfallswinkel relativ zur Vertikalen gesehen. $\sigma^0 = \sigma/A$ ist der Rückstreuoeffizient oder normierte Radarrückstreuquerschnitt des ausgedehnten Targets (ULABY 1986a).

Die vom ERS gemessene Intensität ist proportional zur empfangenen Leistung. Sie läßt sich mit einer Kalibrationsvorschrift (LAUR et al. 1998) in σ^0 umrechnen und wird in der

¹ Die Polarisation kennzeichnet die Orientierung des elektrischen Feldes einer elektromagnetischen Welle (DIN 18716-3, 1997).

Regel in Dezibel (dB) angegeben. Problematisch ist dabei der vorherrschende *Speckle*-Effekt, der ein starkes signalabhängiges Rauschen darstellt. Er macht eine statistische Auswertung des Radarsignals notwendig.

2.2.2 Statistische Eigenschaften des Radarsignals

Die statistischen Eigenschaften des Radarsignals sind wesentlich von der multiplikativen Störung des *Speckle* bestimmt, welche ursächlich auf die verwendete kohärente, nahezu monochromatische Strahlung solcher Systeme zurückzuführen ist (BÄHR & VÖGTLE 1998).

Wird eine glatte Oberfläche von einer Radarwelle unter schrägem Einfallswinkel bestrahlt, findet eine spiegelnde Reflexion statt, so daß keine Energie zum Sensor zurückgestrahlt wird. Die meisten natürlichen Oberflächen sind jedoch rau und streuen daher Energie in sämtliche Richtungen, also auch zur Antenne, zurück. Da die Rückstreuung der Wellen durch Reflexion an vielen verschiedenen positionierten Streuern innerhalb des vom Sensor aufgelösten Bildelementes erfolgt (z.B. bei einer Vegetationsdecke an Blättern, Halmen und Fruchtständen), ergeben sich durch unterschiedliche Signallaufzeiten der Einzelstreuer Unterschiede in der Phase der reflektierten Wellen, so daß die ursprüngliche Kohärenz verloren geht. Je nach Phase führt die Überlagerung der Wellen zu einer konstruktiven oder destruktiven Interferenz, die sich in einer merklichen Variation der empfangenen Signalleistung niederschlägt. In der komplexen Ebene entspricht die Überlagerung der Teilwellen einer Addition der Signalvektoren, deren Länge und Orientierung der Amplitude bzw. der Phase entspricht (ELACHI 1988). Da die Position und Ausrichtung der Einzelstreuer nicht bekannt ist, wird der resultierende Empfangsvektor eines Pixels in einem physikalischen Modell als Summe von vielen zufällig verteilten Punktstreuern beschrieben (*Random Walk*). Für die Betrachtung einer ausreichend großen Anzahl von „Summensignalen“ bzw. Pixeln existiert ein vielfach validiertes mathematisches Modell zur Beschreibung der statistischen Eigenschaften des Radarsignals.

Es bleibt festzuhalten, daß die Störung des *Speckle* direkt aus dem Nutzsignal resultiert. Dadurch ist die Intensität der Störung an die Signalintensität gekoppelt: Die Signalvariation wächst mit der Intensität des Signals an und kann durch die Multiplikation des Ausgangssignals mit einem Zufallsprozeß dargestellt werden (multiplikative Störung).

2.2.3 Bildgebung und synthetische Apertur

Hochauflösende Radarsensoren sind aufwendige Systeme. Die hohe geometrische Auflösung wird durch zwei Aufnahmeprinzipien ermöglicht: Die synthetische Apertur, die in Flugrichtung (*Azimuth*) des Satelliten hergestellt wird und quer dazu (*Range*) eine Laufzeitmessung des Signals. Bei Satelliten mit SAR-Systemen wird während des Überflugs ein keulenförmiger Mikrowellenstrahl zum Boden ausgesandt. Durch die relativ kurze Antenne (10 m) entsteht ein breiter Strahl, der einen großen Bereich auf der Erdoberfläche ausleuchtet. Dadurch wird ein Objekt am Boden während des Überfluges für längere Zeit bestrahlt (Abb. 2-1).

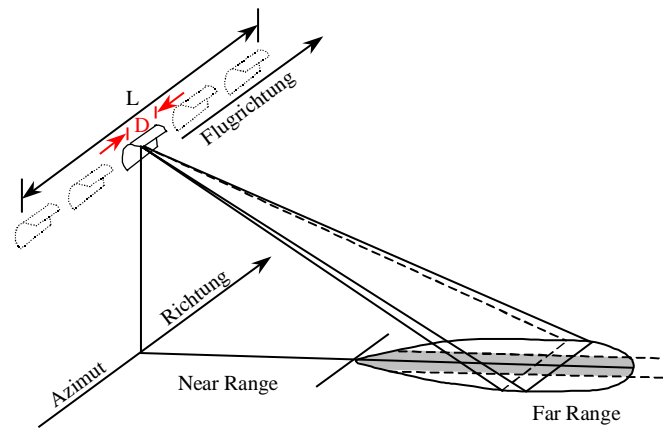


Abb. 2-1: Auflösung des Radars mit synthetischer Apertur (L = synthetisch verlängerte Antenne, D = die wirkliche Länge der Antenne) (nach LILLESAND & KIEFER 1994)

Durch die Bewegung des Satelliten relativ zur Erdoberfläche entsteht eine Dopplerverschiebung (geschwindigkeitsabhängige Frequenzverschiebung) der reflektierten Welle. Während des Vorbeifluges liegt ein Punkt am Boden zunächst vor dem Satelliten, bis er überflogen wird, danach hinter ihm. Je weiter ein Bodenelement vor dem Satelliten liegt, desto mehr ist die Abstrahlrichtung in Flugrichtung und um so größer ist die Frequenzverschiebung zu höheren Frequenzen hin. Auf Höhe des Satelliten ist die Dopplerverschiebung null, da keine Geschwindigkeitskomponente in Abstrahlrichtung vorhanden ist, hinter dem Satelliten wird die Frequenz verringert. Dadurch wird eine Ortszuordnung von Einzelbeiträgen des gesamten empfangenen Signals möglich. Solange ein Punkt auf dem Boden im Sichtfeld der Antenne liegt, werden rückgestreute Signale von ihm empfangen.

Man kann sich die Größe der synthetischen Apertur als den Teil der Flugbahn vorstellen, entlang derer der Satellit einen Punkt am Boden mit seinem breiten Strahl beleuchtet. Die Auflösung eines Radarsystems am Boden ist proportional zur Größe der Apertur und im optimalen Fall die Hälfte der realen Antennenlänge.

2.3 Laufzeitcodierung und Reliefeinfluß

Quer zur Flugrichtung (*Range*-Richtung) läßt sich keine synthetische Apertur erzeugen. Zur Auflösung in *Range*-Richtung wird die Länge der Radarpulse bzw. deren zeitliche Unterteilung genutzt. Im Gegensatz zu optischen Systemen wird die unterschiedliche Laufzeit der Radarsignale in einem kegelförmigen Strahl gemessen, der unter einem schrägen Abstrahlwinkel einen breiten Streifen der Erdoberfläche überstreicht. Um Zeitpunkte zu markieren, verwendet man Radarpulse statt kontinuierlicher Signale. Eine untere Grenze der Auflösung in *Range*-Richtung ist durch die Pulslänge gegeben (je kürzer der Puls, desto höher die Auflösung); es darf also kein zweiter Radarpuls einen Bodenstreifen treffen, solange nicht alle reflektierten Signale empfangen sind. Um die Leistungsfähigkeit des

Systems zu steigern, wird der Puls durch aufgeprägte Frequenzen (*Chirps*) unterteilt, deren Bandbreite die Auflösung bestimmen.

Die Laufzeit des Signals verändert sich je nach Geländeneigung und des lokalen Einfallswinkels der Radarwellen (Abb. 2-2a). Ist das Gelände zum Sensor hin geneigt, wird dieser Hang verkürzt dargestellt (*Foreshortening*) (Abb. 2-2b), dabei bewirkt die Erhöhung am hinteren Ende des Hanges eine Entfernungsverringerung zum Sensor und damit eine etwas verkürzte Laufzeit des Signals. Im Extremfall, z.B. bei hohen Gebäuden, ist der obere Teil des Gebäudes näher zum Sensor hin ausgerichtet als der untere Teil; dadurch erscheint ein solches Gebäude zum Sensor hin geneigt (*Layover*) (Abb. 2-2c). Bei landwirtschaftlich genutzten Flächen sind die Neigungen des Geländes in der Regel geringer als der Einfallswinkel des Radarstrahls, so daß dieser Fall unwahrscheinlich ist. Aber auch bei flacheren, dem Sensor zugeneigten Hängen wird durch den steileren Einfall des Signals mehr Energie zum Sensor zurückgeworfen; der Hang erscheint heller im Bild. Das umgekehrte Verhalten zeigt sich an einem vom Sensor weggeneigten Hang. Im Extremfall, wenn die Hangneigung größer ist als der lokale Einfallswinkel, liegt ein Gebiet sogar im Radarschatten (*Shadowing*) (Abb. 2-2d). Da keine Energie einfallen kann, ist auch die zurückgestrahlte Energie in diesem Fall gleich null. Diese Bildbereiche stellen sich völlig schwarz dar. Entsprechend weisen vom Sensor weggeneigte Flächen, die nicht gänzlich beschattet sind, eine schwache Rückstreuung auf.

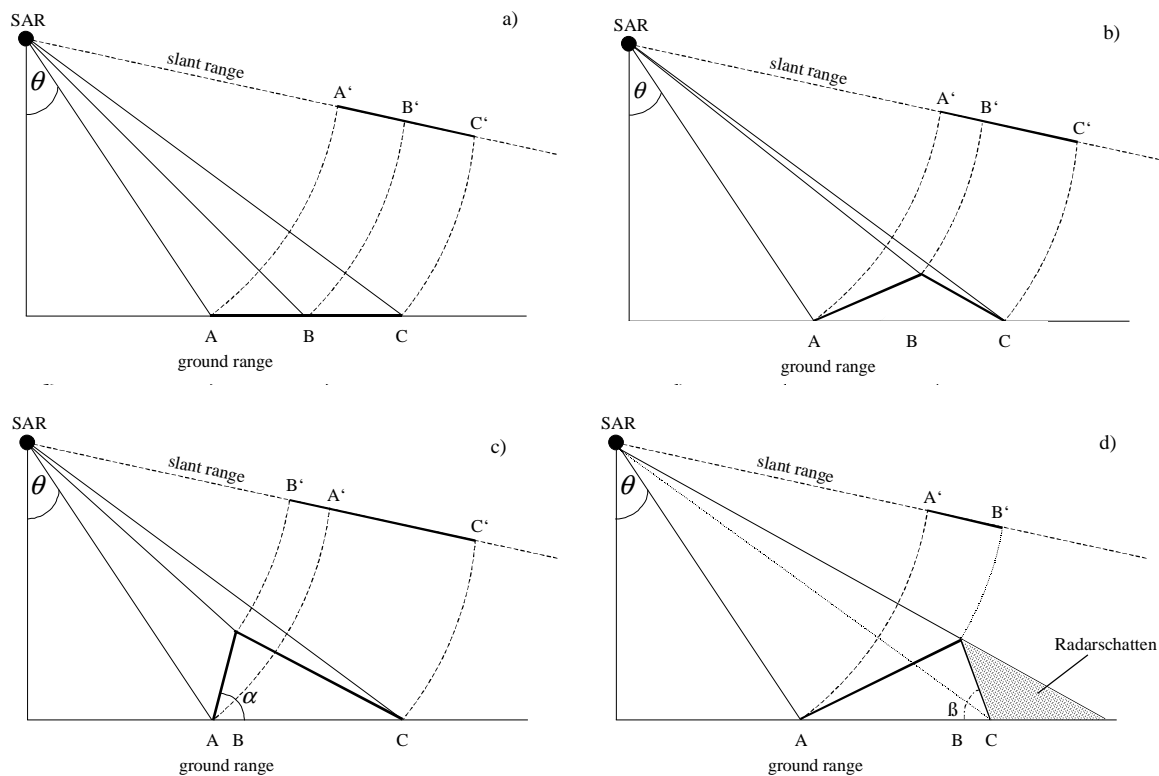


Abb. 2-2: Reliefeinflüsse auf die SAR-Bildgeometrie (nach SCHREIER 1993, S. 174)

2.4 Rückstreumechanismen landwirtschaftlicher Kulturen

Die Radarrückstreuung landwirtschaftlicher Kulturen wird grundsätzlich durch zwei Gruppen von Faktoren gesteuert: dielektrische (materialbedingte) und geometrische Faktoren (Form, Rauigkeit, Volumen). Beide Faktoren sind zeitvariant und werden durch langfristige Veränderungen im phänotypischen Erscheinungsbild der Pflanzen, kurzfristige Witterungseinflüsse (Wind, Niederschlag) und anthropogene Maßnahmen (Ernte, Bodenbearbeitung, etc.) beeinflusst (DOBSON et al. 1995). Das Rückstreuverhalten landwirtschaftlicher Kulturen steht ferner in enger Verbindung mit dem Streuverhalten der jeweiligen Böden. Während bei voll entwickeltem Pflanzenbestand die Rückstreuung fast ausschließlich durch dessen Struktur (Größe, Form und Orientierung der Pflanzenbestandteile sowie Bestandesdichte) definiert wird, bestimmen vor allem während der frühen Entwicklungsstadien die Eigenschaften des Bodens (Rauigkeit und aktuelle Feuchte) die Intensität des rückgestreuten Signals (WOODING et al. 1995).

Dem übergeordnet ist der Anteil der differenzierten Rückstreuerquerschnitte von den Sensorparametern Frequenz (λ), Polarisation (p) und Einfallswinkel (θ) abhängig (ULABY et al. 1986a).

Das komplexe Wirkungsgefüge der einzelnen Faktoren ist in Abb. 2-3 zusammengefaßt:

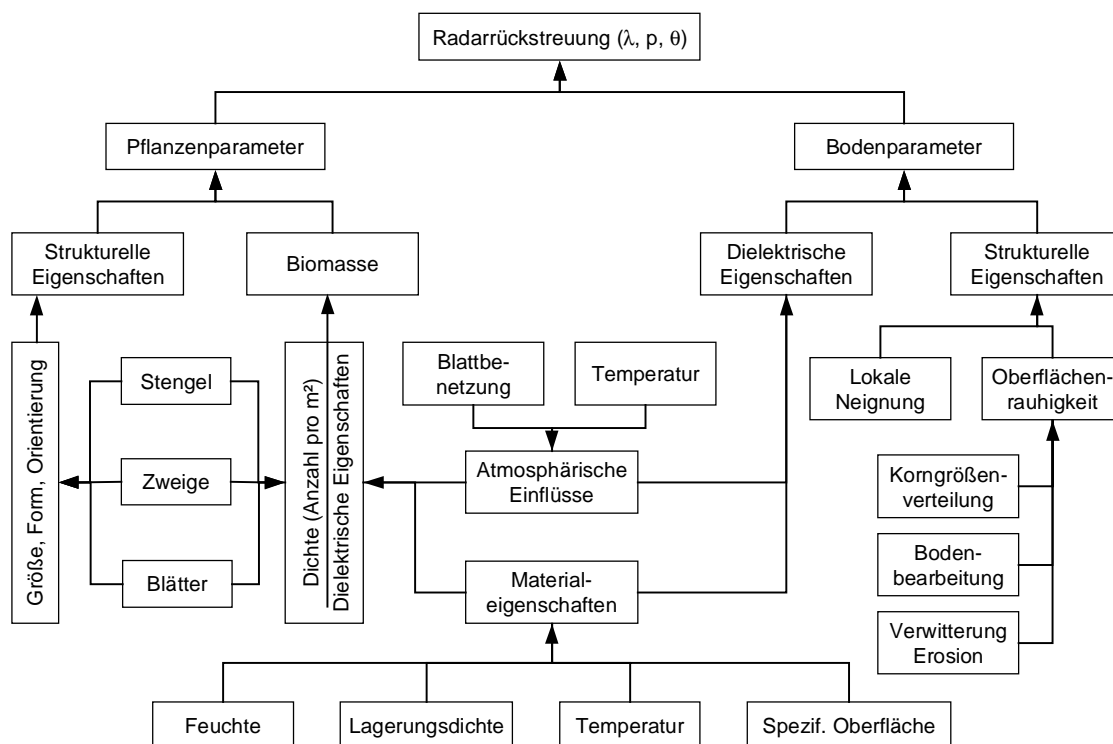


Abb. 2-3: Steuernde Faktoren der Radarrückstreuung von vegetationsbedeckten Erdoberflächen (nach DOBSON et al. 1995)

2.4.1 Materialeigenschaften

Neben den Struktureigenschaften beeinflussen die Materialeigenschaften die Stärke der Rückstreuung. Mikrowellen, die auf ein Objekt auftreffen, werden aufgrund komplexer Mechanismen auf molekularer Ebene absorbiert und reflektiert. Qualität und Quantität der Wellentransformation sind maßgeblich von den dielektrischen Eigenschaften des Objekts abhängig (ULABY et al. 1986b). Je leitfähiger ein Material bei der Frequenz der einfallenden Strahlung ist, desto mehr Leistung reflektiert es. Physikalisch werden die elektrischen Materialeigenschaften durch die komplexe Dielektrizitätszahl ϵ_c ausgedrückt. Üblicherweise wird die relative Dielektrizitätszahl ϵ_r verwendet. Sie wird aus ϵ_c und der Dielektrizitätskonstante des freien Raumes ϵ_0 durch folgende Beziehung berechnet:

$$\epsilon_r = \epsilon_c / \epsilon_0 . \quad \text{Gl. 2-3}$$

Die relative Dielektrizitätszahl ist ebenfalls komplex und besteht aus einem Real- (ϵ_r') und Imaginärteil ($i\epsilon_r''$):

$$\epsilon_r = \epsilon_r' + i\epsilon_r'' . \quad \text{Gl. 2-4}$$

Der Realteil beträgt 1 für Vakuum und Luft. Er hängt mit der Leitfähigkeit des Materials zusammen und beeinflusst die Stärke der Streuung an der Oberfläche eines Materials. Für Wasser ist der Realteil 80, für trockenes Pflanzenmaterial etwa 3. Daher wird die Radar-rückstreuung oft mit dem Wassergehalt von Pflanzen oder Boden erklärt. Hingegen wird die Dämpfung bzw. Absorption einer Welle in einem Medium vom Imaginärteil bestimmt.

Somit wird die Eindringtiefe¹ von Mikrowellen in ein Medium auch von dessen dielektrischen Eigenschaften seiner obersten Schichten bestimmt. Hohe Absorptionskoeffizienten verhindern ein tiefes Eindringen. Dieser Streumechanismus wird als Oberflächenstreuung bezeichnet (ULABY et al. 1982a).

2.4.2 Strukturelle Eigenschaften

Bei konstantem Einfallswinkel und Frequenz wird die Streuung einer Welle an der Oberfläche eines Objektes entscheidend von dessen Rauigkeit beeinflusst. Zunehmende Rauigkeit einer Oberfläche verursacht eine Zunahme der diffusen Rückstreuung (Abb. 2-4).

Dadurch wird ein großer Anteil der einfallenden Energie in Richtung des Sensors zurückgestreut. Glatte Oberflächen weisen eine gerichtete, vom Sensor wegorientierte Reflexion auf. Bedingt durch den schrägen Einfallswinkel erscheinen daher glatte Oberflächen im Radarbild schwarz.

¹ Die Eindringtiefe ist die Tiefe unter der Oberfläche eines Materials, in der auftreffende Strahlung auf 1/e (d.h. ca. 37%) ihrer ursprünglichen Stärke abgeschwächt wird (DIN 18716-3, 1997).

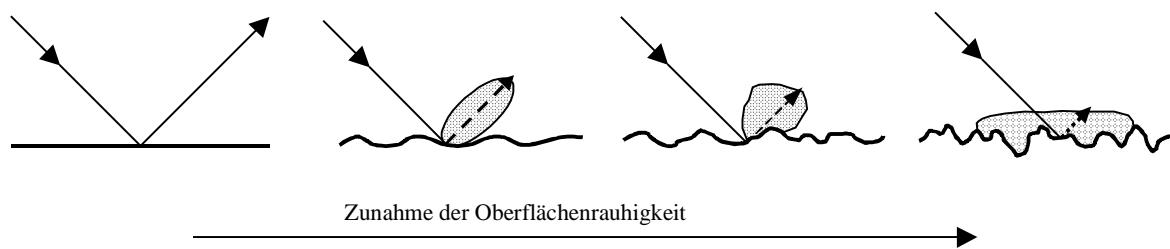


Abb. 2-4: Wellenstreuung in Abhängigkeit der Bodenrauigkeit (nach ELACHI 1988)

Die relative Rauigkeit einer Oberfläche kann anhand des Rayleigh- und des Fraunhofer-Kriteriums beschrieben werden. Nach dem Rayleigh-Kriterium gilt eine Oberfläche dann als rau, wenn der lokale Höhenunterschied der Oberfläche h ein Achtel der Wellenlänge λ , dividiert durch den Cosinus des lokalen Einfallswinkels θ übersteigt (LILLESAND & KIEFER 1994). Ein strengeres Maß für die Definition einer rauhen Oberfläche stellt das Fraunhofer-Kriterium dar. Hierbei muß die Phasendifferenz $\Delta\phi$ größer sein als $\pi/8$:

$$\Delta\phi = 2 k h \cos\theta, \quad \text{Gl. 2-5}$$

wobei: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Die strukturellen Eigenschaften, die das Rückstreuverhalten eines Pflanzenbestandes im wesentlichen bestimmen, können durch die Größe, Form und Orientierung generativer und vegetativer Organe sowie die allgemeine Wuchshöhe, den Reihenabstand und die Pflanzendichte beschrieben werden.

Die Form von Objekten kann ferner zu sehr starken punktuellen Rückstreuungen führen, wenn benachbarte glatte, meist metallische Oberflächen eine Doppelreflexion verursachen. Solche als Winkel- bzw. *Corner*-Reflektoren bezeichnete Objekte können deutlich erkennbare Strahlenartefakte im Radarbild erzeugen, die als ideale Referenzpunkte für die Koreferenzierung genutzt werden können¹.

2.4.3 Volumenstreuung

Die Volumenstreuung ist die Streuung von Mikrowellenstrahlung innerhalb eines Körpers und wird von der Zusammensetzung des Mediums und der Eindringtiefe der Wellen qualitativ und quantitativ bestimmt (HOLECZ 1993). Der auf Absorptions- und Transmissionsvorgänge im Medium zurückzuführende Streuprozess zeigt eine geringe Abhängigkeit vom Einfallswinkel. Durch die Vielzahl der Streuzentren und den dadurch bedingten hohen Anteil an inkohärenter Strahlung, wird im Gegensatz zur Oberflächenstreuung ein höherer Anteil an Kreuzpolarisation beim Empfang der Wellen registriert. Aufgrund ihrer Komple-

¹ Insgesamt waren drei derartige *Corner*-Reflektoren in allen SAR-Szenen zu beobachten, die jeweils die Rückstreumaxima der entsprechenden Szene und damit hervorragende Paßpunkte darstellten.

xität läßt sich die Volumenstreuung nur bedingt mathematisch formulieren (ISHIMARU 1978). Rückstreuquerschnitte, die hauptsächlich auf Volumenstreuung zurückzuführen sind, haben in der Regel höhere Beträge als solche, die durch Oberflächenstreuung dominiert werden.

2.5 Ableitung kalibrierter Rückstreukoeffizienten σ^0 aus ERS SAR SLC-Daten

Zur bodenphysikalischen und vergleichenden Interpretation von SAR-Daten sind sowohl absolute als auch relative Kalibrierungen nötig. Die Ableitung kalibrierter Radarrückstreukoeffizienten σ^0 eines ausgedehnten Targets umfaßt dabei zwei wichtige Schritte:

1. Korrektur der Variation des *Replika Pulse Power*¹.
2. Korrektur der ADC² Sättigung.

Die Korrektur des Replikapulses anhand eines Referenzwertes ist lediglich für ERS-1 SAR-Daten notwendig. ADC-Sättigung hingegen führt bei beiden Satelliten zu einer Unterschätzung der gemessenen Radarrückstreuung. Da der Sättigungsbereich beim ERS-2 im Vergleich zum ERS-1 deutlich reduziert ist, ergeben sich für ERS-2 Aufnahmen geringere zu korrigierende Signalverluste. Für Gebiete mit hohen Rückstreukoeffizienten (> -3 dB) kann die sättigungsbedingte Unterschätzung beim ERS-1 mehrere Dezibel betragen (LAUR et al. 1998).

Für ERS-2 SAR SLC-Daten stellt sich die vereinfachte Gleichung nach LAUR et al. (1998) wie folgt dar:

$$\sigma^0 = \frac{\langle A^2 \rangle}{K} \frac{\sin \alpha_D}{\sin \alpha_{REF}} \frac{1}{S_F^2} SV \frac{1}{G(\theta_D)^2} \frac{R_D^3}{R_{REF}^3}, \quad \text{Gl. 2-6}$$

wobei:

- K = SLC Kalibrierkonstante (dB)
- $\langle A^2 \rangle$ = mittlerer Grauwert des ausgedehnten Targets
- α_D = Einfallswinkel am ausgedehnten Target (einschließlich der lokalen Hangneigung)
- α_{REF} = Referenz-Einfallswinkel (23°)
- S_F = Aufzeichnungsrate der SLC-Daten
- SV = Signalverlust (*power loss*) durch ADC
- $G(\theta_D)^2$ = Antennencharakteristik am ausgedehnten Target
- R_D = Abstand des ausgedehnten Targets in *Slant Range* (Schrägentfernung)
- R_{REF} = Referenzabstand zum *Mid-Swath* (847,0 km)

¹ Der *Replika Pulse Power* dient als repräsentative Größe des Sendeimpulses zur radiometrischen Korrektur bei der SAR-Prozessierung.

² Analog-Digital-Wandler an Bord des ERS.

Eine exakte Beschreibung zur Berechnung von kalibrierten σ^0 sind bei LAUR et al. (1998) zu finden.

Die radiometrische Stabilität¹ der SAR Instrumente von ERS-1 und ERS-2, die für die Kalibrierung der SAR-Produkte wichtig ist, wird für den ERS-1 mit 0,20 dB bzw. 0,26 dB für den ERS-2 angegeben. Ferner wird die radiometrische Genauigkeit, definiert als mittlere Abweichung zwischen aktueller und gemessener Rückstreuung, für beide Systeme auf 0,13 dB beziffert. Die Genauigkeit der Kalibrierkonstante wird mit $\pm 0,4$ dB angegeben (LAUR et al. 1998). Zusammenfassend können beide ERS SAR-Sensoren als sehr stabile und radiometrisch genaue Instrumente betrachtet werden (MEADOWS & LAUR 1998). Dennoch sei in diesem Zusammenhang auf die Inkonsistenzen bei der Prozessierung der SAR-Daten von unterschiedlichen Prozessierungs- und Archivierungszentren (PAF) mit unterschiedlicher Software hingewiesen, wodurch obige Genauigkeitsangaben zu relativieren sind.

2.6 Grundlagen der SAR-Interferometrie

Die komplexe Bildinformation von Radardaten (c), bestehend aus Real- (Re) und Imaginärteil (Im), kann leicht in zwei voneinander unabhängige Größen, die Amplitude und die Phase, zerlegt werden. Die Interferometrie stützt sich dabei auf die in den Radardaten enthaltene Phaseninformation. Signifikante Phasenmessungen sind möglich, da das Signal eines SAR-Systems als monochromatisch betrachtet werden kann². Die Phase (ψ) beinhaltet eine Information bezüglich der Entfernung zwischen Bodenelement und SAR-Antenne. Da sie auf Bruchteile einer Periode genau gemessen werden kann, ist sie sehr sensitiv bezüglich kleinster Entfernungsdifferenzen. So bewirkt beispielsweise eine Entfernungsänderung von nur 2,8 cm, dies entspricht der halben Wellenlänge des ERS-Radar, eine Phasenverschiebung von 360 Grad, während sich eine Veränderung der Bildenergie erst bei einer Verschiebung von einigen Metern bemerkbar macht.

Die Phase berechnet sich für jedes Pixel durch Winkelmessung des Zeigers c in der komplexen Ebene:

$$\Psi = \arctan \left[\frac{\text{Im}(c)}{\text{Re}(c)} \right] , \quad \text{Gl. 2-7}$$

c ist dabei das Gesamtergebnis des Rückstreuungsprozesses, der an einer Vielzahl von einzelnen Streuzentren einer Auflösungszelle stattfindet und als kohärente Addition der einzelnen komplexen Rückstreuerelemente modelliert werden kann (SCHWÄBISCH 1995). Da die Streuzentren innerhalb einer Auflösungszelle auf beliebige Positionen verteilt sein können, nimmt die daraus resultierende Phase des Gesamtsignals einen zufälligen Wert an. Im Gegensatz zur SAR-Amplitude, deren Erwartungswert proportional zum Rückstreuoeffizien-

¹ Die radiometrische Stabilität ist als Standardabweichung des Rückstreuquerschnittes definiert (MEADOWS & LAUR 1998).

² Das Verhältnis der Bandbreite in *Range* zur Trägerfrequenz beträgt für den ERS etwa $3,5 \cdot 10^{-3}$.

enten σ^0 ist (ULABY et al. 1982a), ist die Phase einer einzelnen SAR-Szene nicht signifikant mit den Rückstreuungseigenschaften der Objekte verknüpft. Erst wenn zwei SAR-Aufnahmen vom gleichen Gebiet vorliegen, die aus eng benachbarten Satellitenpositionen aufgenommen wurden, erschließt sich durch die Differenz zweier Phaseneinzelmessungen eines SAR SLC-Bildpaares die Phaseninformation einer sinnvollen Weiterverwertung. Unter gewissen Voraussetzungen besteht dann eine feste Phasenbeziehung zwischen beiden Signalen, die als Kohärenz bezeichnet wird.

2.6.1 Kohärenz

Identische Bedingungen bei der SAR-Aufnahme führen stets zum gleichen Ergebnis und somit zu einer vollständigen Kohärenz ($\gamma = 1$), da die SAR-Beobachtung ein deterministischer Prozeß ist. Unter realen Bedingungen treten jedoch Störprozesse auf, die die Kohärenz vermindern bzw. Dekorrelationseffekte hervorrufen (SCHWÄBISCH 1995):

- Spektrale Verschiebung durch unterschiedliche Beobachtungspositionen (Basislinien-Dekorrelationseffekt)
- Veränderungen der Rückstreuungseigenschaften der Objekte zwischen den Aufnahmen (Szenendekorrelation)
- Unterschiedliche atmosphärische Aufnahmebedingungen
- Fehler bei der Datenaufnahme, -prozessierung und -weiterverarbeitung
- Thermisches Systemrauschen

Ein Teil obiger Störeinflüsse ist technischer Art und betrifft z.B. die Signale zur Rauschleistung des SAR-Sensors oder die Länge der Basislinie zwischen den beiden Aufnahmestandorten. Zu große Basislinien führen zur Dekorrelation bedingt durch die unterschiedliche Blickrichtung der Sensoren während der beiden Aufnahmen. Im Fall des ERS SAR liegt die Grenze für die Länge der Basislinie, bei der eine interferometrische Verarbeitung gerade noch möglich ist, bei etwa 1000 m. Die Kenntnis des lokalen Einfallswinkels, welche ihrerseits ein DGM voraussetzt, ermöglicht jedoch eine Bereinigung des Basislinien-Dekorrelationseffektes (SEYNAT & HOBBS 1998).

Ein weiterer Teil betrifft den Kohärenzverlust durch zeitliche Dekorrelation wegen Veränderung der Rückstreuungselemente während des zwischen den beiden Aufnahmen liegenden Zeitintervalls. Solche Dekorrelationen werden verursacht durch Niederschläge, Frost- oder Tauzyklen sowie durch Veränderung der Oberflächen oder der Vegetationsschicht. Das betrifft jedoch nur die Zwei-Passagen-Interferometrie (im folgenden als *Repeat-Path-Interferometrie* bezeichnet)¹, bei der wie bei ERS-1/-2 die Aufnahme der beiden Bilder des interferometrischen Paares zeitversetzt erfolgt. Je länger der Zeitabstand, desto größer sind die Dekorrelationseffekte. Für Zeitabstände von einem bis zu drei Tagen lassen sich auch

¹ Entsprechend befinden sich bei der Ein-Passagen-Interferometrie beide simultane Antennen mit einer definierten Basislinie an einer Plattform (Flugzeug, Shuttle oder Satellit).

in Gebieten mit Vegetationsbewuchs noch gute Kohärenzwerte erzielen. Interferometrie mit längeren Zeitintervallen zwischen den Aufnahmepaaren kann nur in Gebieten eingesetzt werden, wo keine Störeinflüsse durch die Vegetation vorhanden sind.

Der Grad der Kohärenz γ bzw. Phasenstabilität zweier SLC-Bilder c_1 und c_2 ist durch den Absolutbetrag des aus den SAR-Daten bestimmten komplexen Korrelationskoeffizienten definiert als:

$$\gamma = \frac{E\{c_1 \cdot c_2^*\}}{\sqrt{E\{|c_1|^2\} \cdot E\{|c_2|^2\}}} \quad \text{Gl. 2-8}$$

$E\{\cdot\}$ bezeichnet dabei den Erwartungswert; c_2^* das konjugiert komplexe Bild (GEUDTNER 1995). Der absolute Betrag von γ kann Werte zwischen 0 (völlige Dekorrelation) und 1 (völlige Kohärenz) annehmen. Aus den Daten selbst kann die Gesamtkohärenz nur geschätzt werden. Als Schätzparameter eignet sich nach SCHWÄBISCH (1995) der komplexe Korrelationskoeffizient, der eine räumliche Mittelung durchführt.

2.6.2 Das interferometrische Signal

Das interferometrische Signal I (Interferogramm) ergibt sich aus der pixelweisen Multiplikation des komplexen Bildes c_1 mit dem konjugiert komplexen Bild c_2^* :

$$I := c_1 \cdot c_2^* \quad \text{Gl. 2-9}$$

Dabei ist die Phase von I , die interferometrische Phase Φ , von zentraler Bedeutung für die SAR-Interferometrie:

$$\Phi = \arctan \left[\frac{\text{Im}(c_1 \cdot c_2^*)}{\text{Re}(c_1 \cdot c_2^*)} \right] \quad \text{Gl. 2-10}$$

Wie die Phasenwerte der Einzelsignale $\Psi_{1,2}$ ist auch der Dynamikbereich der interferometrischen Phase auf Werte zwischen 0 und 2π beschränkt. Dadurch entstehenden hochgradige Mehrdeutigkeiten, die mit Hilfe geeigneter Algorithmen (*Phase Unwrapping*) bereinigt werden können.

2.6.3 Anwendungsfelder der SAR-Interferometrie

Die SAR-Interferometrie läßt sich für unterschiedliche Zielrichtungen einsetzen:

- Ihr wichtigstes Anwendungsgebiet ist die flächendeckende Gewinnung von Elevationsdaten. So können mit Hilfe der SAR-Interferometrie digitale Höhenmodelle auch für sehr strukturarme Geländeformen gewonnen werden, wenn andere Methoden der Fernerkundung wie z.B. Stereo-Photogrammetrie wegen fehlender Paßpunkte scheitern (SCHWÄBISCH 1995). Die topographischen Höheninformation, die durch Interferometrie gewonnen werden können, sind allerdings nicht ausreichend genau, um die Bewuchshöhen der landwirtschaftlichen Nutzflächen zu erfassen.

- Eine weitere Anwendung ist die differentielle SAR-Interferometrie. Sie bietet die Möglichkeit der Detektion und Vermessung kleinster dreidimensionaler Verschiebungen der Erdoberfläche, wie sie etwa im Zusammenhang mit Vulkanaktivitäten, Erdbeben oder Hangrutschungen auftreten. Kleinste Veränderungen der Topographie im cm-Bereich, die zwischen den beiden Aufnahmetermen eines interferometrischen Bildpaars auftreten, können wegen der hohen Sensitivität der Radarphase bezüglich Entfernungsänderungen ohne weiteres detektiert werden. Mit derselben Technik können auch Bewässerungsvorgänge an offenen Böden nachgewiesen werden, da unterschiedliches Eindringvermögen der Mikrowellen in Böden von unterschiedlichem Bodenfeuchtegehalt denselben Effekt hervorrufen kann wie eine lokale Verschiebung im cm-Bereich.

In vorliegender Arbeit wird die Kohärenz als zusätzliche, von der Intensität unabhängige Informationsebene in die multitemporale ERS SAR-Klassifizierung integriert.

Alle oben genannten Anwendungsgebiete setzen ein hohes Maß an Kohärenz bzw. an Phasenkorrelation zwischen den zwei Aufnahmen eines interferometrischen Bildpaares voraus. Die Kohärenz kann als ein Gradmesser für das Phasenrauschen der interferometrischen Bildprodukte und damit auch für das Rauschverhalten der daraus abzuleitenden Größen, z.B. der Höheninformation, verstanden werden.

Dekorrelation kann allerdings nicht nur als Störeinfluß aufgefaßt werden. Eine Kohärenzanalyse kann umgekehrt auch zur Beobachtung von Veränderungen auf der Erdoberfläche genutzt werden. Diese Veränderung der physikalischen Eigenschaften der beleuchteten Auflösungszelle, die sich bei der Interferometrie störend auswirkt, ist dann Gegenstand der Untersuchung bei der Kohärenzanalyse. Kleine Kohärenzwerte sind ein Indiz für Veränderungen, die zwischen den beiden SAR-Aufnahmen stattgefunden haben, sei es durch Vegetationswachstum, Bearbeitung von landwirtschaftlichen Nutzflächen oder durch meteorologische Einflüsse. Aus der Kohärenzanalyse ergeben sich demzufolge weitere Anwendungsfelder:

- Kohärenzbilder können deshalb z.B. bei der Landnutzungsklassifizierung als zusätzliche Information neben den Amplitudenbildern bei der multitemporalen Bildanalyse benutzt werden, wenn die Kohärenzwerte im wesentlichen durch das Vegetationswachstum oder die Bearbeitung von landwirtschaftlichen Nutzflächen bestimmt sind.
- Ein weiterer Aspekt stellt die Kohärenz im Zusammenhang mit der Pflanzenwuchshöhe dar. Da bei der *Repeat-Path*-Interferometrie mit kurzen Basislinienabständen Volumenstreuungseffekte der Vegetationsschicht eine der Hauptursachen für Dekorrelationen darstellen, können bei einer Zeitreihenbetrachtung Zusammenhänge zwischen der Pflanzenwuchshöhe und der Kohärenz erwartet werden (s. Kap. 10).

Im Kontext der beiden letztgenannten Anwendungsfelder ist auch die Bedeutung der interferometrischen Bilddatenauswertung für diese Arbeit zu sehen.

Die wichtigsten Schritte der interferometrischen Verarbeitungskette sind in Kapitel 4.7.2 skizziert.

3 Untersuchungsgebiet

3.1 Geographischer Überblick

Das Untersuchungsgebiet befindet sich zwischen München und dem Donautal. Mit einer Gesamtausdehnung von ca. 1500 km² umfaßt es Teile von drei Landschaftsräumen gemäß der Standortkundlichen Landschaftsgliederung von Bayern (WITTMANN 1983): Der südliche Teil des Untersuchungsgebietes zählt zur Nördlichen Münchener Schotterebene (im folgenden als NMS bezeichnet), an die westlich und östlich die Niedermoorgebiete bei Dachau und Erding sowie die Isarauen zwischen München und Freising (im folgenden als DEM bezeichnet) angrenzen. Der nördliche Teil des Untersuchungsgebietes ist dem Oberbayerischen Tertiärhügelland (im folgenden als THL bezeichnet) zuzuordnen.

Abb. 3-1 zeigt die Ausdehnung des Untersuchungsgebietes und seine Abdeckung mit ERS-Daten des Frames 2632.

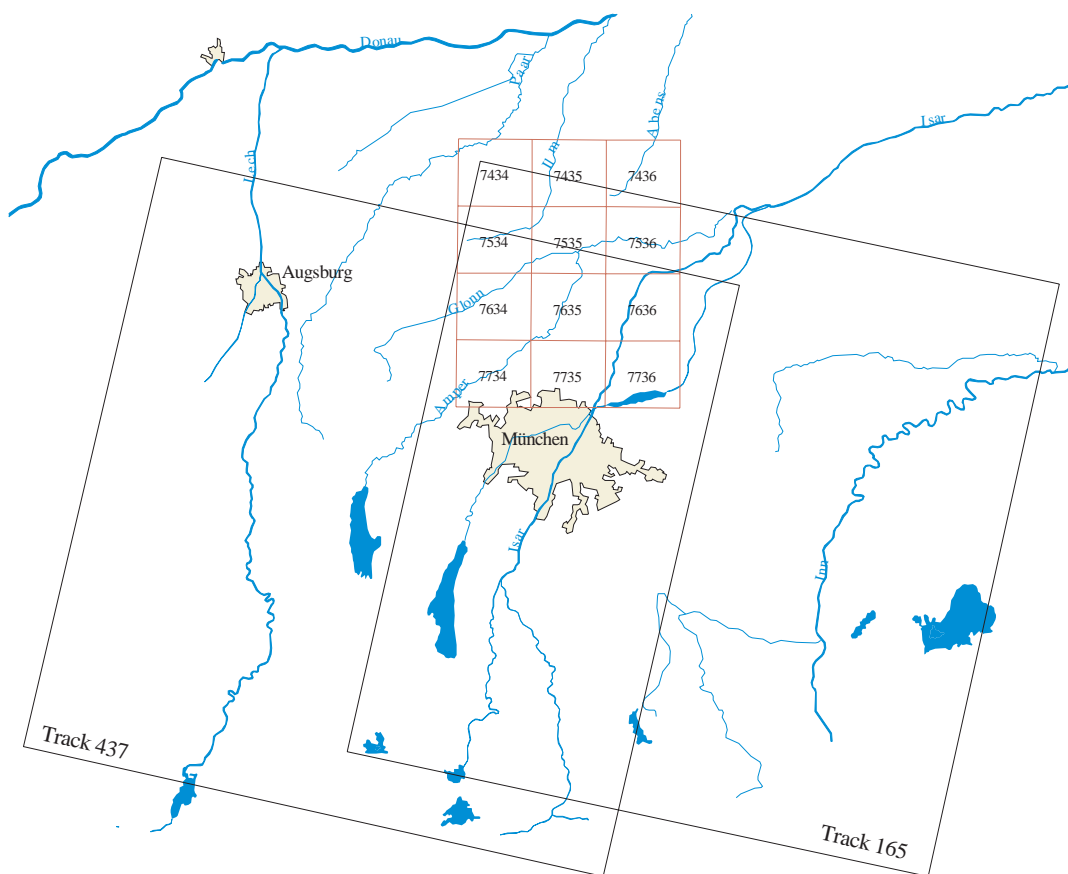


Abb. 3-1: Geographische Lage des Untersuchungsgebietes und seine Abdeckung mit ERS-Daten sowie TK25-Blattschnitten

Sieben von zehn jährlichen ERS-Aufnahmen sind dem Track 165 zuzuordnen. Drei zusätzliche ERS-Aufnahmen pro Jahr stammen vom benachbarten Track 437.

Der vom Untersuchungsgebiet eingenommene Bereich des Tertiärhügellandes wird von den Tälern der Flüsse Ilm und Paar, sowie der Amper und ihres Nebenflusses Glonn durchzogen, die nach Nordosten zur Donau bzw. nach Osten zur Isar entwässern. Die höchsten Erhebungen werden mit 545 m über NN im Westen bei Alberzell (TK 7534) und mit 522 m über NN nördlich von Schweitenkirchen (TK 7435) erreicht. Die geringsten Höhen mit 390 m über NN treten in der Paaraue bei Hohenwart auf. Amper und Isar verlassen das Untersuchungsgebiet bei 430 bzw. 443 m über NN.

3.2 Allgemeine Klimabetrachtung

Das Klima des betrachteten Gebietes kann nach der Klassifizierung von KÖPPEN & GEIGER (1961) als warmgemäßt und immerfeucht (Cfb) charakterisiert werden. Die mittlere Jahrestemperatur bewegt sich zwischen 7,4 °C in Freising und 7,9 °C in Oberschleißheim. Die tiefste mittlere monatliche Lufttemperatur wird im Januar mit -2 °C bis -3 °C erreicht. Im wärmsten Monat Juli bewegen sich die mittleren monatlichen Lufttemperaturen zwischen 17 °C bis 18 °C. Räumliche Verteilungsmuster der Temperatur sind im Untersuchungsgebiet nicht erkennbar.

Im Gegensatz dazu ergibt sich für die Niederschlagsverteilung ein durch die Orographie geprägtes Muster. Entsprechend des Geländeanstiegs zu den Alpen hin, nehmen die Niederschlagsmengen von Nord nach Süd stetig zu. Dieser überregionale Effekt überprägt auch das Untersuchungsgebiet, obwohl das nördlich gelegene Tertiärhügelland gegenüber der Münchener Schotterebene eine orographisch bedingte Stauwirkung ausübt. Eine Modifizierung der breitenkreisparallel verlaufenden Isohyeten wird durch die Flußtäler der Isar, Amper, Glonn und Ilm verursacht, die sich als relative Minimumgebiete ausweisen. Die mittleren Jahressummen des Niederschlags betragen zwischen 725 mm in Schrobenhausen, 790 mm in Erding, 800 mm in Dachau und 835 mm in Weihenstephan bei Freising. Die höchsten mittleren Monatssummen sind im Juli mit 112 bis 130 mm zu erwarten. In den trockenen Wintermonaten bewegen sich die mittleren Monatssummen zwischen 40 und 55 mm. Die Sommerniederschläge übersteigen damit die Winterniederschläge im Mittel um den Faktor 1,8 bis 1,9. Große lokale Variationen der Niederschlagsverteilung werden im Sommer durch häufig auftretende Gewitter- und Hagelschauer hervorgerufen, die durchschnittlich an 25 Tagen im Jahr zu beobachten sind.

Zu den weiteren klimatischen Charakteristika zählt eine regelmäßige Schneebedeckung im Mittel von 60 Tagen im Jahr. Ferner ist im Untersuchungsgebiet von einer mittleren jährlichen Verdunstungshöhe zwischen 500 und 550 mm auszugehen (HÄCKEL & WINKLER 1985). Die Hauptwindrichtung liegt im betrachteten Gebiet allgemein im Südwest- bis Nordwestsektor mit einem Maximum bei Südwest.

3.3 Pflanzenphänologie

Pflanzen reagieren in ihrer Entwicklung auf die Gesamtheit der Witterungseinflüsse. Basierend auf 60 Stationen des phänologischen Beobachtungsnetzes des DWD wurde ein phänologischer Kalender für die Region Isar-Inn-Schotterplatten entwickelt (Bayerischer Klimaforschungsverbund 1996), der für das Untersuchungsgebiet als repräsentativ betrachtet werden kann. Die Abgrenzung phänologischer Jahreszeiten erfolgte anhand typischer Zeigerpflanzen (Abb. 3-2).

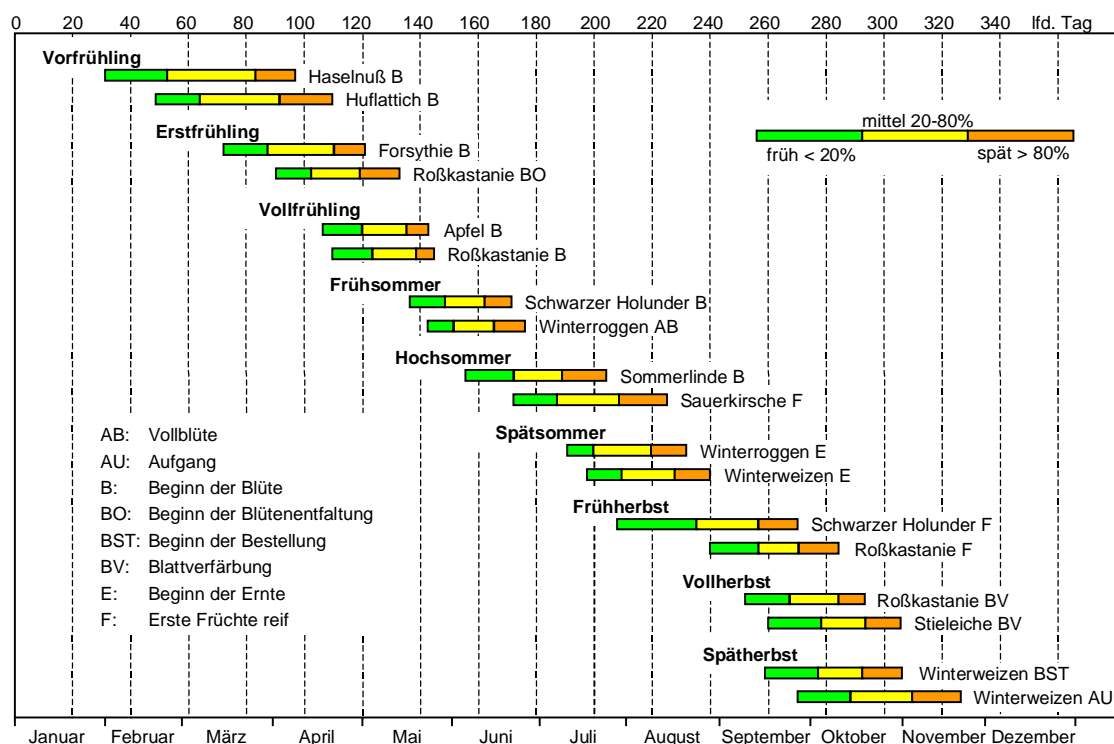


Abb. 3-2: Phänologischer Kalender für die Region Isar-Inn-Schotterplatten: Frühe, mittlere und späte Eintrittstermine der phänologischen Jahreszeiten (60 Stationen in der Höhenlage 310-670 m über NN; Zeitraum 1951-1990) (nach Bay. Klimaforschungsverbund 1996)

Nachfolgende Tabelle umfaßt klimatische Kenngrößen der oben genannten Landschaftsräume des Untersuchungsgebietes, die für die Vegetationsentwicklung relevant sind.

Tab. 3-1: Klimatische Kenngrößen der Landschaftsräume des Untersuchungsgebietes

Landschaftsraum	Niederschlag (mm/a)	Jahresmitteltemperatur (°C)	Trockenheitsindex*	Vegetationszeit (Tage)	Frostfreie Zeit (Tage)
NMS	800-1000	7-7,5	45-60	210-230	145-150
DEM	800-850	7-7,5	40-50	210-230	143-148
THL	750-800	7,5-8	35-50	210-230	147-154

*) nach DE MARTONNE (1935)

Da die Eintrittsdaten charakteristischer phänologischer Stadien (Phasen) wichtiger landwirtschaftlicher Kulturarten im weiteren Verlauf der Arbeit von großer Bedeutung sind, wurden zusätzliche Daten der mittleren Aussaat-, Auflauf-, Ährenschieben-, Blüte- und Erntetermine aus der Schlagkartei der Bayerischen Landesanstalt für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur (BayLBA) herangezogen (s. Kapitel 6.2.4). Der Raumbezug der Daten auf Gemeindegebiete ermöglicht darüber hinaus eine Untersuchung auf subregionale Unterschiede phänologischer Entwicklungen innerhalb des Untersuchungsgebietes.

3.4 Geologischer Überblick

Das Untersuchungsgebiet liegt im Bereich des süddeutschen Molassebeckens, eines Sedimenttroges, der im Tertiär als Vorlandbecken des Alpenorogens den Abtragungsschutt der Alpen aufnahm. Südlich der Linie Dachau-Freising ist das Untersuchungsgebiet größtenteils von Ablagerungen der quartären Vereisungen und deren Schmelzwässer verhüllt und bildet eine ausgedehnte Schotterebene. Nördlich dieser Linie streichen die Molassesedimente bis hin zur Donau in breiter Front im sogenannten Tertiärhügelland aus. Das Anstehende bilden hier die Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse, die eine Mächtigkeit von 150-250 m aufweist. Die Sedimentation erfolgte im Miozän, als der Sedimentationsraum nach Rückzug des Meeres sich zunehmend in ein festländisches Ablagerungsmilieu wandelte. Die Sedimentzusammensetzung besteht aus Kiesen, Sanden und linsenförmig eingeschalteten Lagen von Schluffen, Tonen und Mergeln. Durch eine ost-west-gerichtete Sedimentschüttung aus den östlichen Kalk- und Zentralalpen erfolgte gleichermaßen eine Korngrößensortierung mit zunehmender Entfernung vom Liefergebiet. Die Sedimentation erfolgte teilweise fluviatil (grobklastische Sedimente) und teilweise unter limnischen Stillwasserbedingungen (feinklastische Sedimente). Nach Ablagerung der oberen Süßwassermolasse kam es zu einer tektonischen Heraushebung des Gebietes, wobei sich durch die stärkere Hebung des südwestlichen Muldenschlusses das Gefälle in die heute vorherrschende West-Ost-Richtung umkehrte (SCHMIDT et al. 1992).

3.5 Geomorphologischer Überblick

Das flachwellige Tertiärhügelland im Norden des Untersuchungsgebietes wird durch ein engmaschiges, feinverzweigtes Talnetz in zahlreiche Hügelrücken und Hügel gegliedert, die sich durchschnittlich 30 bis 50 m über die Talsohlen erheben. Die Zertalung des Gebietes wurde insbesondere durch fluviatile Prozesse unter einem periglazialen Klimaregime gefördert, nachdem der ehemalige Sedimentationsraum der Oberen Süßwassermolasse tektonisch herausgehoben wurde. Periglazialen Ursprungs ist auch die für diesen Raum charakteristische, durch solifluidale Prozesse hervorgerufene Talasymmetrie mit steileren, bevorzugt nach Süden und Westen und flacheren, bevorzugt nach Osten und Norden exponierten Hängen (Abb. 3-3). In das Pleistozän fällt auch die teilweise Überdeckung der Molassesedimente mit äolischen Ablagerungen. Ein kleiner Bereich im Nordwesten des Untersuchungsgebietes ist durch Flugsandüberdeckungen geprägt (Sandlandschaft). Südöst-

lich dieser Zone schließt sich ein Bereich mit stärkerer Lößüberdeckung an (Lößlandschaft), dem im zentralen Hügelland eine Zone mit überwiegend entkalkten Lößlehmen folgt (Lößlehmlandschaft). Die räumliche Verteilung der äolischen Sedimente zeigt hierbei eine deutliche Abhängigkeit von der Entfernung zu den potentiellen Auswehungsgebieten der Münchener Schotterebene und zum Donau- bzw. Ampertal. Wie die nachfolgende Abbildung verdeutlicht, kam es in Abhängigkeit von der vorherrschenden Windrichtung um West und der fortschreitenden Talasymmetrie zu mächtigeren Lößüberdeckungen auf den sich verflachenden leeseitigen Hängen, während luvseitig der Abtrag gefördert wurde.

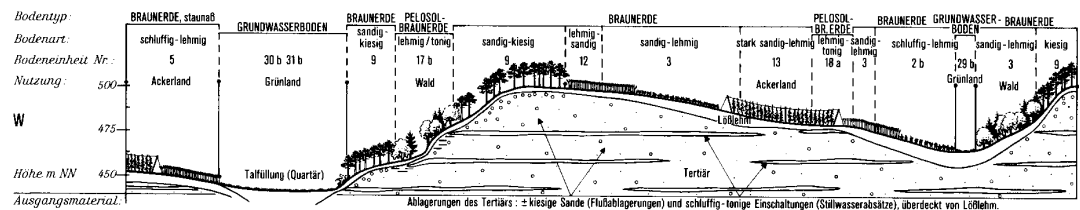


Abb. 3-3: Bodenkundlich-geologischer Schnitt durch die Lößlehmlandschaft bei Pfaffenhofen a.d. Ilm (TK25 Blatt 7435) (nach WITTMANN et al. 1981, S. 23)

Die NMS hingegen ist ein fast ebenes Gelände, das mit etwa 0,3% nach Norden hin einfällt. Sie unterteilt sich in mehrere Schotterstränge, die als trockene Halbinseln vom Dachauer und Erdinger Moos westlich bzw. östlich flankiert werden. Das pleistozän angelegte Isartal durchschneidet im Südosten des Untersuchungsgebietes die Schotterebene. Richtung Freising nähert sich ihr Niveau der Ebene an und bildet stellenweise mächtige Flußmergeldecken und Niederterrassen aus jüngeren Schottern.

3.6 Bodenlandschaften und Leitböden

Als Gliederungsmerkmal der Bodenlandschaften im Untersuchungsgebiet kann im Bereich des Tertiärhügellandes die Verbreitung des Löß bzw. Lößlehms herangezogen werden. Es sei jedoch bemerkt, daß sich die meisten Böden nicht unmittelbar aus dem Ausgangsgestein entwickelten, sondern aus Deckschichten, die durch pleistozäne pedogenetische Prozesse entstanden. Im Periglazialgebiet des Tertiärhügellandes waren dies in erster Linie solifluidale und kryoturbate Verlagerungsprozesse, denen frostmechanische Verwitterungsprozesse vorausgingen. Die räumlich-zeitliche Abfolge dieser Vorgänge führte zur Ausbildung einer typischen Deckschichtenfolge mit kleinräumigen Bodenartenwechsell. Die wichtigsten Bodenlandschaften sind nach FETZER et al. (1986) wie folgt gekennzeichnet:

Den Leitboden der Lößlandschaft südöstlich der Ilm und der Paar sowie beiderseits des Ampertales bildet die Parabraunerde aus Löß, die mit der erodierten Pararendzina als Erosionsform und dem lehmigen Kolluvium als Akkumulationsform vergesellschaftet ist.

Die Lößlehmlandschaft, die in Gebiete mit reinem Lößlehm und solche mit Ton- sowie Sandrücken unterteilt werden kann, umfaßt den Großteil des nördlichen Untersuchungsge-

bietes. Die Molassesedimente sind in diesen Bereichen bis zur Hälfte der Gesamtfläche mit Lößlehm und Lößlehmfließerden überdeckt. Die differenzierenden Leitböden bilden die Braunerde aus Lößlehm bzw. aus Lößfließerde. Erstere kommt bevorzugt in Unter- und Mittelhanglagen, letztere in Oberhanglagen und auf Höhenrücken vor. In Höhenlagen über 495 m über NN (z.B. südöstlich von Pfaffenhofen) bilden verbreitet feinklastische Sedimente das Ausgangsmaterial. Hier treten vermehrt mittelgründig tonreiche (Pelosol-) Braunerden auf. In den weniger stark von der Lößaufwehung erfaßten bzw. stärker der Erosion exponierten Bereichen stellen überwiegend Sande und Kiese das Ausgangssubstrat dar. Dieser, als Lößlehm-Sandrückenlandschaft bezeichnete Bereich, wird von lehmig-sandigen bis sandig-kiesigen Braunerden als differenzierende Leitböden repräsentiert.

In der löß- und lößlehmfreien Zone, im äußersten Nordwesten des Untersuchungsgebietes, kam es zur Ablagerung von geringmächtigen Flugsanddecken. Leitboden dieser Sandlandschaft ist die sandige Braunerde.

In den Talbereichen und Niederungen des nördlichen Untersuchungsgebietes bilden in Abhängigkeit des Grundwasserstandes und des breiten Korngrößenspektrums Gleye, Anmoorgleye und Niedermoore vorherrschende Bodeneinheiten. Im Auenbereich der Amper, die als allochthoner Fluß aus dem Alpenvorland kommt, bilden carbonatreiche Schotter das Ausgangsmaterial für die Entwicklung von Auenrendzinen und Auenrendzina-Gleyen.

Der südliche Bereich des Untersuchungsgebietes wird von Böden aus holozänen und jungpleistozänen Schottern dominiert. Differenzierender Leitboden auf grundwasserfernen Standorten ist hier die flachgründige Ackerrendzina. Aufgrund der geringen Solummächtigkeit dieses Bodens führte die landwirtschaftliche Nutzung zu Ap-AhCv-Cv-Profilen. Im grundwassernahen Übergangsbereich des Schotterkörpers zum Erdinger und Dachauer Moos bildete sich eine humusreichere Variante der Ackerrendzina und eine sehr humusreiche Pararendzina als nächste Abstufung in Richtung Moorböden.

Schließlich stellen die großen Niedermoore am Rande der Münchener Schotterebene eine eigene Bodenlandschaft dar. Ihre Entstehung ist auf Grundwasserströme zurückzuführen, die aus dem nach Norden ausdünnenden glazifluviatilen Schotterkörper flächig austreten.

3.7 Nutzung der Böden, Landschafts- bzw. Agrarstruktur

Nach Bodenausstattung, Relief und Klimaverhältnissen bestehen innerhalb des Untersuchungsgebietes große Unterschiede hinsichtlich der Nutzung der Böden, was sich auf die gesamte Landschaftsstruktur niederschlägt (Tab. 3-2).

Der überwiegende Teil des Untersuchungsgebietes besteht aus landwirtschaftlichen Nutzflächen mit einem hohen Ackeranteil. Im Bereich des sandigen Tertiärhügellandes (THL-S), das durch flachgründige Böden mit geringer Wasserspeicherleistung geprägt ist, beträgt der Waldanteil über 30%. Waldflächen im Bereich der Lößlandschaft des Tertiärhügellandes (THL-L) befinden sich hauptsächlich an den steileren Flanken der asymmetrischen Täler (Abb. 3-3).

Tab. 3-2: Landwirtschaftliche Anbauverhältnisse im Untersuchungsgebiet (nach Bodennutzungserhebungen des Bay. Landesamtes für Statistik und Datenverarbeitung, in FETZER et al. 1986)

Raum	Flächennutzung in Prozent				Anbauverhältnisse in Prozent der Ackerfläche									
	Gesamtfläche		LNF		GT	WW	ROG	GER	HA	HF	KA	ZR	SM	AF
	LNF	W	A	GL										
NMS	83,1		79,2	19,7	51,8	15,2	5,8	25,1	5,5	2,9	1,9	0,0	16,1	5,3
DEM	95,0		90,3	9,7	44,9	25,4	2,8	16,4	0,4	24,6	24,2	0,0	21,9	0,3
THL-S	62,3	34,4	67,1	21,0	60,2	14,5	6,2	29,4	8,5	16,9	12,5	1,9	14,9	3,9
THL-L	72,9	23,6	78,4	17,4	60,3	29,6	0,8	21,6	7,1	7,1	1,5	4,2	16,5	4,7
THL-LL	84,2		85,5	14,2	60,9	29,7	1,2	25,6	4,3	10,8	6,6	3,4	16,7	4,6

LNF: Landwirtschaftliche Nutzfläche; W: Wald; A: Acker; GL: Grünland; GT: Getreide; WW: Weizen; ROG: Roggen; GER: Winter- und Sommergerste; HA: Hafer; HF: Hackfrucht; KA: Kartoffel; ZR: Zuckerrübe; SM: Silomais; AF: Ackerfutter; THL-LL: Lößlehm-landschaft des Tertiärhügellandes

Der hohe Ackeranteil ist im wesentlichen auf die z.T. hochwertigen Böden und die gute Bearbeitbarkeit zurückzuführen. Grünland ist überwiegend auf stau- oder grundnassen Böden im Auenbereich zu finden und hat insgesamt einen Flächenanteil von weniger als 20%.

Der Anbau auf der Ackerfläche orientiert sich heute durch verbesserte Anbau- und Ernte-techniken immer weniger an einer standortgemäßen Fruchtartenauswahl, sondern vielmehr an betriebswirtschaftlichen Interessen. Auch die Einhaltung bestimmter Fruchtfolgesysteme ist durch die zunehmende markt- und verbraucherorientierte Fruchtartenauswahl nicht mehr gewährleistet. Daher können aus den Kenntnissen der natürlichen Standortbedingungen nur wenige Informationen abgeleitet werden, die als zusätzliche Entscheidungshilfe bei einer Fruchtartenklassifizierung mit Fernerkundungsdaten dienen könnten. Standortabhängige Häufigkeiten bestimmter Fruchtarten ergaben sich dennoch z.B. bei Weizen, der auf den zu trockenen Schotterriedeln der NMS unterrepräsentiert ist. Auf den gut gedränten, grundwasserfernen Schotterböden wird der Getreideanbau von Sommergerste dominiert. Auch Roggen wird überdurchschnittlich viel angebaut, obwohl sein Anteil an der Ackerfläche mit weniger als 5% gering ist. Günstige Kartoffelstandorte befinden sich auf den gut durchlüfteten, lockeren Böden der angrenzenden Niedermoorgebiete (Lagerungsdichten $< 1 \text{ g/cm}^3$), wo der Anteil des Kartoffelanbaus an der Ackerfläche über 20% betragen kann. Aber auch die Sandlandschaft im Nordwesten des Untersuchungsgebietes bietet gute Standortbedingungen für den Kartoffelanbau. Ein weiterer beträchtlicher Anteil der Ackerfläche wird von Silo- und Körnermais eingenommen, der keine speziellen Ansprüche an den Boden stellt und somit relativ gleichverteilt im gesamten Untersuchungsgebiet zu finden ist.

Eine Sonderstellung nimmt der Hopfenanbau im Untersuchungsgebiet ein, der in der Hallertau im Nordosten des Untersuchungsgebietes ideale Standortbedingungen vorfindet (hohe Niederschläge im April und Mai, viel Sonnenschein). Als Tiefwurzler bevorzugt Hopfen tiefgründige Böden (bis 2 m durchwurzelbarer Bodenraum), geringe bis mittlere Lagerungsdichten und einen ausgeglichenen Wasserhaushalt ohne Staunässe. Die höchsten Erträge (19-20 dt/ha) werden auf den lehmig-sandigen Braunerden sowie auf Kolluvien erzielt (WITTMANN et al. 1981).

4 Bildverarbeitung von ERS SAR-Daten

4.1 Datengrundlage

Für den Untersuchungszeitraum 1996-98 standen insgesamt 31 ERS SAR-Szenen als *Single Look Complex* (SLC) Daten zur Verfügung, die von der ESA im SAR-CEOS-Format herausgegeben wurden (Tab. 4-1):

Tab. 4-1: ERS-1/-2 SAR-Daten der Untersuchungsjahre 1996-1998 (in lfd. Kalendertagen)

Tag im Monat	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	
1.	60	91	121	152	182	213	244	274	305	
2.	61	92	122	153	183	214	245	275	306	
3.	62	93	123	154	184	215	246	276	307	
4.	63	94	124	155	185	216	247	277	308	
5.	64	95	125	156	186	217	248	278	309	
6.	65	96	126	157	187	218	249	279	310	
7.	66	97	127	158	188	219	250	280	311	
8.	67	98	128	159	189	220	251	281	312	
9.	68	99	129	160	190	221	252	282	313	
10.	69	100	130	161	191	222	253	283	314	
11.	70	101	131	162	192	223	254	284	315	
12.	71	102	132	163	193	224	255	285	316	
13.	72	103	133	164	194	225	256	286	317	
14.	73	104	134	165	195	226	257	287	318	
15.	74	105	135	166	196	227	258	288	319	
16.	75	106	136	167	197	228	259	289	320	
17.	76	107	137	168	198	229	260	290	321	
18.	77	108	138	169	199	230	261	291	322	
19.	78	109	139	170	200	231	262	292	323	
20.	79	110	140	171	201	232	263	293	324	
21.	80	111	141	172	202	233	264	294	325	
22.	81	112	142	173	203	234	265	295	326	
23.	82	113	143	174	204	235	266	296	327	
24.	83	114	144	175	205	236	267	297	328	
25.	84	115	145	176	206	237	268	298	329	
26.	85	116	146	177	207	238	269	299	330	
27.	86	117	147	178	208	239	270	300	331	
28.	87	118	148	179	209	240	271	301	332	Satelliten-
29.	88	119	149	180	210	241	272	302	333	daten
30.	89	120	150	181	211	242	273	303	334	ERS 1996
31.	90		151		212	243		304		ERS 1997
										ERS 1998

Im Gegensatz zu den bereits geocodierten GEC- bzw. GTC-Produkten des ERS bleiben bei den original 32-Bit SLC-Daten die Phasen- und Amplitudeninformationen bei der Verarbeitung unverändert. Dies ermöglicht interferometrische Anwendungen (Erstellung von Kohärenzkarten) und bringt weitere Vorteile mit sich, die in Kapitel 4-5 näher erläutert sind.

Die ERS-Szenen stellen eine Zeitreihe dar, die im allgemeinen durch eine 35-tägige Periodizität charakterisiert ist. Zusätzliche Bilder standen durch den gemeinsamen Betrieb (*Tandem-Modus*) von ERS-1 und ERS-2 bis zur Jahresmitte 1996 zur Verfügung, als ERS-1 und ERS-2 im eintägigen Abstand das gleiche Gebiet überflogen. Ferner wurden zur Verkürzung der Repetitionsrate auf 17 Tage während der Hauptvegetationszeit von Mai bis Juli 1997 und 1998 zusätzliche ERS-2 Szenen akquiriert, die von einem benachbarten Track mit ca. 50% Überlappungsbereich aufgenommen wurden. Eine ERS-2 Szene vom 04.06.1998 konnte aus unbekanntem Gründen nicht geliefert werden.

Die Prozessierung der ERS SAR-Daten wurde von unterschiedlichen Einrichtungen der ESA (PAF) unter Verwendung verschiedener Software vorgenommen, was Auswirkungen auf die Kalibrierung der Daten hat (ULABY 1998).

Sämtliche ERS-Szenen wurden im absteigenden Tages-Modus (*descending mode*) aufgenommen, bei dem die Flugrichtung des Sensors einer um etwa 10° nach Westen abweichenden Nord-Süd-Richtung entspricht.

Für die interferometrische Bearbeitung eigneten sich die Tandem-Aufnahmen von ERS-1 und ERS-2, die in einem zeitlichen Abstand von einem Tag erfolgten. Die ERS-1/-2 Tandem-Mission wurde im Juni 1996 von der ESA eingestellt. Daher standen insgesamt vier Aufnahmepaare zwischen März und Juni 1996 zur Verfügung¹. Auf das Aufnahmepaar vom 05.04./06.04.1996 mußte aufgrund von Kalibrierungsproblemen verzichtet werden.

4.2 Kalibrierung

Die Ermittlung des kalibrierten Radarrückstreuoeffizienten wurde gemäß LAUR et al. (1998) durchgeführt. Mit der Fassung *Issue 2, Rev. 5b* vom 07.09.1998 stand erstmals eine auf SLC-Produkte anwendbare explizite Kalibriervorschrift einschließlich der benötigten Kalibrierkonstanten zur Verfügung. Vor diesem Termin mußte auf die Werte einer älteren Kalibrieranweisung (ESA WPP-048) zurückgegriffen werden, die sich jedoch nur auf ERS-1 Aufnahmen vor dem 30.9.1993 bezog.

Weiterhin sind die in LAUR et al. (1998) aufgeführten Werte für den ERS-2 nur für Produkte des UK-PAF oder Termine nach dem 21.1.1997 anwendbar. Die Kalibrierung der ERS-2 Aufnahmen aus dem Jahr 1996 konnte daher nicht mit gesicherten Werten durchgeführt werden.

Eine weitere Ausnahme stellte die ERS-1-Szene vom 05.04.1996 dar, die als einzige unter Verwendung eines nominalen Replikapulses anstelle des sonst üblichen, aus den Rohdaten extrahierten Radarpulses prozessiert wurde. Bei der Kalibrierung mußte daher eine zusätzliche Korrektur vorgenommen werden (LAUR et al. 1998).

¹ Interferometrie mit ERS-Daten des 35-Tage-Zyklus zeichnen sich aufgrund der starken Veränderungen zwischen den Aufnahmetermeninen durch wesentlich geringere Kohärenz aus und konnten für die Untersuchungen nicht verwendet werden.

4.3 Koreferenzierung

Die Koreferenzierung von Aufnahmeserien ermöglicht die Verschneidung von Zeitreihen und stellt die Voraussetzung für weitere Bildverarbeitungsschritte und Analysen dar:

1. *Speckle*-Reduzierung durch Hauptkomponententransformation
2. *Speckle*-Reduzierung durch Mittelwertbildung (*image averaging*)
3. Erzeugung von Falschfarbendarstellungen dreier Termine (multitemporale SAR-Bilder)
4. Interferometrische Verarbeitung von SAR-Bildpaaren

Die Technik der Mittelwertbildung über Zeitreihen kann zur Reduzierung von *Speckle* angewandt werden, wobei diese, im Gegensatz zur *Multi-Look*-Technik, die räumliche Auflösung nicht verschlechtert (MEADOWS & LAUR 1998). Die Anwendung dieser Technik ist jedoch nur dann vorteilhaft, wenn die betrachteten Objekte zeitinvariant sind, was im vorliegenden Fall von landwirtschaftlichen Flächen nicht gegeben war. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit die Hauptkomponententransformation angewandt, auf die im nachfolgenden Teilkapitel näher eingegangen wird (s. Kap. 4.4).

Ausgehend von den Lageangaben, die bei SLC-Produkten bereits enthalten sind, lassen sich die Aufnahmen anhand kontrastreicher Referenzpunkte durch eine einfache Kreuzkorrelation koreferenzieren. Die dafür geeigneten Punkte müssen in ihrer geographischen Lage nicht bekannt sein. Ihre Bestimmung erfolgt für die zu betrachtende Region nur einmal. Soweit die von der ESA angegebenen Spezifikationen eingehalten werden, können alle zukünftigen Aufnahmen automatisch zueinander registriert werden. Die Güte der Koreferenzierung wird bei späteren Aufnahmen dadurch gesteigert werden, daß die Kreuzkorrelation auf dem überlagerten Mittelwert der bisherigen Aufnahmen durchgeführt wird. Damit können ohne weitere Maßnahmen Genauigkeiten erreicht werden, bei denen Aufnahme-paare der ERS-Tandem-Mission bei Betrachtung der Phasendifferenz deutliche Kohärenz zeigen. Dies deutet auf Bezugsgenauigkeiten hin, die unter der geometrischen Auflösung der einzelnen Aufnahmen liegen (mündl. Mitteil. GÜNZL 1999).

4.4 Bildverbesserung durch Hauptkomponententransformation

Ein häufig verwendetes Verfahren, das sich zur Verminderung des *Speckle*-Effektes bewährt hat, ist die Hauptkomponententransformation. Bei Zeitreihen von SAR-Bildern, die durch den *Speckle*-Effekt stark gestört sind, werden Kovarianzen zwischen einzelnen Aufnahmen zur Trennung des Nutzsignals von den Störeinflüssen verwendet. Durch die Hauptkomponententransformation werden die einzelnen multitemporalen (oder multifrequenzen) Radardaten in Komponenten zerlegt, die mit verschiedenen Faktoren, die das Radarrückstreusignal beeinflussen, korrespondieren. Betrachtet man die erste Hauptkomponente einer SAR-Zeitreihe, so werden überwiegend zeitinvariante Objekte wie Siedlungen, Wälder und der Reliefeinfluß erkennbar. Nach Abzug dieser dominanten Einflüsse werden mit der zweiten Hauptkomponente die verbleibenden, davon unabhängigen Gemeinsam-

keiten zwischen den Aufnahmen bestimmt. Dieser Vorgang kann solange wiederholt werden, bis genau so viele Hauptkomponenten bestimmt sind wie zuvor einzelne Aufnahmen vorlagen. Stark vereinfacht kann man die Hauptkomponenten als eine Aufspaltung verschiedener Einflüsse geordnet nach ihrer Dominanz betrachten. Ein Einfluß ist dann dominant, wenn er an möglichst vielen Stellen in gleicher Weise auftritt. Da sich Störungen wie Rauschen oder *Speckle* an unterschiedlichen Stellen im allgemeinen unterschiedlich auswirken, sind sie in diesem Sinn nicht dominant. Sie finden sich daher hauptsächlich in den letzten Hauptkomponenten wieder.

Durch die Hauptkomponententransformation läßt sich die Erkennbarkeit landwirtschaftlich genutzter Flächen über die Zeitreihen deutlich verbessern. So können anhand von Falschfarbendarstellungen der ersten drei Hauptkomponenten von SAR-Zeitreihen sehr kontrastreiche Bilder erzeugt werden, die die Geometrie der einzelnen Schläge deutlich erkennbar machen (s. Abb. 4-1). Damit ergibt sich die Möglichkeit, Schlaggrenzen aus dem GIS-System visuell zu kontrollieren, ohne auf wetterabhängige Satellitenbilder optischer Sensoren angewiesen zu sein.

4.5 Geocodierung

Die Aufnahmedaten des ERS-Sensors werden, wie auch die Daten anderer Fernerkundungssensoren, bedingt durch die spezielle Geometrie des Aufnahmesystems, in ganz spezifischen systemeigenen Koordinaten abgelegt. Im Fall des SAR liegen die Aufnahmen in einem Gitter vor, dessen Zeilen die Distanz des Sensors vom abgebildeten Objekt und dessen Spalten die Bewegung der Trägerplattform im Zeitverlauf repräsentieren. Dieses Gitter wird im folgenden als SAR-Gitter bezeichnet. Um eine geographische Zuordnung der ERS-Radardaten oder eine Überlagerung der Daten mit GIS- und Ground Truth-Daten im Vektorformat vornehmen zu können, bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

1. Die Rasterdaten des ERS werden aus ihren systemeigenen Koordinaten in ein geographisches Koordinatensystem überführt.
2. Die geographischen Bezugsdaten werden in das Koordinatensystem des ERS-Aufnahmesystems transformiert.

In beiden Fällen erfolgt die Bildtransformation unter Verwendung eines digitalen Geländemodells, da so die Simulation der Aufnahmegeometrie des Sensors besonders präzise vorgenommen und somit die Geocodierung auch in steilen Hanglagen präzise durchgeführt werden kann.

Das weitverbreitete Verfahren, die Bildinformation aus dem aufnahmebedingten Gitter in ein Kartengitter zu transformieren, setzt im allgemeinen ein Resampling und damit die Interpolation zwischen den Grauwerten des Eingabebildes voraus, was zu einer Verfälschung der Bildinformation führt (ATKINSON 1985). Diese Interpolation ist immer dann nötig, wenn die Punkte des Kartengitters nicht eindeutig den Punkten des aufnahmebedingten Gitters zuzuordnen sind. Da kein in der Fernerkundung üblicher Sensor genau in der Geo-

metrie eines Kartengitters arbeitet, liegt dieser Fall praktisch immer vor. Vermeidet man die Interpolation durch die Zuordnung jedes Kartengitterpunktes zu seinem nächsten Nachbar im SAR-Gitter, so werden im allgemeinen einzelne Gitterpunkte der ursprünglichen Aufnahme nicht oder mehrfach berücksichtigt.

Um derartige Verfälschungen der Bildinformation auszuschließen, wird für die Verschneidung der SAR-Bilder mit den GIS-Daten der umgekehrte Weg gewählt. Die vektorieell vorliegenden GIS-Schlaggrenzen werden in die SAR-Geometrie der einzelnen Aufnahmen transformiert. Durch die Zuordnung von Pixeln zu einzelnen Polygonen (landwirtschaftliche Schläge) können somit bildstatistische Flächenmerkmale extrahiert werden, welche analog zu den GIS- und Ground Truth-Daten in relationalen Tabellen abgelegt werden. Die Vorteile dieser Vorgehensweise können wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Der sehr speicher- und rechenintensive Schritt der Übertragung einzelner Pixel in das Kartengitter entfällt. Die SAR-Bilder müssen nicht in einer zweiten geocodierten Fassung gespeichert werden. Die Koordinatentransformation muß nur für die vergleichsweise wenigen Stützpunkte der GIS-Polygone durchgeführt werden.
2. Die originale Statistik der SLC-Daten bleibt erhalten. Die unverfälschten Bildpunkte können unmittelbar den zu untersuchenden Schlägen zugeordnet werden. Dies ermöglicht eine völlig neue Herangehensweise an die Auswertung der Radardaten, die sich hauptsächlich auf die statistische Auswertung der schlagbezogenen Bildmerkmale konzentriert.
3. Zum Archiv der Originalaufnahmen wird lediglich noch die Parametrisierung der Georeferenz gespeichert. Da keine Zwischenprodukte benötigt werden, kann sehr flexibel auf Änderungen reagiert werden (z.B. Änderungen bei der Kalibrierung).
4. Die original 32-Bit SLC-Daten ermöglichen zusätzlich eine interferometrische Auswertung.

Für die Umrechnung der Vektordaten aus einem Kartennetz in die Pixelkoordinaten der konkret vorliegenden Aufnahme sind nach GÜNZL (mündl. Mitteil. 1999) folgende Zwischenschritte nötig:

1. *Transverse Mercator*-Koordinaten im Gauß-Krüger-System (Rechtswert, Hochwert, Höhe über NN).
2. Elliptische Polarkoordinaten, bezogen auf das Ellipsoid nach Bessel (Längengrad, Breitengrad, Höhe über NN).
3. Höhe, bezogen auf das Ellipsoid (Längengrad, Breitengrad, Höhe über Ellipsoid).
4. Kartesische Koordinaten, bezogen auf das geodätische Datum *Potsdam*.
5. Kartesische Koordinaten, bezogen auf das Datum von WGS84 (KUMAR 1988).
6. Nächstgelegene Bahnposition des Satelliten und dessen Distanz (realer *Range* und Azimut).
7. Pixelkoordinaten im aufgenommenen Bilddatengitter (Zeilen- und Spaltenposition).

Der Übergang von Punkt 1 zu Punkt 2 beinhaltet ein elliptisches Bogenmaß, das nicht geschlossen darstellbar ist. In der Literatur wird üblicherweise auf eine Näherung verwiesen, deren Fehler deutlich unter der geometrischen Auflösung der ERS-Satelliten liegt. Bei iterativen Verfahren, die diese Umrechnung enthalten, ist der auftretende Fehler jedoch für das Konvergenzverhalten von Bedeutung. Die weiteren Umrechnungen besitzen exakte geschlossene Formen. Der Schritt von Punkt 2 zu Punkt 3 erfordert die Kenntnis der lokalen Undulation, die für das Untersuchungsgebiet als Konstante mit -40 m angenommen wurde.

Die Ergebnisse der Umrechnung von vektoriellen GIS-Daten in die *Slant Range* Geometrie der SAR-Daten wurde durch Überlagerung beider Datensätze visuell überprüft. Zur besseren Erkennbarkeit der Bildstrukturen wurde hierzu auf die Falschfarbendarstellung der drei ersten Hauptkomponenten zurückgegriffen. Dabei ergaben sich präzise Übereinstimmungen zwischen den GIS-Polygonen und den Schlagstrukturen im Bilddatensatz (Abb. 4-1).

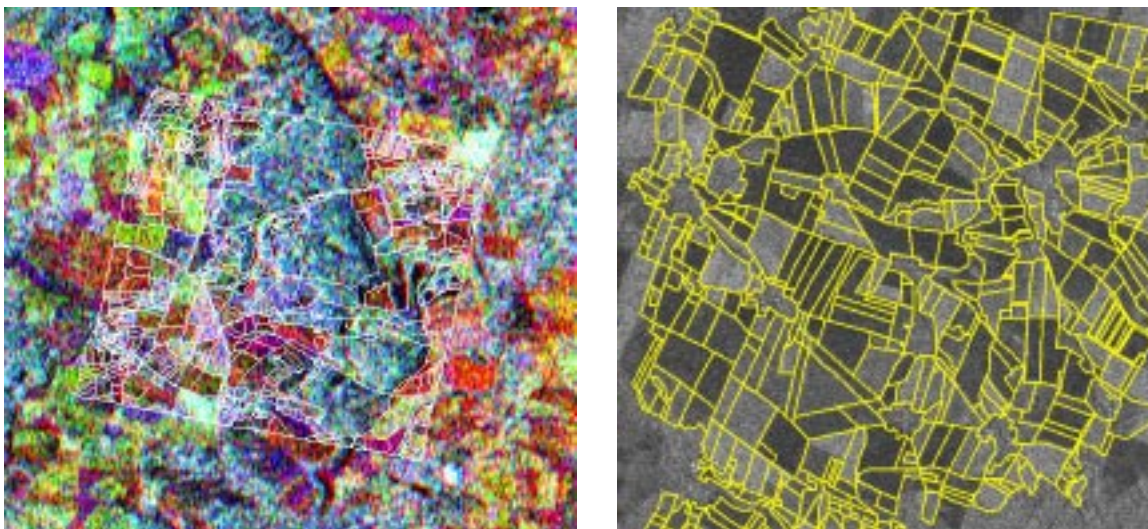


Abb. 4-1: Falschfarbendarstellung dreier Hauptkomponenten einer ERS SAR-Zeitreihe (links). Einzelnes ERS SAR-Bild überlagert von GIS-Polygonen der Flurkarte 1 : 5000, Blatt NO 14-2 (rechts)

Als limitierender Faktor für die Genauigkeit der Umrechnung stellte sich die Qualität des verwendeten digitalen Geländemodells heraus. Höhenfehler im DGM wirken sich bei schrägerichteten SAR-Systemen auf die Laufzeiten des Signals aus. Positive Höhenfehler (ein Punkt im DGM ist höher als in Wirklichkeit) führen daher zu Verkürzungen der Signallaufzeit und somit zu einem *Layover* (Umklappung). Die durch einen Höhenfehler e bedingte Differenz in *Slant Range* ΔSR kann näherungsweise mit $\Delta SR \approx e \cos \theta$ bestimmt werden. In *Ground Range* GR (Horizontalfentfernung) ergibt sich demnach der Lageversatz aus $\Delta GR \approx e \cot \theta$. Geht man von einem mittleren Höhenfehler im DGM von ca. 5 m aus, so beträgt ΔGR bei einem mittleren *Local Incidence Angle* von 24° etwa 11 m. Der Lageversatz nimmt mit abnehmender *Range*-Distanz bzw. kleinem Einfallswinkeln zu.

Auf die Umrechnung von SAR-Bildkoordinaten in geographische Koordinaten, die nicht in dieser direkten Form möglich ist, soll nicht näher eingegangen werden. Grundlegende Ab-

handlungen zur Geocodierung finden sich u.a. bei SCHREIER (1993) und ELACHI (1988). Verfahrensübergreifende Voraussetzungen für eine paßgenaue Geocodierung der Rasterdaten sind:

- Ein genaues und hochaufgelöstes Geländemodell aus dem zu betrachtenden Gebiet (Flächenauflösung möglichst < 50 m, Höhengauflösung nicht schlechter als 5 m)¹.
- Mindestens ein exakt bestimmter Paßpunkt.
- Fehlerfreie Orbitdaten (bei fehlerhaften Orbitdaten 2 Paßpunkte).

Zur Geocodierung der Daten wird bei der Entwicklung der Geocodierprogramme die Aufnahmegeometrie des ERS-Sensors in Relation zur Oberflächengeometrie des aufgenommenen Geländes simuliert. Das Grundprinzip der Geocodierung innerhalb einer Bildzeile einer ERS-Szene, das allen Programmen zugrunde liegt, ist in Abb. 4-2 vereinfacht dargestellt.

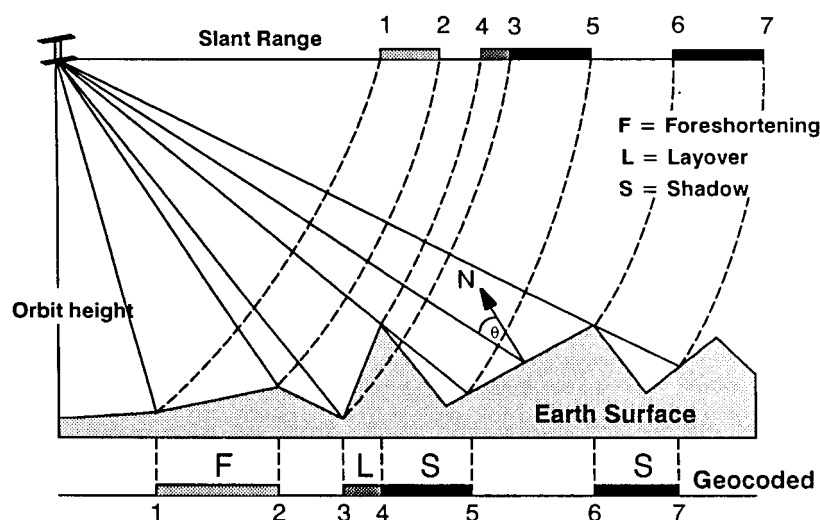


Abb. 4-2: Prinzip der Geocodierung einer Bildzeile (nach SCHREIER 1993; S. 117)

Durch die schräge Blickrichtung des Sensors senkrecht zur Flugbahn treten die dargestellten Effekte wie z.B. *Foreshortening* und *Shadowing* (ähnlich wie bei Schrägaufnahmen optischer Sensoren) sowie *Layover* (typisch für Radarsensoren) auf, die bei der Geocodierung nur im Rahmen der vorhandenen Bildpunkte der aufgenommenen Szenen korrigiert werden können. Für die fehlenden Bildpunkte zur Darstellung in den geocodierten Szenen wird das im Radarbild an dieser Stelle tatsächlich dargestellte Pixel nach dem *Nearest-Neighbor*-Prinzip eingesetzt.

Festzuhalten bleibt, daß die Umrechnung von Koordinaten des Kartengitters in Positionen innerhalb der Aufnahme und zurück als eindeutig betrachtet werden kann. Insgesamt ist

¹ Das verwendete DGM vom BayLVA hatte eine Rasterauflösung von 50 m und einen mittleren Höhenfehler von etwa 3 m.

der Rechenaufwand für die Transformation vektorieller GIS-Daten in die SAR-Geometrie geringer als die Geocodierung der Bilddaten (Transformation vom SAR-Gitter in geographische Koordinaten).

4.6 Korrektur reliefbedingter Radiometrieverzerrungen

Ein grundlegendes Problem bei der Auswertung von Radardaten ist die Abhängigkeit der Rückstreuintensitäten von der lokalen Geländeneigung. So führen unterschiedliche Geländeneigung in Bezug auf die Blickrichtung des SAR-Sensors unter sonst gleichen Bedingungen zu veränderten Rückstreuwerten (BÄHR & VÖGTLE 1998).

Theoretisch kann dieser Topographie-Effekt im Vorfeld der Bilddatenanalysen und der Klassifizierung anhand des berechneten lokalen Einfallswinkels korrigiert werden. Wenn eine entsprechende Flächennutzungskartierung vorliegt, sollte die Bildkorrektur entsprechend der Oberflächenbedeckung klassenspezifisch erfolgen.

Unter praktischen Gesichtspunkten und der gegebenen Situation wird aus folgenden Gründen auf eine generelle radiometrische Korrektur der Bilddaten verzichtet:

1. Das Rückstreusignal von natürlichen Oberflächen ist eine äußerst komplexe Größe, die sich aus einer Überlagerung vieler Streumechanismen zusammensetzt, so daß es auch bei Kenntnis der Bodenbedeckungsklasse schwierig ist, den Einfluß des Reliefs zu isolieren. Bei der Vielzahl der Einflußfaktoren (Bodenfeuchte, Bodenrauhigkeit, Reihenrichtung, Bodenart, etc.), können gleiche Bedingungen der Bodenbedeckung, die für die Bestimmung des Korrekturterms nötig wären, nur selten angenommen werden.
2. Durch die kleinräumige Parzellenstruktur und einer Pixelauflösung des ERS von ca. 25 x 25 m ergeben sich viele Pixel im Übergangsbereich verschiedener Bodenbedeckungsklassen, deren radiometrische Korrektur äußerst problematisch ist.
3. Die Korrektur des Reliefeinflusses setzt ein hochgenaues DGM voraus, um korrekte lokale Einfallswinkel berechnen zu können. Das gegebene DGM erfüllt diese Voraussetzung weder durch seine geometrische Auflösung, noch durch seine Höhengenaugkeit.
4. Eine radiometrische Korrektur ist nur für den Bereich des Tertiärhügellandes relevant. Ca. 60% des Untersuchungsgebietes (NMS, DEM und Amperau) sind Fastebenen mit mittleren Hangneigungen von $< 1^\circ$. Steilere Hangneigungen ($> 10^\circ$) im Bereich des Tertiärhügellandes werden fast ausschließlich als Wald oder Grünland genutzt.
5. Regressionsanalysen zwischen den Rückstreuwerten und dem lokalen Einfallswinkel ergaben, daß unter vegetationsbedeckten Bedingungen das rückgestreute Signal nahezu unabhängig vom Einfallswinkel ist (s. Kap. 9.3.7). Nur unter vegetationsfreien Bedingungen ergaben sich schwache Zusammenhänge zwischen der Rückstreuung und dem Reliefparameter ($0,11 < r^2 < 0,15$), wobei eine Zunahme der Signalintensität von ca. 0,2 dB pro Grad Hangneigung festgestellt werden konnte.

Aus diesen Gründen wird nur im Rahmen der Bodenfeuchtemodellierung für vegetationsfreie Oberflächen (s. Kap. 9.3.7) der Einfluß des Reliefs bzw. des lokalen Einfallswinkels berücksichtigt. Die winkelabhängige Korrektur erfolgt dabei anhand eines Cosinus-Modells in Anlehnung an CHAMPION (1996).

4.7 Interferometrische Verarbeitungskette

Die interferometrische Verarbeitungskette zur Erzeugung von Interferogrammen und Kohärenzkarten ist in Abb. 4-3 skizziert. Detailliertere Ausführungen hierzu finden sich u.a. bei SCHWÄBISCH (1995) und GEUDTNER (1995). Die in Abb. 4-3 grau hinterlegten Boxen deuten die Weiterverarbeitungsschritte zur Erzeugung eines DGMs an, was jedoch nicht Gegenstand der Auswertung dieser Arbeit ist.

Die interferometrische Verarbeitung wurde im Rahmen von EMAP am Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS) durchgeführt (SCHMIDT et al. 1998; KÜHBAUCH et al. 1999).

4.7.1 Koregistrierung

Um einen möglichst hohen Kohärenzgrad der Datensätze zu gewährleisten, müssen die SAR-Szenen durch Koregistrierungsverfahren geometrisch gut aufeinander angepaßt werden. Die Anpassung der beiden Szenen erfolgt in zwei Schritten. Durch Grobanpassung der beiden Intensitätsbilder, die mit Hilfe einer Kreuzkorrelation im Ortsraum durchgeführt wird, wird eine Genauigkeit von etwa einem Pixel erreicht. Die sich anschließende Feinanpassung erfolgt anhand der Phaseninformation der Komplexdaten. Die Berechnung des Feinoffset wird an mehreren, gleichmäßig über das Bild verteilten Musterchips berechnet. Nach bilinearer Interpolation läßt sich eine Anpassungsgenauigkeit von etwa 1/10 Auflösungszellen in Azimut und *Range* erreichen. Die hohen Genauigkeitsanforderungen an den Koregistrierungsprozeß leiten sich unmittelbar aus dem Phasenfehler ab, wobei geometrische Mißregistrierung zu Phasenvarianzen führt (GEUDTNER 1995). Bei einem Signal-Rausch-Verhältnis von 20 dB und einer 0,1 pixelgenauen Koregistrierung beträgt die Phasenvarianz etwa 30° (JUST & BAMLER 1994). Die Genauigkeit der Szenenanpassung bestimmt die Qualität des Interferogramms. Die Qualität der Anpassung ist direkt am Rauschanteil des Phasendifferenzbildes zu erkennen. Bereiche mit unterschiedlich stark verrauschten *Fringes* (siehe Kapitel 4.7.2) sind sowohl im Interferogramm als auch im relativen Interferogramm erkennbar. Dieses unterschiedliche Rauschverhalten wird durch die Berechnung der Kohärenz quantitativ erfaßt.

4.7.2 Interferogrammgenerierung

Nach der geometrischen Anpassung wird durch die pixelweise Multiplikation der koregierten Einzelbilder ein Phasendifferenzbild, das Interferogramm erzeugt¹. Die in diesem Bild als Interferenzmuster erscheinenden Streifen gleicher Phase (*Fringes*), stellen jeweils den gesamten Wertebereich der Phase dar (Abb. 4-4b). Die Anzahl der *Fringes* im Phasendifferenzbild wird durch die Orbitgeometrie bestimmt. Je größer die Basislinie, desto dichter gepackt sind die *Fringes*. Dieser systematische, durch die Orbitgeometrie bestimmte, Phasenanteil ist theoretisch aus den Orbitdaten bestimmbar.

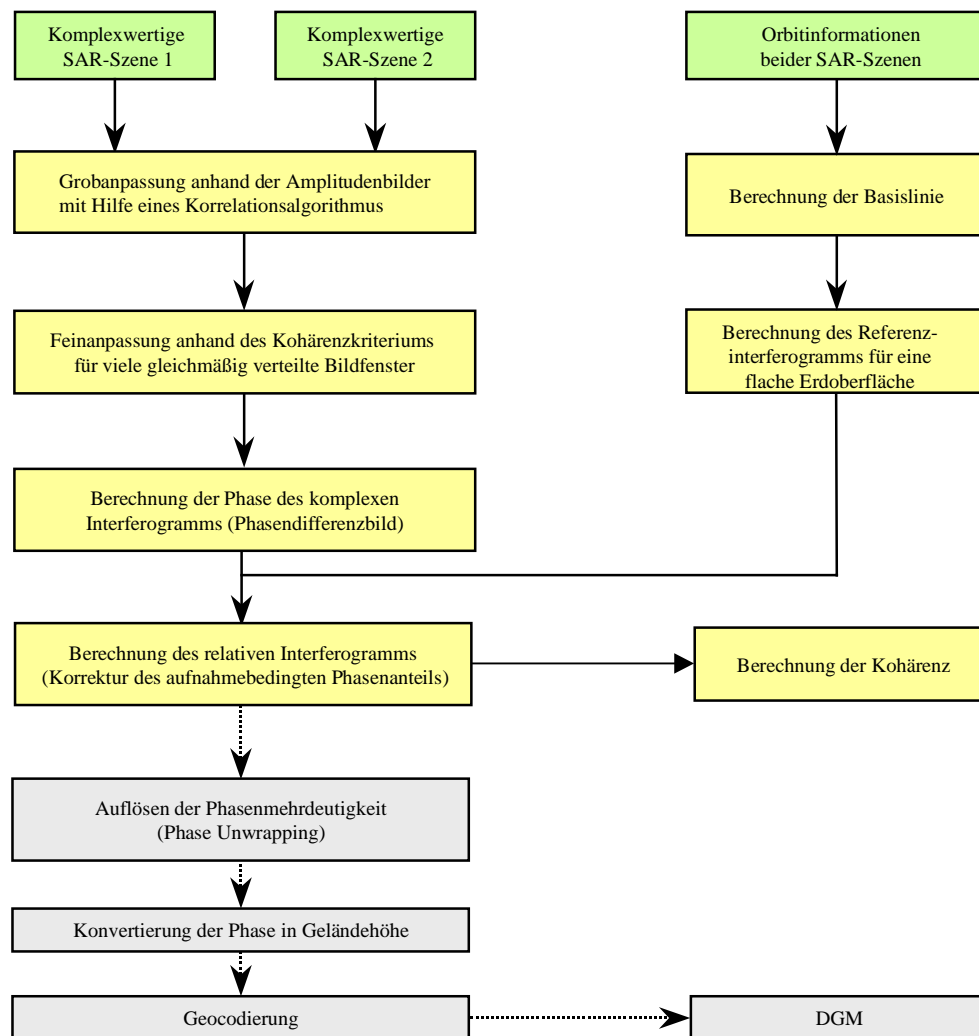
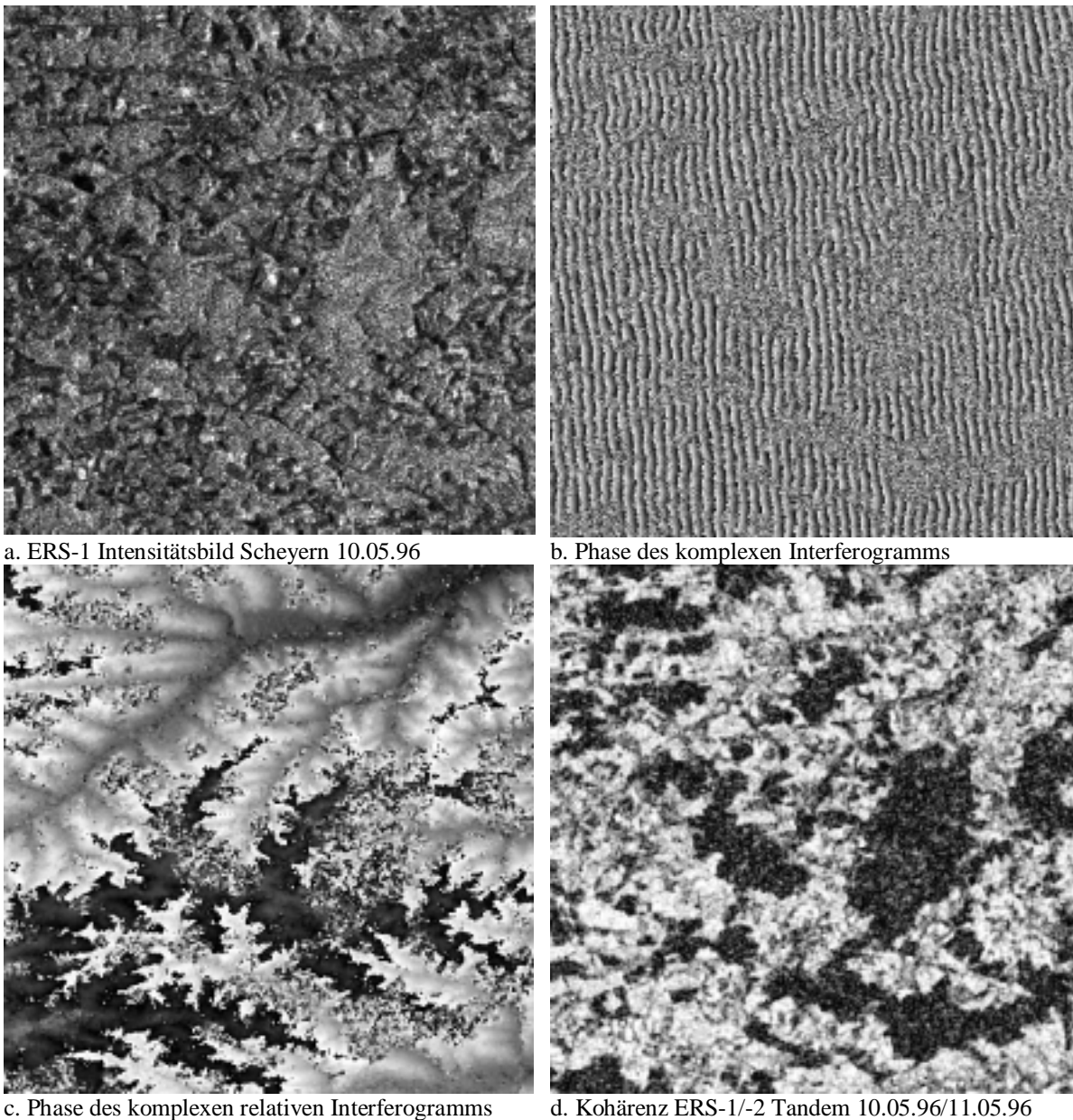


Abb. 4-3: Interferometrische Verarbeitungsschritte von ERS SAR SLC-Daten

Einzelne Ergebnisse der Verarbeitungskette sind am Beispiel eines ca. 5 x 5 km großen Bildausschnittes bei Scheyern in Abb. 4-4 dargestellt:

¹ Da die Interferogrammerzeugung durch Multiplikation der Daten im Ortsraum erfolgt, entspricht die einer Faltung der beiden Spektren im Frequenzraum.



a. ERS-1 Intensitätsbild Scheyern 10.05.96

b. Phase des komplexen Interferogramms

c. Phase des komplexen relativen Interferogramms

d. Kohärenz ERS-1/-2 Tandem 10.05.96/11.05.96

Abb. 4-4: Interferometrische Verarbeitung der ERS-1/-2 Tandem Daten vom 10.05./11.05.96 am Beispiel eines ca. 5 x 5 km² großen Gebietsausschnittes bei Scheyern

4.7.3 Korrektur der aufnahmegeometriebedingten Phase

Der durch die Topographie induzierte Phasenanteil des Interferogramms resultiert aus der spezifischen Aufnahmegeometrie, die aufgrund des Schrägsichtverfahrens verschiedene Entfernungsdifferenzen für unterschiedliche Schrägentfernungen verursacht (SCHWÄBISCH 1995). Näherungsweise wird zwischen der Phase und der Schrägentfernung eine lineare Beziehung angenommen, die aufgrund der Erdkrümmung jedoch nicht erfüllt ist. Als Referenzebene wurde die Tangentialebene an das Ellipsoid im Szenenmittelpunkt definiert. Die Korrektur des Interferogramms bezüglich dieses systematischen Phasenanteils, der sich theoretisch bei ebenem Terrain unter der gegebenen Orbitgeometrie einstellt, führt zum so-

genannten relativen Interferogramm (Abb. 4-4c). Die dort noch vorhandenen *Fringes* sind direkt der topographischen Geländehöhe oder eventuell vorhandenen Oberflächenverwerfungen zuzuordnen.

Die Kohärenzwerte werden im letzten Schritt unmittelbar aus dem relativen Interferogramm abgeleitet (Abb. 4-4d) und ergeben sich aus den normierten Absolutwerten der komplexen Korrelationskoeffizienten (vgl. Gl. 3-8, Kap. 2.6.1). Das Kohärenzbild wird im Wertebereich zwischen 0 (keine Korrelation; dunkle Bildbereiche) und 1 (vollständige Kohärenz; helle Bildbereiche) als Grauwert codiert dargestellt. Gebiete mit niedriger Kohärenz repräsentieren vorrangig zeitlich instabile Bodenbedeckungsklassen wie Wald, dichte Vegetation verschiedener Höhen oder Wasser. Bereiche mit starkem Phasenrauschen sind schon im komplexen Interferogramm erkennbar und zeichnen sich durch verschwommene *Fringes* aus. Die großen zusammenhängenden dunklen Flächen im Kohärenzbild sind Waldgebiete. Man erkennt, daß sie sich im Kohärenzbild sehr viel besser als im Intensitätsbild (Abb. 4-4a) von den nicht bewaldeten Flächen unterscheiden. Hochgradig kohärente Areale werden hingegen durch zeitlich stabile Oberflächen beschrieben (vegetationsfreie Böden, Ödland, urbane Gebiete).

4.7.4 Beurteilung der interferometrisch verarbeiteten Tandem-Bildpaare

In Tab. 4-2 sind Angaben zum Orbit, der Basislinienabstände und der Kohärenzstatistik der verfügbaren ERS-1/-2 Tandem-Bildpaare zusammengefaßt:

Tab. 4-2: ERS-1/-2 Tandem-Bildpaare mit Basislinien und durchschnittlichen Kohärenzwerten

Orbit 1	Datum 1	Satellit 1	Orbit 2	Datum 2	Satellit 2	2π Höhe (m)	Basis (m)	Kohärenz (Mittel / Std.Abw.)
24201	01.03.96	ERS-1	4528	02.03.96	ERS-2	344,6	26,98	0,55 / 0,21
24702	05.04.96	ERS-1	5029	06.04.96	ERS-2	149,7	62,10	0,32 / 0,17
25203	10.05.96	ERS-1	5530	11.05.96	ERS-2	65,4	141,99	0,50 / 0,21
25704	14.06.96	ERS-1	6031	15.06.96	ERS-2	129,1	71,99	0,37 / 0,18

Wie aus Tab. 4-2 hervorgeht, beträgt die maximale Basislänge ca. 142 m. Dekorrelations-effekte wegen zu großer Basislinien können daher ausgeschlossen werden. Die Länge der Basislinie bestimmt die Empfindlichkeit bezüglich der Höheninformation. Die angegebenen 2π Höhen sind umgekehrt proportional zur Länge der Basislinie und beziehen sich direkt auf den Zusammenhang zwischen der relativen Phase und der topographischen Höhe¹.

Die Auswertung liefert in allen Fällen interferometrische Bildprodukte guter Qualität. Die erzeugten Kohärenzbilder sind - mit Ausnahme des Juni-Tandem-Paares - gut strukturiert und visuell interpretierbar. Dunkle Bereiche mit niedriger Kohärenz können unmittelbar

¹ Ein Höhenunterschied - entsprechend der in Tab. 4-2 angegebenen - führt zu einer Phasenverschiebung von 360 Grad im relativen Phasenbild. Aus diesen Werten läßt sich die Genauigkeit der Höhenbestimmung mittels SAR-Interferometrie abschätzen. Geht man von einem Phasenrauschanteil von $2\pi/10$ aus, so errechnet sich ein korrespondierender Rauschanteil in der Höhenbestimmung von 10% der 2π -Werte in Meter. Bei Basislinien von etwa 90 m erhält man eine Höhengenaugigkeit von etwa 10 m.

als Waldflächen identifiziert werden; helle Bereiche stellen überwiegend Ackerflächen mit geringem Pflanzenbedeckungsgrad dar. Aber auch innerhalb der landwirtschaftlich genutzten Flächen ergeben sich je nach Dichte der Vegetationsschicht deutliche Unterschiede im Kohärenzwert (Abb. 4-5).

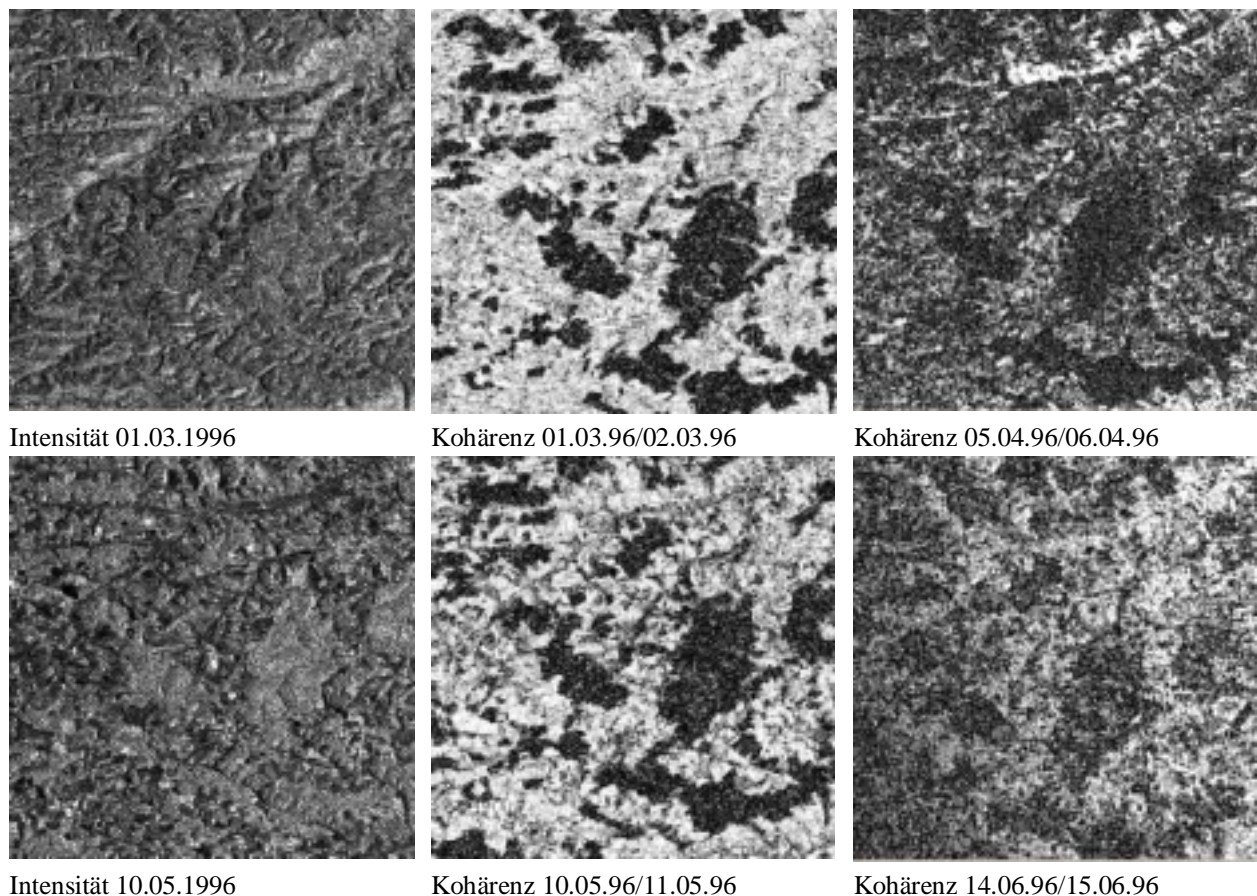


Abb. 4-5: Gegenüberstellung von Intensitäts- und Kohärenzbildern zu unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten für den Bereich Scheyern (Bildausschnitt ca. 5 x 5 km²)

Auch aus den *Fringe*-Bildern läßt sich bereits erkennen, ob die weitere Bearbeitung erfolgversprechend ist: In Bildbereichen mit hoher Kohärenz müssen die *Fringe*-Streifen klar erkennbar sein. Dies ist bei allen Tandem-Bildpaaren der Fall.

Die in Tab. 4-2 angegebenen Kohärenzwerte sind Mittelwerte über alle Pixel der gesamten Viertelszene bzw. deren Standardabweichung. Für die landwirtschaftlichen Flächen liegen die Kohärenzwerte im oberen Bereich. Man erkennt die Tendenz zur Abnahme der Kohärenzwerte für die späteren Aufnahmezeitpunkte entsprechend der Vegetationsentwicklung.

Nach Abschluß der interferometrischen Verarbeitung lagen für jedes Tandem-Bildpaar folgende Daten vor, die mit ERDAS *Imagine*TM zu einem 5-kanaligen Bild zusammengesetzt wurden: Intensitätsbild aus dem ersten SLC-Datensatz (Kanal 1), Intensitätsbild aus dem zweiten SLC-Datensatz (Kanal 2), Phase des komplexen Interferogramms (*Fringe Image*) (Kanal 3), Phase des komplexen relativen Interferogramms (Relative Phase) (Kanal

4) und Kohärenzbild (Kanal 5). Alle Bilddateien umfassen eine volle Viertelszene, d.h. einen Bereich von etwa 50 km x 50 km in einer Auflösung von ca. 20 m x 20 m.

4.8 Untersuchung der *Speckle*-Statistik

Zur Untersuchung der *Speckle*-Statistik sind homogene Bildbereiche von besonderem Interesse, da dort die Signalvarianz ausschließlich aus *Speckle*-Rauschen resultiert. Für 1-Look Amplitudenbilder würde die Grauwertverteilung einer Rayleigh-Verteilung entsprechen (ULABY et al. 1986b). Erst wenn die Bildbereiche durch ihre Oberflächenbeschaffenheit nicht mehr homogen sind und eine eigene Textur¹ ausbilden, sind signifikante Abweichungen von der theoretischen Rayleigh-Verteilung zu erwarten. Daher kann die Anpassung der Grauwertverteilung an die theoretisch zu erwartende Rayleigh-Verteilung für 1-Look Amplitudenbilder als Homogenitätskriterium dienen. Um eine Aussage über die Homogenität des SAR-Signals innerhalb eines Schlages machen zu können, wurde für einige ausgewählte Schläge der Hauptfruchtarten die *Speckle*-Statistik detailliert analysiert.

Abb. 4-6 zeigt exemplarisch die Grauwertverteilung eines Winterweizenschlages von verschiedenen ERS-2 Aufnahmen von 1997. Die Histogramme sind jeweils mit der Rayleigh-Verteilung überlagert, deren Dichtefunktion durch

$$f_A(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) & \text{für } x > 0 \\ 0 & \text{für } x \leq 0 \end{cases} \quad \text{Gl. 4-1}$$

gegeben ist.

Die Ergebnisse zeigen für alle Hauptfruchtarten eine sehr gute Übereinstimmung mit der theoretisch zu erwartenden Rayleigh-Verteilung für 1-Look Amplitudenbilder. Dies bestätigt die Annahme eines relativ homogenen Rückstreuverhaltens eines Schlages mit einheitlicher Bodenbedeckung.

Des weiteren geht aus Abb. 4-6 hervor, daß sich die Histogrammform im Zuge der allgemeinen Pflanzenentwicklung des Weizenbestandes verändert. Da die Rayleigh-Verteilung aber einzig durch den Mittelwert des Signals festgelegt wird, was die Abhängigkeit von Mittelwert und Standardabweichung impliziert, kann man den wesentlichen Informationsgehalt der SAR-Amplitudenbilder bzw. Intensitätsbilder durch Mittelwertbildung über alle Pixel eines homogenen Schlages erfassen.

¹ Als Textur werden lokale Bildstrukturen bezeichnet, die für bestimmte Objektoberflächen oder Materialien charakteristisch sind.

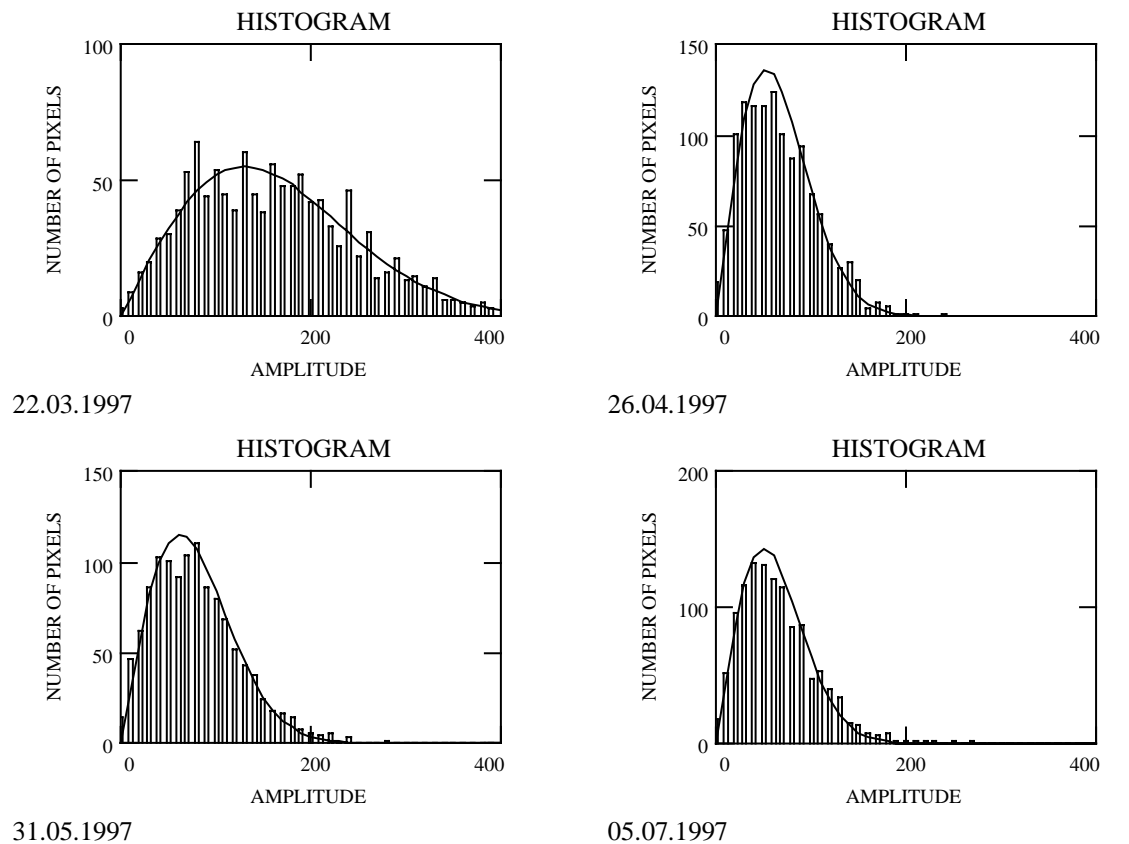


Abb. 4-6: Histogramme der gemessenen ERS-2 Rückstreuwerte für 1997 am Beispiel eines großen Winterweizenschlages mit überlagerter Rayleigh-Verteilung

4.9 Ableitung schlagbezogener bildstatistischer Kennwerte

Die bildstatistischen Kennwerte bilden die Grundlage für die multitemporale Klassifizierung und die anschließenden Analysen der ERS SAR-Daten. Wichtigster Kennwert hierbei ist der mittlere Rückstreukoeffizient σ^0 , der anhand der unkalibrierten Signalamplituden A_{ij} berechnet und anschließend kalibriert wurde:

$$\sigma^0 = \frac{1}{n} \sum A_{ij}^2 \quad \text{Gl. 4-2}$$

Der mittlere kalibrierte Rückstreukoeffizient σ^0 enthält Informationen über die abgebildete Oberfläche und ist neben den Radarparametern Frequenz, Polarisation und Abstrahlwinkel im wesentlichen eine Funktion der Oberflächenparameter wie Rauigkeit, geometrische Form und dielektrische Eigenschaften des Targets. Die Untersuchungen in bezug auf die Zusammenhänge zwischen der Radarrückstreuung und den Ground Truth-Daten beziehen sich daher auf den mittleren Rückstreukoeffizient σ^0 eines Schlages.

Weitere statistische Parameter erster Ordnung wurden aus der Signalvariation extrahiert und können im allgemeinen als Indikatoren für das Vorhandensein von Textur betrachtet

werden¹. Bezogen auf die unkalibrierte, logarithmierte Amplitude A_{ij} sind dies die Kennwerte *Varianz* (v), *Verteilungsschiefe* (ske) und *Verteilungswölbung* (exz), die wie folgt definiert sind:

$$v = \frac{1}{n-1} \sum (A_{ij} - \sigma^0)^2 \quad \text{Gl. 4-3}$$

$$ske = \frac{1}{n-1} \cdot \frac{\sum |(A_{ij} - \sigma^0)^3|}{\sqrt{v^3}} \quad \text{Gl. 4-4}$$

$$exz = \frac{1}{n-1} \cdot \frac{\sum (A_{ij} - \sigma^0)^4}{v^2} \quad \text{Gl. 4-5}$$

Ferner kann der Variationskoeffizient CoV bestimmt werden, obwohl sich σ^0 auf kalibrierte und v auf unkalibrierte Signalintensitäten beziehen, da die Varianz invariant gegenüber Skalentranslationen $A_{ij} \pm D$ ist (SCHÖNWIESE 1992). Der Variationskoeffizient eignet sich bei SAR-Bilddaten insbesondere zur Beurteilung des Texturanteils, da er unabhängig vom lokalen Grauwertmittel ist (BÄHR & VÖGTLE 1998). Ebenso gilt der Variationskoeffizient als geeignetes Maß zur Beurteilung der Homogenität eines Schlages. Der Variationskoeffizient ist wie folgt definiert:

$$CoV = \frac{\sqrt{v}}{\sigma^0} \quad \text{Gl. 4-6}$$

Im Falle der drei Tandem-Bildpaare von 1996 konnte zusätzlich die mittlere Kohärenz einzelner Schläge berechnet werden (s.Kap. 2.6.1).

Ergänzend können anhand des DGM die schlagbezogenen Terrainparameter *lokaler Einfallswinkel*, *Hangneigung* und *Exposition* abgeleitet werden. Dazu wird eine Ausgleichsebene für jedes Polygon mit Hilfe einer Hauptkomponentenanalyse berechnet. Die Eingangsvariablen bilden die trivariaten Zufallsgrößen Rechtswert, Hochwert und Höhe über NN der Punktwolke, die die Schlaggrenze beschreibt. Die erste Hauptkomponente (HK) repräsentiert die Hauptausdehnung des Polygons (entspricht in der Regel der Bearbeitungsrichtung des Schlages) und spannt mit der zweiten HK die Ausgleichsebene auf. Der Normalenvektor dazu entspricht der dritten HK. Damit sind obige Terrainparameter eindeutig bestimmt (mündl. Mitteil. GÜNZL 1999).

Die aus den SAR-Daten und dem DGM abgeleiteten, schlagbezogenen Kennwerte sind in Tab. 4-3 zusammengefaßt:

¹ Unter Texturmerkmalen im engeren Sinne werden statistische Parameter 2. Ordnung verstanden, die räumliche Korrelationen der Pixel zueinander berücksichtigen. Aufgrund der begrenzten räumlichen Auflösung des ERS SAR-Sensors sind Texturen allerdings nur schwach ausgeprägt (BÄHR & VÖGTLE 1998), so daß auf die Extraktion von Texturmerkmalen verzichtet wird.

Tab. 4-3: Schlagbezogene Kennwerte, abgeleitet aus ERS SAR-Daten und DGM

Kennwert	Einheit	Symbol
Mittlerer kalibrierter Radarrückstreuoeffizient	Dezibel	σ^0
Varianz der logarithmierten Amplitude	Dezibel	v
Verteilungsschiefe der logarithmierten Amplitude		ske
Verteilungswölbung logarithmierten Amplitude		exz
Variationskoeffizient		CoV
Mittlere Kohärenz (nur für drei Termine in 1996)		γ
Anzahl der SAR-Pixel		N
Mittlerer lokaler Einfallswinkel (local incidence angle)	Grad	Li
Mittlere Hangneigung	Grad	Slo
Mittlere Exposition	Grad	Exp
Rangedistanz (Sensor – Rückstreuer)	Meter	Rd

Alle bildstatistischen Kennwerte werden aus den ursprünglichen SAR SLC-Daten abgeleitet. Dies erforderte eine Projektion der Schlaggrenzen (Vektordaten) in die spezifische *Slant Range*-Geometrie der SLC-Bilddaten.

Um die Kennwerte aus möglichst homogenen Bildbereichen extrahieren zu können, wird zuvor eine Pufferung der Schlaggrenzen mit einer Distanz von -20 m durchgeführt (*buffer*).

Die abgeleiteten Kennwerte können anhand einer eindeutigen Schlag-Kennziffer (ID) mit den Daten der Ground Truth- und GIS-Datenbank in Relation gesetzt werden.

5 Satellitendaten optischer Sensoren

Fernerkundungsdaten der Satelliten Landsat, SPOT und IRS mit Kanälen im sichtbaren und infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums werden aus folgenden Gründen in die Untersuchung einbezogen:

1. Vergleich der Klassifizierungsergebnisse, die entweder mit Satellitendaten optischer Sensoren oder mit ERS-Daten erzielt werden können.
2. Multisensorklassifizierung von ERS SAR-Daten in Kombination mit Daten optischer Sensoren.
3. Aktualisierung der Schlaggrenzen auf der Grundlage der digitalen Flurkarten 1: 5000 (mit Hilfe von SPOT PAN bzw. IRS-1C PAN).

In diesem Zusammenhang bedarf es einer kurzen Dokumentation der Datengrundlage und der nötigen bildverarbeitenden Maßnahmen.

5.1 Verwendete Satellitensysteme und Datengrundlage

Aus dem Spektrum der optischen Fernerkundung wurden multispektrale Bilddaten des Landsat TM sowie panchromatische Bilddaten des SPOT und IRS-1C ausgewertet. Die wichtigsten Systemeigenschaften sind in Tab. 5-1 zusammengefaßt:

Tab. 5-1: Eigenschaften der verwendeten Satellitensysteme

Satellit	Geom. Auflösung (m)	Flughöhe (km)	Szenengröße (km)		Wiederholungsrate (Tage)		
Landsat TM	30 x 30	705	183 x 172		16 am Äquator, 8 bei 60°		
SPOT(PAN)	10 x 10	822	60 x 60				
IRS-1C (PAN)	5,8 x 5,8	817	70 x 70		24 am Äquator		
Sensoren		Spektralkanäle (µm)					
	1	2	3	4	5	6*	7
Landsat TM	0,45-0,52 blau	0,52-0,60 grün	0,63-0,69 rot	0,76-0,90 NIR	1,55-1,75 SWIR	10,4-12,5 TIR	2,08-2,35 SWIR
SPOT(PAN)	panchromatisch 0,51-0,73						
IRS-1C (PAN)	panchromatisch 0,50-0,75						

* geometrische Auflösung: 120 m x 120 m

Entscheidend für den Informationsgehalt optischer Satellitendaten für landwirtschaftliche Fragestellungen ist ein Aufnahmeterrain während der Vegetationszeit und der jeweilige Grad der Wolkenbedeckung.

In Tab. 5-2 sind die Szenen für das Untersuchungsgebiet zwischen 1996 und 1998 zusammengefaßt, die diesbezüglich die besten Voraussetzungen hatten:

Tab. 5-2: Multitemporale Abdeckung des Untersuchungsgebietes mit Landsat TM, SPOT und IRS-1C

Sensor	1996		1997		1998	
	Aufnahme	Wolkenbedeckung (%)	Aufnahme	Wolkenbedeckung (%)	Aufnahme	Wolkenbedeckung (%)
Landsat TM	21.04. 08.06.	0 10	08.04.	0	01.08.	< 5
SPOT (PAN)	23.04.	0	-	-	-	-
IRS-1C (PAN)	-	-	13.08.	2,5	28.05.	2,5

Die Termine in obiger Tabelle verdeutlichen die Problematik, daß Bilddaten von optischen Sensoren mit geringer Wolkenbedeckung innerhalb einer günstigen Aufnahmeperiode zwischen Mai und Juli nicht immer zur Verfügung stehen. In vielen Fällen mußte daher auf sehr frühe bzw. sehr späte Aufnahmetermine ausgewichen werden, was den Informationsgehalt der Daten für landwirtschaftliche Fragestellungen einschränkt.

5.2 Geocodierung

Sämtliche Bilddaten der optischen Sensoren wurden in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem¹ überführt und entsprechend geocodiert. Als Referenzdaten dienten digitale topographische Karten im Maßstab 1 : 25 000 des BayLVA. Die Entzerrung wurde mit einer nichtlinearen polynominalen Transformation zweiten Grades durchgeführt. Die panchromatischen Szenen wurden unter der Prämisse einer möglichst hohen Lagegenauigkeit einem *Cubic-Convolution* Resampling-Verfahren unterzogen (ERDAS *Field Guide* 1994). Um die radiometrische Dynamik der Daten durch Mittelungseffekte nicht zu beeinträchtigen, wurden die multispektralen TM-Szenen nach dem *Nearest-Neighbor*-Verfahren rückgerechnet (ATKINSON 1985). Die Geocodierungen konnten mit Genauigkeiten von < 1 Pixel durchgeführt werden.

5.3 Ableitung schlagbezogener Bildparameter

Da als Klassifizierungsmethode eine schlagbezogene Auswertung der Fernerkundungsdaten erfolgt, bedarf es einer schlagbezogenen Extraktion der mittleren Grauwerte der einzelnen Spektralkanäle. Hierzu wurden in analoger Vorgehensweise wie zur Ableitung der radarspezifischen Bildparameter die vektoriellen Schlaggrenzen herangezogen (s. Kap. 4.9). Zur Verringerung von Randeffekten erfolgte eine Pufferung der Schlaggeometrie von 20 m. Die Berechnung der lokalen Mittelwerte wurde mit Hilfe der sogenannten *Zonal-Attribute*-Funktion von ERDAS *Imagine*TM durchgeführt. Die abgeleiteten mittleren Grauwerte des IRS- bzw. SPOT-Kanals und der 7 Landsat-Kanäle wurden abschließend in die zentrale Bilddatenbank integriert.

¹ Projektionsparameter: Bessel-Ellipsoid; geodätisches Datum: Potsdam; Zentralmeridian: 12 Grad östlicher Länge.

6 GIS-Datengrundlage, -Datenaufbereitung und GIS-Aufbau

Die GIS-Datenbank gliedert sich in einen Bereich der sogenannten Ground Truth-Daten, die durch turnusmäßige Messungen, Bonituren und Kartierungen von Schlägen erhoben wurden und in einen Bereich sogenannter externer GIS-Daten (Abb. 6-1).

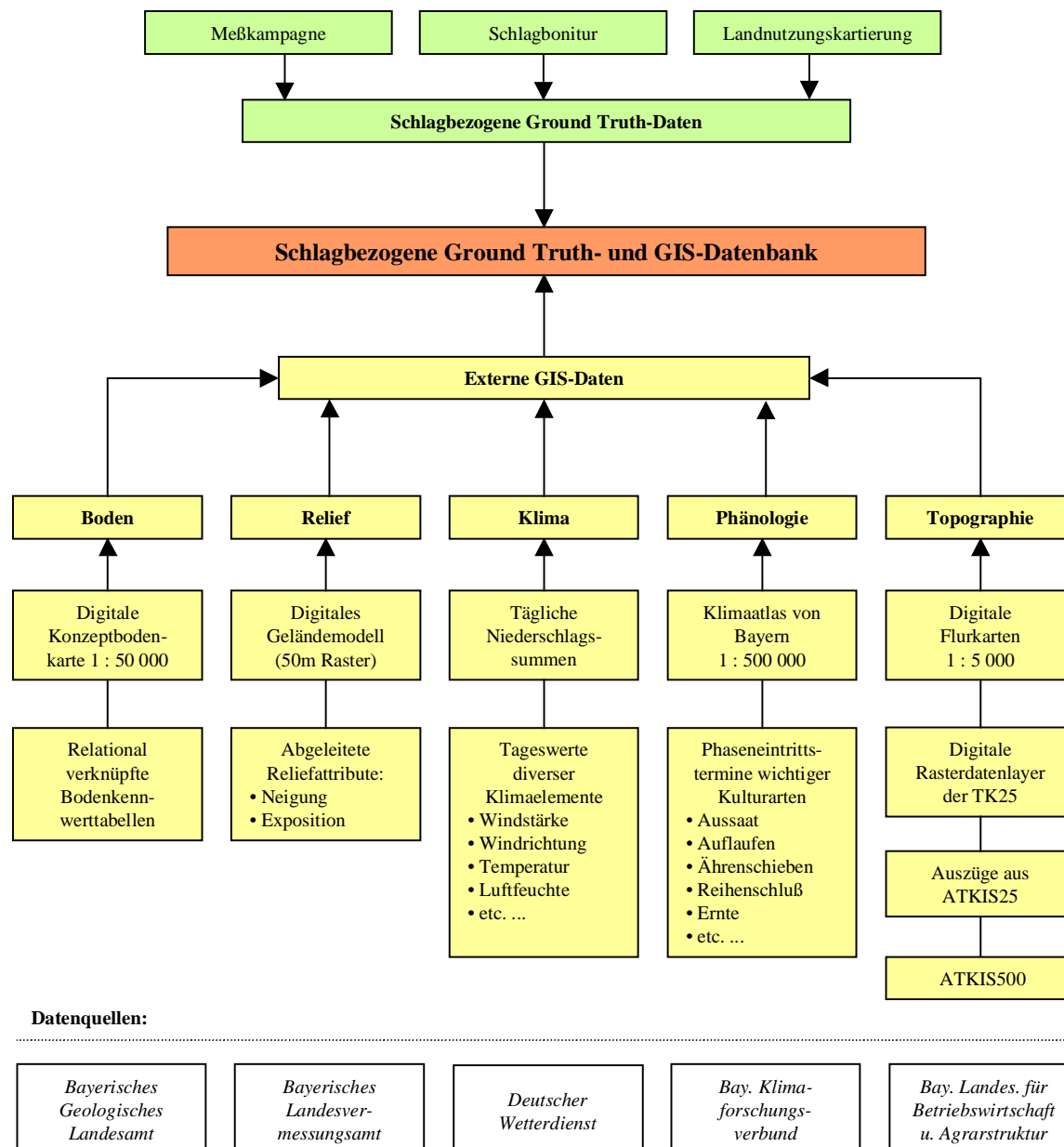


Abb. 6-1: Aufbau des Geoinformationssystems

Die aus externen Datenquellen ins GIS integrierten Datensätze beinhalten Informationen zu Bodeneigenschaften, Klima und Witterung, Pflanzenphänologie, Relief sowie Topographie.

6.1 Ground Truth-Daten

6.1.1 Konzept der dreistufigen Ground Truth-Datenerhebung

Zur Analyse multifaktorieller Einflüsse auf das Radarsignal sind umfangreiche Ground Truth-Daten erforderlich. Um den Daten im nötigen Umfang routinemäßig während einer möglichst kurzen Zeitspanne um den Überfliegezeitpunkt herum erfassen zu können, wurde eine Methode zur optimierten Ground Truth-Datenerhebung entwickelt.

Das neue Konzept wurde entwickelt, als erste Auswertungen der Ground Truth-Daten von 1996 zeigten, daß zur Untersuchung der vielfältigen Einflüsse wie Relief, Boden, Witterung, Pflanzenphänologie, Bewirtschaftung und Landschaftsstruktur auf das Radarsignal eine wesentliche Erweiterung der Datengrundlage erforderlich wurde. Ein Datenkollektiv von zuerst nur 30 Testschlägen in 1996, verteilt über ein ca. 1600 km² großes Untersuchungsgebiet, erwies sich als nicht ausreichend. Aus zeitlichen und finanziellen Gründen konnte das bereits aufwendige Meßprogramm nicht erweitert werden. Um dennoch mehr Informationen von weiteren Referenzflächen zu erfassen, wurde unter Einsatz neuer GIS-Technologien (s. Kap. 6.1.3) ein Konzept für ein dreistufiges Monitoringprogramm entwickelt:

- Stufe 1: Meßprogramm zur Erfassung von Eigenschaften des Pflanzenbestandes und der Bodenoberfläche. Dies sind überwiegend metrische Meßdaten, die auf ca. 30 bis 35 Referenzschlägen mit 2 bis 10 Wiederholungen pro Schlag erhoben wurden. Diese Schläge bilden räumliche Kernzellen des Ground Truth-Programms, die von den Bereichen der Stufen 2 und 3 umgeben sind. Die Daten der Stufe 1 repräsentieren im wesentlichen den Datensatz der bisherigen Messungen.
- Stufe 2: Diese Daten wurden neu in das Ground Truth-Programm aufgenommen. Es handelt sich überwiegend um ordinale Schätzdaten auf der Basis von Beurteilungsschlüsseln und Schätztabellen des Pflanzenbaus und der Bodenkunde, die den Zustand der Pflanzenbestände und der Bodenoberfläche beschreiben und klassifizieren. Die Erhebungen, die von geschlossenen Bereichen um die Kernzellen der Stufe 1 erhoben wurden, umfaßten ca. 450 Schläge.
- Stufe 3: Kartierung der Landnutzung ausgedehnter Bereiche von insgesamt ca. 30 km², die nach naturräumlichen Aspekten repräsentativ für das Untersuchungsgebiet ausgewählt wurden und sich möglichst in Nachbarschaft zu den Referenzflächen der Stufen 1 und 2 befanden.

Die räumliche Anordnung aller Referenzflächen der drei Ground Truth-Stufen innerhalb des Untersuchungsgebietes ist beispielhaft für das Untersuchungsjahr 1998 in Abb. 6-2 dargestellt.

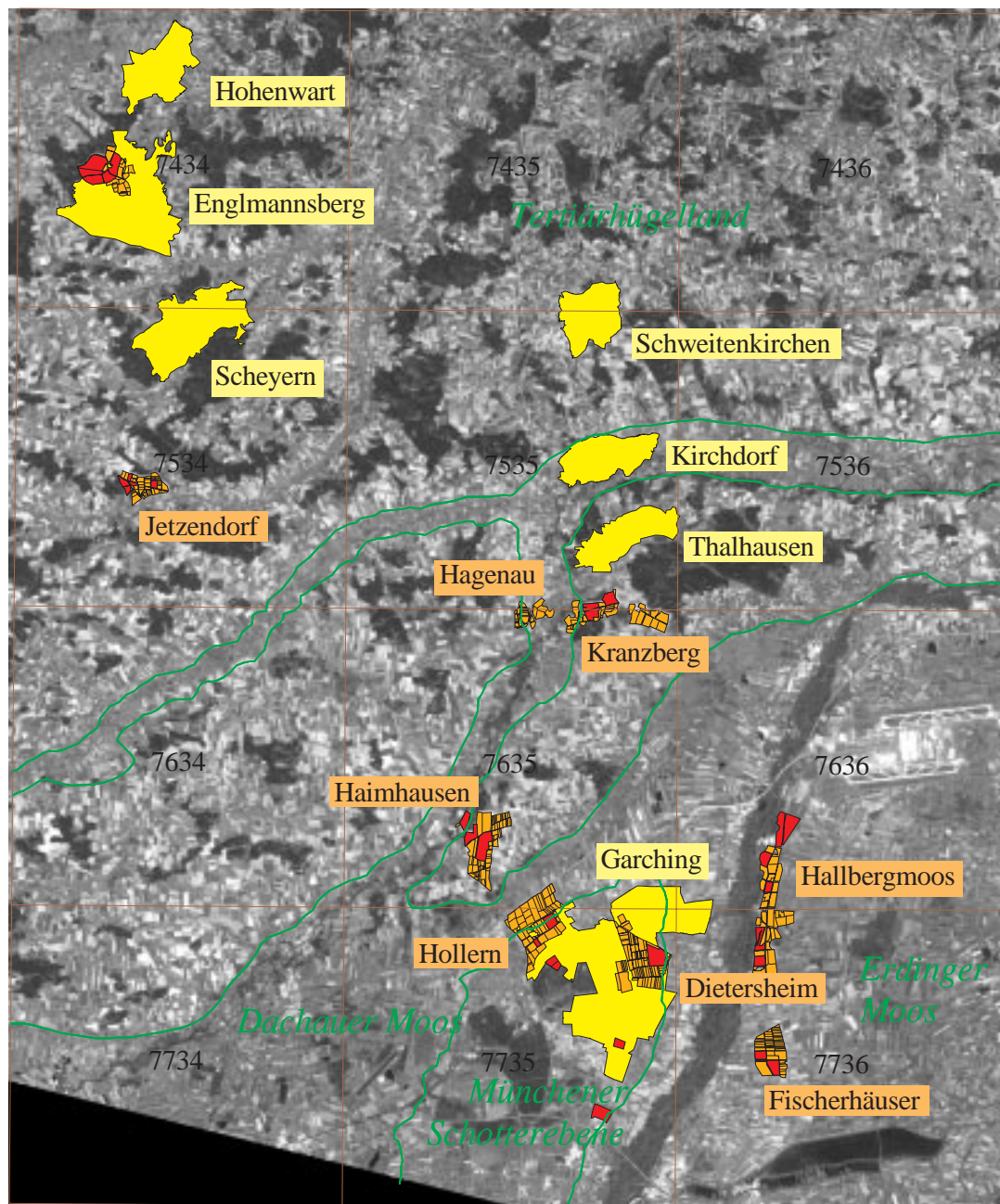


Abb. 6-2: Lage der Ground Truth-Referenzflächen innerhalb des Untersuchungsgebietes am Beispiel des Untersuchungsjahres 1998. Rot: Referenzflächen (Stufe 1); orange: Boniturflächen (Stufe 2); gelb: Kartiergebiete (Stufe 3)

Die grünen Linien in Abb 6-2 markieren die drei naturräumlichen Einheiten, in das Untersuchungsgebiet für die spätere Klassifizierung unterteilt wird.

6.1.2 Ground Truth-Datenerhebung der Stufe 1 (Meßprogramm)

Testschlagauswahl und Probennahmestrategie

Im Rahmen des Meßprogramms wurden Schläge flächenrepräsentativer Kulturen im Untersuchungsgebiet ausgewählt. Das Datenkollektiv bezog sich auf 25 bis 31 GPS-vermessene Flächen pro Untersuchungsjahr.

Zusammensetzung, Umfang und Flächen- statistik der beprobten Schläge sind in Tab. 6-1 zusammengefaßt:

Tab. 6-1: Zusammensetzung, Umfang und Flächenstatistik der Referenzflächen 1996 bis 1998

Jahr	Fruchtart	Anzahl der Schläge	Kleinsten Schlag (ha)	Größter Schlag (ha)	Σ Flächen (ha)	Mittl. Schlaggröße (ha)
1996	Winterweizen	5	10,8	37,8	105,3	21,1
	Wintergerste	5	5,8	18,2	55,9	11,2
	Silomais	5	12,0	36,2	109,6	21,9
	Kartoffeln	5	3,9	22,0	45,6	9,1
	Zuckerrüben	5	3,4	16,1	43,0	8,6
1997	Winterweizen	5	10,3	23,5	80,4	16,1
	Wintergerste	5	5,1	19,3	51,7	10,4
	Sommergerste	5	19,7	24,2	113,9	22,8
	Silomais	5	15,3	36,8	129,3	25,9
	Winterraps	4	4,3	30,6	60,5	15,1
	Kartoffeln	5	6,1	14,3	54,8	10,9
1998	Winterweizen	9	5,8	41,8	210,5	23,4
	Wintergerste	6	4,7	21,2	79,3	13,2
	Sommergerste	4	14,1	44,1	95,8	24,0
	Silomais	6	3,5	34,4	104,7	17,4
	Winterraps	6	5,7	14,0	57,9	9,7

Pro untersuchter Fruchtart wurden 4 bis 9 Schläge ausgewählt, die eine Mindestgröße von 3,4 ha besaßen. Ihre räumliche Verteilung im Untersuchungsgebiet sollte - unter naturräumlichen Aspekten und den vorhandenen Agrarregionen betrachtet - möglichst homogen sein. Auf jedem Schlag wurden vier repräsentative Probennahmestellen festgelegt, die im Zentralbereich des Schlages in einem 50 m Raster angeordnet waren.

Turnusmäßig erhobene Bestandes- und Bodenparameter

Die erhobenen Bestandes- und Bodenparameter sind in Tab. 6-2 aufgeführt. Der nötige oberirdische Biomassenschnitt zur Bestimmung der Frisch- bzw. Trockenmasse sowie des absoluten Wassergehaltes der Pflanzen erfolgte mit Ausnahme von Winterraps entlang einer Saat- bzw. Pflanzenreihe von einem Meter Länge. Der Flächenbezug wurde durch Multiplikation mit dem mittleren Saat- bzw. Pflanzenreihenabstand hergestellt. Bei Getreide, einschließlich Mais, fand eine fraktionierte Massenbestimmung nach Frucht und Restpflanze statt (Tab. 6-2).

Ferner wurden Besonderheiten im Pflanzenbestand bzw. der vegetationsfreien Oberfläche festgehalten, deren Merkmale in Tab. 6-3 zusammengestellt sind.

Tab. 6-2: Bestandes- und Bodenparameter der intensiv beprobten Schläge (Stufe 1)

Pflanzenparameter	Methode	Stichprobe
Bestandeshöhe	Zollstock	40 x / Schlag
Pflanzenentwicklungsstadium	BCCH-Methode ¹	2 x / Schlag
Frischmasse (Gesamtpflanze)	Feldwaage	4 x / Schlag
Frischmasse (Früchte)	Feldwaage	4 x / Schlag
Trockenmasse (Gesamtpflanze)	Trocknung bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz	4 x / Schlag
Trockenmasse (Früchte)	Trocknung bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz	4 x / Schlag
Wassergehalt (Gesamtpflanze)	Differenzwägung FM-TM	
Wassergehalt (Früchte)		
Bodenbedeckungsgrad	Visuelle Beurteilung (5 Klassen) / Foto	4 x / Schlag
Ährenlänge	Zollstock	40 x / Schlag
Grannenlänge	Zollstock	40 x / Schlag
Ährenneigung	Visuelle Beurteilung (5 Klassen) / Foto	4 x / Schlag
Blattbenetzung	Visuelle Beurteilung (4 Klassen) / Foto	2 x / Schlag
Besonderheiten im Bestand	Visuelle Beurteilung (9 Klassen), Mehrfachnennung möglich / Foto	1 x / Schlag
Blattflächenindex ²	LAI-Corr 2000	16 x / Schlag
Bodenparameter	Methode	Stichprobe
Volumetrische Bodenfeuchte	TDR ³ -Sonde (oberste 10 cm)	24 x / Schlag
Bodenrauigkeit	Visuelle Beurteilung (5 Klassen) / Foto	1 x / Schlag
Bodenbearbeitungszustand	Visuelle Beurteilung (6 Klassen) / Foto	
Bearbeitungsrichtung	Kompaß	1 x / Schlag
Besonderheiten der Boden-Oberfläche	Visuelle Beurteilung (9 Klassen), Mehrfachnennung möglich / Foto	1 x / Schlag

Tab. 6-3: Erfassung von Besonderheiten im Pflanzenbestand und/oder vegetationsfreier Oberflächen

Besonderheiten im Pflanzenbestand	Besonderheiten des vegetationsfreien Bodens
Ernterückstand	Kies- und Schotteranteil
Unkrautbefall	Bodeninhomogenitäten
Pflanzenkrankheit / Vergilbung / Trocknissschaden	Verschlämmung
Wuchshöheninhomogenitäten	Naßstellen
Lückigkeit	
Lagerbildung	
Hagelschaden	

Aus den Einzelmessungen der Pflanzen- und Bodenparameter wurden durch arithmetrische Mittelung schlagbezogene Kennwerte berechnet und in eine relationale Datenbank übertragen.

¹ Erweiterte BBCH-Skala nach STAUSS et al. (1994) zur einheitlichen Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen.

² Der Blattflächenindex (LAI) wurde nur in 1997 gemessen.

³ *Time Domain Reflectometry* ist eine indirekte Methode zur Messung des volumetrischen Wassergehaltes eines Bodens, basierend auf Messung der Dielektrizitätszahl der Bodenmatrix, Temperatur sowie Schätzung der Porosität.

Zeitinvariante Parameter

Zeitinvariante Parameter wie Saattermin, Saattiefe, Reihenabstand, Reihenrichtung, Abstand in der Reihe, Bodenbearbeitungsmaßnahmen (Termin), Pflanzenschutzmaßnahmen (Termin), Düngung (Termin), Erntetermin, Erntemenge sowie Besonderheiten wurden im Rahmen einer Befragung der einzelnen Landwirte einmalig pro Anbauperiode ermittelt.

Erfassung witterungsbedingter Kurzzeiteffekte

Ergänzend wurden Daten zur aktuellen Wettersituation während des ERS-Überflugs im Gelände beobachtet und aufgezeichnet, um mögliche Kurzzeiteffekte durch Wind oder Regen zu erfassen (Tab. 6-4).

Tab. 6-4: Wetterbeobachtungen zu den ERS-Aufnahmetermi- nen am Beispiel 1997

Klimaelement /Datum	22.03.	26.04.	15.05.	31.05.	19.06.	05.07.	24.07.	09.08.	13.09.	18.10.
Niederschlag	ja	keiner	keiner	keiner	keiner	ja	keiner	keiner	ja	keiner
N-Form	Graupel					Regen			Regen	
Wolkenbedeck.	10/10	10/10	0/10	1/10	2/10	10/10	4/10	1/10	10/10	10/10
Wolkenbild	Stratus	Stratus	-	Cirrus	Cirrostr.	Stratus	Alto.	Cumul.	Stratus	Nebel
Blattbenetzung	stark	mittel	trocken	trocken	trocken	stark	gering	trocken	stark	stark
Windstärke (Beaufort)	4	3-4	0	4-5	2-3	1	0-1	1	3	0-1
Windrichtung	NW	SW		NE	SE	NW	SE	NNW	W	SSW
Windeinfluß	konstant	wogend	keiner	wogend	wogend	gering	keiner	gering	wogend	gering

6.1.3 Ground Truth-Datenerhebung der Stufe 2 (Schlagbonitur)

In den Untersuchungsjahren 1997 und 1998 wurde die Ground Truth-Datenbasis durch die Einführung der Boniturdaten-ebene erweitert. Die Datenerhebung fand in neun Teilgebieten des Untersuchungsgebietes statt (siehe Abb. 6-2, orange Flächen). Anzahl und mittlere Flächengrößen der bonitierten Schläge sind in Tab. 6-5 dokumentiert:

Tab. 6-5: Anzahl und mittlere Flächengrößen der Schläge in den Boniturgebieten 1997 und 1998

Boniturgebiet	Anzahl der Flächen		Mittlere Flächengröße (ha)		Gesamtgröße (ha)	
	1997	1998	1997	1998	1997	1998
Kranzberg	46	50	4,9	4,4	224	220
Dietersheim	78	81	4,0	3,8	312	208
Englmannsberg	30	32	6,7	6,2	200	199
Hagenau	31	33	2,6	2,4	82	82
Haimhausen	67	69	4,1	3,9	278	271
Hollern	58	58	5,4	5,4	315	318
Jetzendorf	59	63	2,0	1,9	117	119
Fischerhäuser	49	53	3,6	3,3	178	176
Hallbergmoos	50	51	6,6	6,5	333	333
Gesamt	468	490	4,3	4,1	2040	2024

Zur Bonitur der Schläge wurde ein Schätzrahmen entwickelt, der insgesamt 14 radarrelevante Parameter und deren Merkmalsausprägungen umfaßte. Die Parameterzusammensetzung und Anzahl der Merkmalsklassen ist in Tab. 6-6 dargestellt:

Tab. 6-6: Bestandes- und Bodenparameter der bonitierten Schläge (Stufe 2)

Pflanzenparameter	Klassen	Rubriken, Methode
Bestandeshöhe	11	20 cm Klassen
Pflanzenentwicklungsstadium	19	Vereinfachte BCCH-Methode
Bodenbedeckungsgrad	5	Visuelle Beurteilung/Foto
Blattstellung	5	Senkrecht/schräg nach oben/waagrecht/schräg nach unten,
Ährenneigung	5	s.o.
Ährenlänge	4	3 cm Klassen
Besonderheiten im Bestand	9	Visuelle Beurteilung, Mehrfachnennung möglich/Foto
Ausprägung und Umfang der Besonderheiten	9	3 x 3 Matrix: gering/mittel/stark und vereinzelt-50% des Schlages-100% des Schlages
Bodenparameter		Methode
Bodenrauigkeit	5	Visuelle Beurteilung/Foto
Bodenbearbeitungszustand	10	Visuelle Beurteilung/Foto
Besonderheiten der Bodenoberfläche		Visuelle Beurteilung, Mehrfachnennung möglich / Foto
Ausprägung und Umfang der Besonderheiten	9	3 x 3 Matrix: gering/mittel/stark und vereinzelt-50% des Schlages-100% des Schlages
Zustand nach der Ernte		
Ernterückstände	10	Fein- u. Grobstoppeln: hoch/flach/eingearbeitet, ...
Zwischenfrucht, sonstige Bodenbedecker	10	Fruchtartenbestimmung

Einsatz eines Feld-GIS-Systems zur großflächigen Bonitur

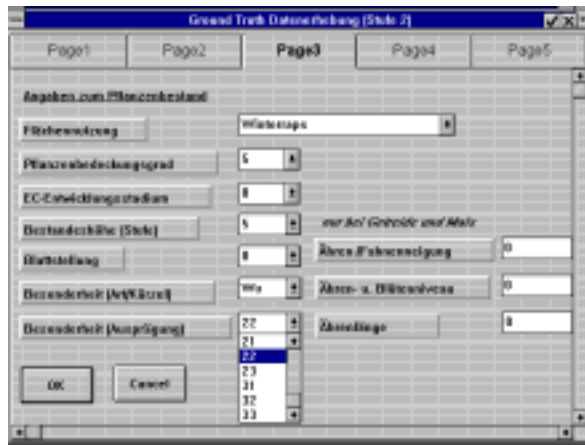
Um eine Bonitur von ca. 450 Schlägen mit geringem Personalaufwand in maximal zwei Tagen bewältigen zu können, wurde ein Feld-GIS-System entwickelt und eingesetzt. Dazu wurden anhand des ausgearbeiteten Boniturrahmens digitale Eingabemasken programmiert (Abb. 6-3b), die auf einem geländerobusten Pen-Computer mit Hilfe der GIS-Software FieldNotes installiert wurden (Abb. 6-3a).

Die Problematik von Veränderungen der Schlaggeometrie, die aus digitalisierten Flurkarten übernommen wurden, konnten unmittelbar im Gelände mit Hilfe eines angeschlossenen DGPS bereinigt werden.

Analog zu den Ground Truth-Daten des Intensivmeßprogramms wurden auch die Schätzdaten des Boniturprogramms als zweidimensionale, relationale Tabellen ins GIS ArcInfo¹ integriert.

Abb. 6-4 zeigt am Beispiel des Boniturgebietes *Dietersheim*, wie sich die Parameter *Deckungsgrad* und *EC-Stadium* zum Zeitpunkt der ERS-Aufnahme am 31.05.1997 darstellten.

¹ ArcInfo ist ein Produkt der Firma *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), Redlands, CA, USA.



a. Feld-GIS-Oberfläche zur Eingabe von Boniturdaten am Beispiel des Boniturgebietes 'Dietersheim'

b. Beispiel einer Eingabemaske zur Erfassung von Pflanzenparametern

Abb. 6-3: Feld-GIS-System mit Eingabemaske zur Bonitur des Pflanzenbestandes

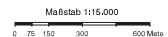
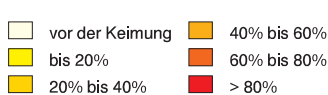
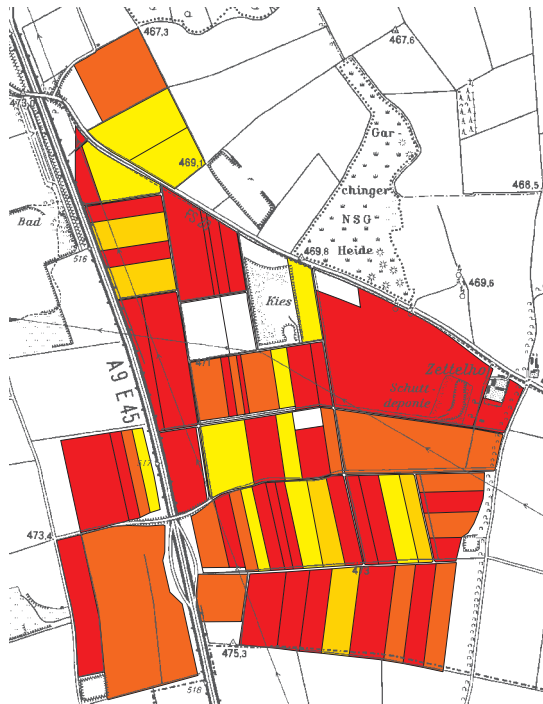
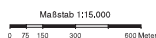
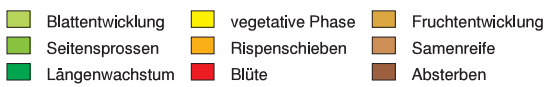
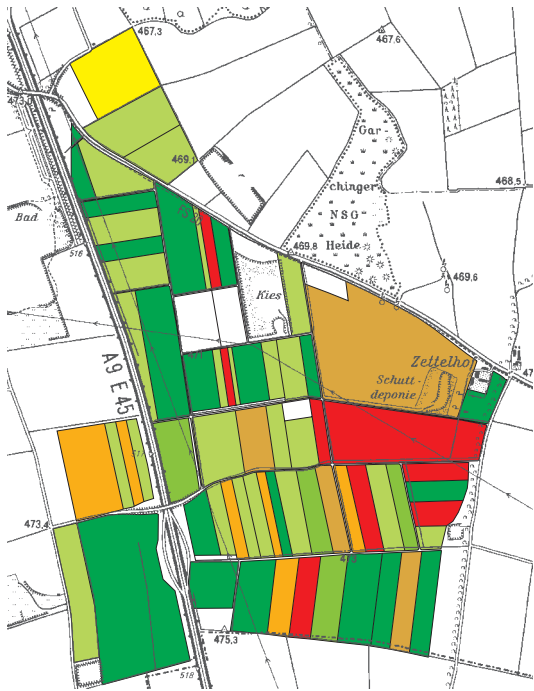


Abb. 6-4: GIS-Boniturdaten am Beispiel der Parameter EC-Stadium (links) und Deckungsgrad (rechts) diverser Kulturen am 31.05.1997 im Boniturgebiet Dietersheim

6.1.4 Landnutzungskartierungen (Stufe 3)

Die Kartierungen erfolgten in den drei Untersuchungsjahren jeweils Ende Juni Anfang Juli in sieben zusammenhängenden Teilgebiete des Untersuchungsgebietes, die für die Naturraumgliederung und die Agrarregionen als repräsentativ erachtet wurden (siehe Abb. 6-2, gelbe Flächen). Insgesamt wurden pro Jahr 6178 ha bzw. 2875 Schläge kartiert (Tab. 6-7):

Tab. 6-7: Flächenstatistik der kartierten Landnutzungsgebiete

Gebiet	Gesamtfläche (ha)	Anzahl der kartierten Felder nach:		Mittlere Feldgröße (ha) nach:		Wald, Siedlung, Gewässer	
		Kataster-grenzen	Nutzungs-grenzen	Kataster-grenzen	Nutzungs-grenzen	in ha	in %
Hohenwart	512,2	716	388	0,71	1,32	47,0	9,17
Englmannsberg	895,9	965	404	0,92	2,21	47,6	5,31
Scheyern	785,0	1312	544	0,60	1,44	42,6	5,42
Schweitenkirchen	461,0	805	318	0,57	1,45	37,8	8,19
Kirchdorf	482,2	1360	303	0,35	1,59	26,0	5,39
Thalhausen	462,7	839	229	0,55	2,02	41,4	8,94
Garching	2579,3	715	689	3,60	3,74	197,0	7,63
Gesamt	6178,3	6712	2875	0,92	2,15	439,4	7,11

Zur digitalen Datenerfassung im Gelände wurde wie für die Boniturdaten ein Feld-GIS-System eingesetzt. Als Geometriegrundlage dienten digitalisierte Flurkarten im Maßstab 1 : 5000. Jährliche Aktualisierung der Schlaggrenzengeometrien wurden auf Grundlage der hochauflösenden panchromatischen Satellitenszenen vorgenommen. Die Ergebnisse der Landnutzungskartierungen wurden als digitale Landnutzungskarten im Maßstab 1 : 5000 in das bestehende GIS integriert.

6.1.5 Zeitreihenumfang der verfügbaren Ground Truth-Daten

Die schlagbezogenen Ground Truth-Kennwerte wurden möglichst simultan mit den ERS-Überfliegungen erhoben. Aufgrund des Umfangs der Ground Truth-Kampagne mußte jedoch entweder der Vor- oder Folgetag einer Überfliegung hinzugezogen werden. Besonders zeitvariante Parameter, wie beispielsweise die Bodenfeuchte, wurden stets am Überfliegungstag gemessen. Dennoch kann in Einzelfällen nicht ausgeschlossen werden, daß zwischen der Ground Truth-Erhebung und der ERS-Aufnahme Veränderungen bestimmter Parameter stattgefunden haben. Mögliche Ursachen solcher kurzfristigen Veränderungen vor bzw. nach dem Überfliegungszeitpunkt waren in erster Linie lokale Niederschlagsereignisse und anthropogene Maßnahmen wie Bodenbearbeitungen oder Ernte.

Die Verfügbarkeit von Ground Truth-Daten zu den jeweiligen ERS-Überflügen ist zusammenfassend in Tab. 6-8 dokumentiert:

Tab. 6-8: Verfügbare Ground Truth-Daten zu den ERS-Aufnahmeterminen der Jahre 1996-1998

Nr. p.a.	Datum	DOY	ERS Spezifikation					Ground Truth		
			Satellit	ZS	Range	Orbit	PAF	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
1	01.03.96	61	ERS-1	x	far	24201	D-PAF	nein	nein	
2	02.03.96	62	ERS-2		far	4528	D-PAF	nein	nein	
3	05.04.96	96	ERS-1	x	far	24702	D-PAF	nein	nein	
4	06.04.96	97	ERS-2		far	5029	D-PAF	nein	nein	
5	10.05.96	131	ERS-1	x	far	25203	D-PAF	nein	nein	
6	11.05.96	132	ERS-2		far	5530	D-PAF	nein	nein	
7	14.06.96	166	ERS-1	x	far	25704	ESRIN	nein	nein	ja
8	15.06.96	167	ERS-2		far	6031	ESRIN	ja	nein	
9	20.07.96	202	ERS-2		far	6532	D-PAF	ja	nein	
10	24.08.96	237	ERS-2		far	7033	ESRIN	ja	nein	
11	28.09.96	272	ERS-2		far	7534	D-PAF	ja	nein	
12	02.11.96	307	ERS-2		far	8035	D-PAF	ja	nein	
1	22.03.97	81	ERS-2		far	10039	D-PAF	ja	nein	
2	26.04.97	116	ERS-2		far	10540	UK-PAF	ja	ja	
3	15.05.97	135	ERS-2	ja	near	10812	UK-PAF	nein	ja	
4	31.05.97	151	ERS-2		far	11041	UK-PAF	ja	ja	
5	19.06.97	170	ERS-2	x	near	11313	I-PAF	nein	ja	ja
6	05.07.97	186	ERS-2		far	11542	I-PAF	ja	ja	
7	24.07.97	205	ERS-2	x	near	11814	I-PAF	nein	ja	
8	09.08.97	221	ERS-2		near	12043	I-PAF	ja	ja	
9	13.09.97	256	ERS-2		near	12544	I-PAF	ja	ja	
10	18.10.97	291	ERS-2		near	13045	I-PAF	ja	ja	
1	07.03.98	66	ERS-2		far	15049	I-PAF	ja	ja	
2	11.04.98	101	ERS-2		far	15550	I-PAF	ja	ja	
3	16.05.98	136	ERS-2		far	16051	UK-PAF	ja	ja	
4	20.06.98	171	ERS-2		far	16552	I-PAF	ja	ja	ja
5	09.07.98	190	ERS-2	x	near	16824	I-PAF	ja	ja	
6	25.07.98	206	ERS-2		far	17053	D-PAF	ja	ja	
7	13.08.98	225	ERS-2	x	near	17325	I-PAF	ja	ja	
8	29.08.98	241	ERS-2		far	17554	UK-PAF	ja	ja	
9	03.10.98	276	ERS-2		far	18055	I-PAF	ja	ja	

DOY: Kalendertag; ZS: Zusatzszenen von benachbartem Orbit; PAF: Prozessierungs- und Archivierungszentren der ESA; ESRIN: European Space Agency's Centre in Frascati (u.a. auch SAR-Datenprozessierungs- und Archivierungseinrichtung der ESA)

6.1.6 Digitale Erfassung aktueller Schlaggrenzen

Da sämtliche Untersuchungen sich auf schlagbezogene Kennwerte beziehen, nimmt die exakte Geometriegrundlage der Schlaggrenzen eine Schlüsselstellung ein. Hierzu wurden für die Teilgebiete des Untersuchungsgebietes, in denen die Ground Truth-Datenerhebung durchgeführt wurde, Flurkarten im Maßstab 1 : 5000 digitalisiert¹ (Abb. 6-5). Die Digitalisierung umfaßte insgesamt 48 Flurkarten, die jeweils ca. 5,4 km² abdecken. Somit standen für ca. 260 km² vektorisierte Flurgrenzen zur Verfügung.

Die Verarbeitungsschritte zur Erstellung aktueller Schlaggrenzen stellen sich wie folgt dar:

¹ ATKIS oder ALK-Daten standen für das Untersuchungsgebiet im erforderlichen Maßstab nicht zur Verfügung.

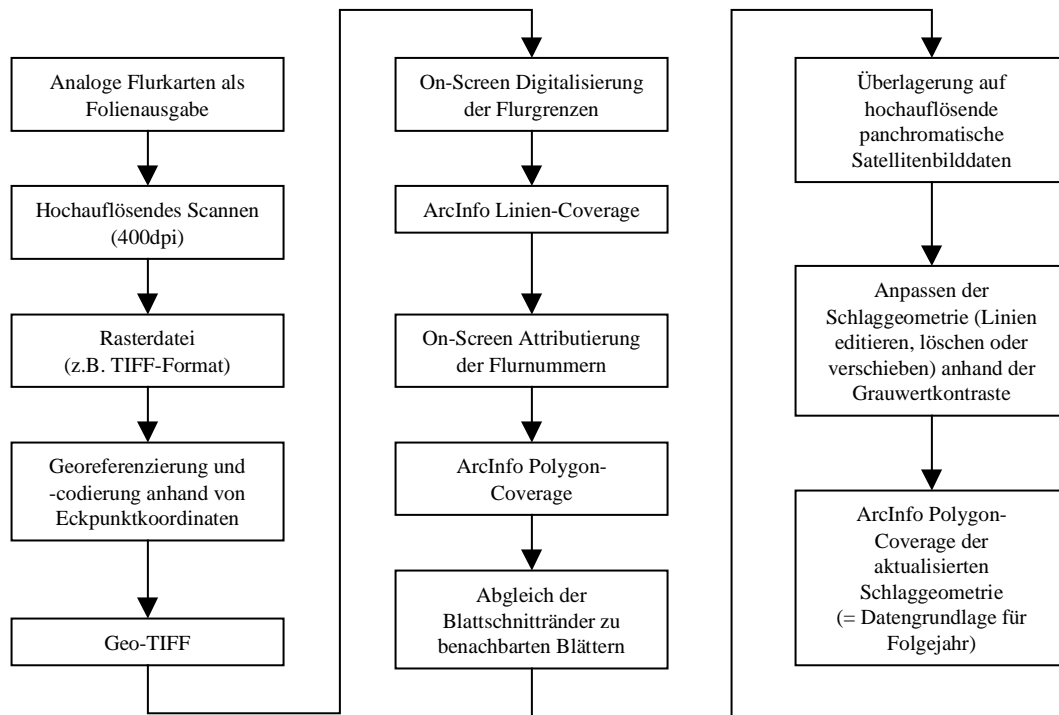
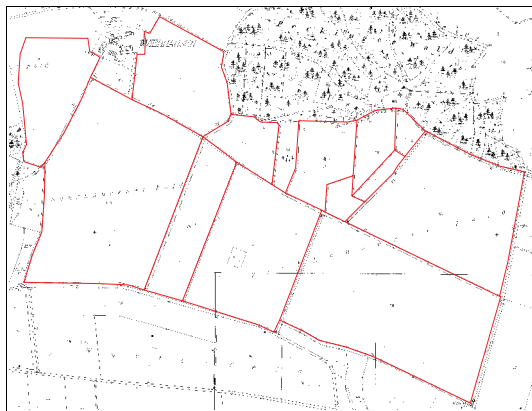
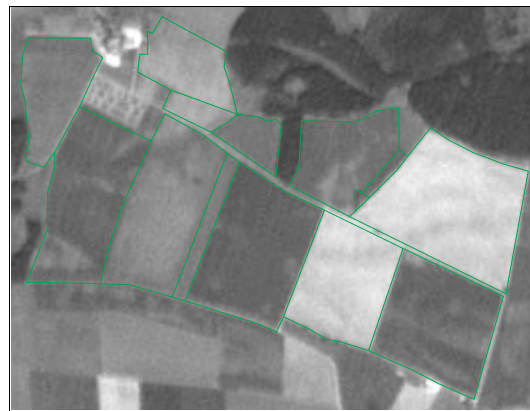


Abb. 6-5: Arbeitsablauf zur Erstellung der aktuellen digitalen Schlaggeometrie

Die arbeitsintensive Anpassung der Flurkartengeometrie an die aktuelle Schlaggrenzengeometrie erfolgte manuell unter Zuhilfenahme hochauflösender panchromatischer Satellitenbilddaten des IRS-1C bzw. SPOT (Abb. 6-6).



Unkorrigierte Parzellengrenzen, basierend auf Flurkarte 1 : 5000 (NO13-3).



Korrigierte aktuelle Schlaggrenzen, basierend auf IRS-1C Szene vom 28.05.1998 Maßstab 1 : 22000

Abb. 6-6: Anpassung der vektorisierten Flurkarte auf die aktuelle Schlageinteilung anhand einer IRS-1C-Szene

6.1.7 Ground Truth-Datenhaltung und GIS Anbindung

Alle erhobenen Ground Truth-Daten wurden über spezielle Schnittstellenformate in eine relationale Datenbank von ArcInfo überführt. Dies ermöglichte die räumliche Analyse und Visualisierung aller schlagbezogenen Kennwerte. Die Sachdaten des Meßprogramms (Stufe 1) wurden ferner sowohl in einer Punktdatenbank (jeder Meßpunkt innerhalb eines Referenzschlages) als auch als Flächendaten (Schlagmittelwerte) vorgehalten.

Die relationale Datenbank der Boniturdaten ist so strukturiert, daß zu jedem der 9 Boniturgebiete zum jeweiligen ERS-Aufnahmeterrmin eine separate relationale Tabelle geführt wurde. Darüber hinaus wurden die Daten aller Gebiete eines jeweiligen Aufnahmeterrmins zusammengefaßt. In einer Gesamttabelle wurden schließlich alle Boniturdaten zusammengeführt. Dies ermöglichte sowohl terminübergreifende Zeitreihenauswertungen als auch eine effiziente Einzeltermin-Betrachtung der Daten.

6.2 Externe GIS Daten

6.2.1 Digitale topographische Rasterdaten und ATKIS25

Digitale topographische Rasterdaten und ATKIS25-Daten dienen zur Maskierung nicht landwirtschaftlich genutzter Flächen, die von weiteren Untersuchungen ausgeschlossen werden sollten. Spezielle Gebietsmasken wurden für Wald-, Gewässer- und Siedlungsflächen auf der Datengrundlage des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) des BayLVA im Maßstab 1 : 25 000 erzeugt.

Darüber hinaus dienen die digitalen Rasterdaten der entsprechenden TK25 Blätter vom BayLVA als Referenz zur Geocodierung der Fernerkundungsdaten optischer Sensoren.

6.2.2 Reliefdaten

Die Korrektur reliefbedingter Radiometrieverzerrungen von SAR-Bildern erfordert ein digitales Geländemodell (DGM). Hierzu wurde auf ein regelmäßiges, gitterförmig strukturiertes Höhenmodell des BayLVA zurückgegriffen, das eine Rasterweite von 50 m aufweist.

Maßgebend für die Auflösung und Höhengenaugigkeit des DGM ist der mittlere Höhenfehler der zugrundeliegenden topographischen Karte 1 : 25 000, der etwa 3 m beträgt. Lokal begrenzte Höhenfehler bis zu 12 m wurden jedoch festgestellt und konnten bereinigt werden¹. Der Datenimport ins GIS ArcInfo erfolgte im ASCII-Code, aus dem unmittelbar ein Rasterdatensatz (*Lattice*) erstellt wurde.

¹ Die Bereinigung von isolierten Pixeln, die im Verhältnis zu ihren acht Nachbarpixeln tiefer oder höher gelegen sind und somit abflußlose Senken bzw. Kuppen darstellen, wurde mit Hilfe von zonalen GRID-Funktionen in ArcInfo vorgenommen. Dabei wurde die Annahme gemacht, daß diese Pixel überwiegend auf Fehler im DHM zurückzuführen sind und nicht als morphologische Geländeformen vorkommen.

Die Ableitung der lokalen Reliefattribute Hangneigung und Exposition erfolgte auf Basis der Rasterdatenstruktur mit Standardfunktionen des GRID-Moduls von ArcInfo.

Analog zu den übrigen externen Flächendaten wurden schlagbezogene statistische Kenngrößen (Mittelwert, Varianz, Minimum und Maximum) der abgeleiteten Reliefattribute durch Polygonüberlagerung über die Rasterdaten ermittelt (vgl. hierzu Vorgehensweise, wie in Abb. 6-8 dargestellt).

6.2.3 Klimadaten

Zur Beschreibung der Witterungssituation wurden Daten von 46 DWD-Niederschlags- und 9 Klimastationen im Untersuchungsgebiet und seiner näheren Umgebung ausgewertet.

Die Niederschlagsdaten lagen als Tagessummen, gemessen zwischen 7:30 und 7:30 MEZ des Folgetages, vor. Das Meßprogramm der Klimastationen umfaßte meteorologische Elemente, die die Eigenschaften der vom Radar beleuchteten Objekte kurzfristig beeinflussen können:

Tab. 6-9: Klimadaten des DWD

Meteorologisches Element	Einheit	7:30	14:30	21:30	Tages-Min.	Tages-Max.	Tages- \emptyset
Temperatur	Celsius	x	x	x	x	x	x
Relative Luftfeuchtigkeit	Prozent	x	x	x			x
Windrichtung	Dekagrad	x	x	x			
Windstärke	Beaufort	x	x	x		in m/s	x
Wolkenbedeckungsgrad		x	x	x			x
Sonnenscheindauer	Stunden	Tagessumme					

* x = vorhanden

Ergänzend dazu wurden Daten zur aktuellen Wettersituation während der ERS-Aufnahme im Gelände beobachtet und aufgezeichnet (vgl. Tab. 6-4).

Zur überregionalen Charakterisierung mittlerer klimatischer und phänologischer Zustände konnten darüber hinaus Daten des digitalen Klimaatlasses von Bayern (Bayerischer Klimaforschungsverbund 1996) genutzt werden. Der Atlas stellt die räumlichen und zeitlichen Verteilungen der wichtigsten Klimaelemente zusammen. Dazu zählen Lufttemperatur, Niederschlag, Feuchte, Globalstrahlung, Sonnenscheindauer, Bewölkung und Wind. Die Angaben beziehen sich dabei auf eine 30-jährige Zeitreihe von 1961-1990. Das Datenmaterial stammt zum weitaus größten Teil aus dem Meßnetz des DWD. Von besonderem Interesse für einzelne Untersuchungen waren die agrarklimatologischen Daten des Klimaatlasses. Die Kenntnis von raum-zeitlichen Unterschieden der Wachstumsphasen landwirtschaftlicher Kulturen kann bei großflächigen Klassifizierungen mit ERS-Daten, deren Rückstreuverhalten eng mit der oberirdischen Biomasse korreliert, nutzbar gemacht werden. Ferner konnten Zusammenhänge zwischen den klimatischen Verhältnissen und den typischen Fruchtfolgen einzelner Regionen festgestellt werden.

Abb. 6-7 zeigt die klimatische Zonierung des Untersuchungsgebietes am Beispiel des Niederschlags im hydrologischen Sommerhalbjahr, der Sonnenscheindauer im April und des Beginns des Spätsommers, der phänologisch mit der Gelbreife des Winterweizens definiert wird.

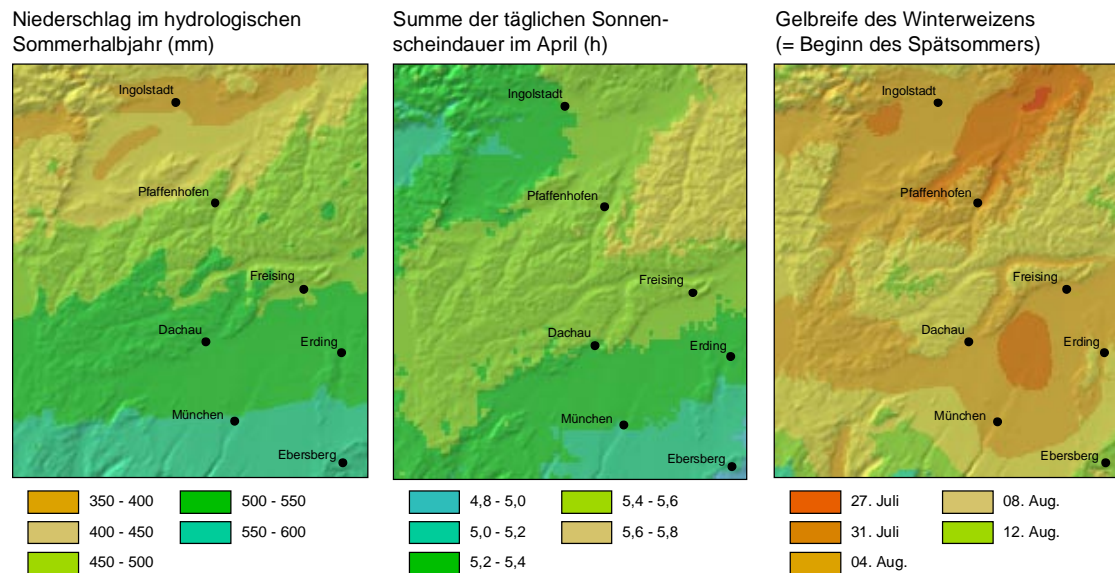


Abb. 6-7: Klimatische und phänologische Zonierung des Untersuchungsgebietes anhand der Parameter Sommerniederschlag, tägliche Sonnenscheindauer im April und Eintrittsdatum der Gelbreife des Winterweizens (Klimaatlas von Bayern; Bayer. Klimaforschungsverbund 1996)

Datenaufbereitung und GIS-Integration

Bei Klima- und Niederschlagsdaten des DWD handelt es sich um Punktdaten, die sich auf entsprechende Meßstationen beziehen. Der Raumbezug der Daten wird zunächst nur über die geographischen Koordinaten der jeweiligen Station hergestellt, die für ihre Integration in das bestehende GIS in Gauß-Krüger-Koordinaten überführt wurden.

Die Datenbank-Tabellen wurde so strukturiert, daß für jede Meßstation alle meteorologischen Parameter für jeden beliebigen Kalendertag abrufbar waren.

Um überprüfen zu können, inwiefern die Niederschlagssummen mehrerer Tage vor einer ERS-Überfliegung als witterungsbedingtes Feuchtemaß einen Einfluß auf das Radarrückstreuverhalten ausüben, fand eine Aufsummierung der täglichen Niederschlagshöhen rückschreitend von den jeweiligen ERS-Überfliegungstagen bis zu 9 Vortagen statt.

Erzeugung kontinuierlicher Flächendaten

Damit die kurzfristigen Wettereinflüsse wie Niederschlag, Windstärke, Windrichtung, etc. zum Zeitpunkt der ERS-Aufnahmen auf einzelnen Schlägen rekonstruiert werden konnten, mußten aus den Punktdaten kontinuierliche Flächendaten erzeugt werden. Hierzu wurden in Abhängigkeit der Meßnetzdicke der zu interpolierenden Datensätze zwei räumliche Interpolationsverfahren angewandt:

- Die Parameter Lufttemperatur, Luftfeuchte und Wolkenbedeckungsgrad, die sich auf das Klimastationsmeßnetz bezogen, wurden nach der *Nearest-Neighbor* Methode interpoliert, ein Verfahren, das auf der Erzeugung von Thiessen-Polygonen (Dirichlet /Voronoi-Polygonen) basiert (BURROUGH & MCDONNELL 1998). Die Anwendung des Thiessen-Polygon-Verfahrens impliziert die Annahme, daß die meteorologischen Daten eines beliebigen Punktes denen der nächstgelegenen Klimastation entsprechen. Der Einsatz dieses einfachen deterministischen Interpolationsverfahrens ist daher nur bei Parametern zu rechtfertigen, die durch eine geringe räumliche Variabilität gekennzeichnet sind. Die offensichtlichen Nachteile dieser Methode sind die fehlende Variabilität innerhalb der Polygone. Graduelle Übergänge können daher nicht dargestellt werden.
- Die Niederschlagsdaten konnte aufgrund der größeren Meßnetzdichte mit Hilfe der geostatistischen Kriging-Methode interpoliert werden. Auf die Grundlagen der angewandten Geostatistik soll in diesem Zusammenhang nicht näher eingegangen werden. Hierzu sei auf einschlägige Literatur verwiesen (BURROUGH & MCDONNELL 1998; ISAACS & SRIVASTAVA 1989; HEINE 1986; OLIVER & WEBSTER 1990; VAREKAMP et al. 1996).

Die Ausgabe und Weiterverarbeitung der Daten erfolgt im Rasterzellenformat (GRID).

Ableitung schlagbezogener meteorologischer Kennwerte

Nach der Interpolation der Punktdaten wurden die kontinuierlichen Flächendaten mit den Polygonen der Schlaggrenzen überlagert. Aus den von den Polygongrenzen eingeschlossenen Bildelementen wurden deskriptive statistische Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Minimum, Maximum und Modalwert) extrahiert.

Diese sogenannte *Zonal-Attribute*-Funktion ist standardmäßiger Bestandteil des Vektormoduls von ERDAS *Imagine*TM.

Abb. 6-8 dokumentiert die GIS-Verarbeitungsschritte vom Import der Rohdaten bis zur Zuweisung von statistischen Kennwerten für einzelne Schläge am Beispiel von Niederschlagsdaten. Eine analoge Vorgehensweise zur Extraktion schlagbezogener Kennwerte wurde für die in Tab. 6-9 genannten Parameter der Klimastationen praktiziert.

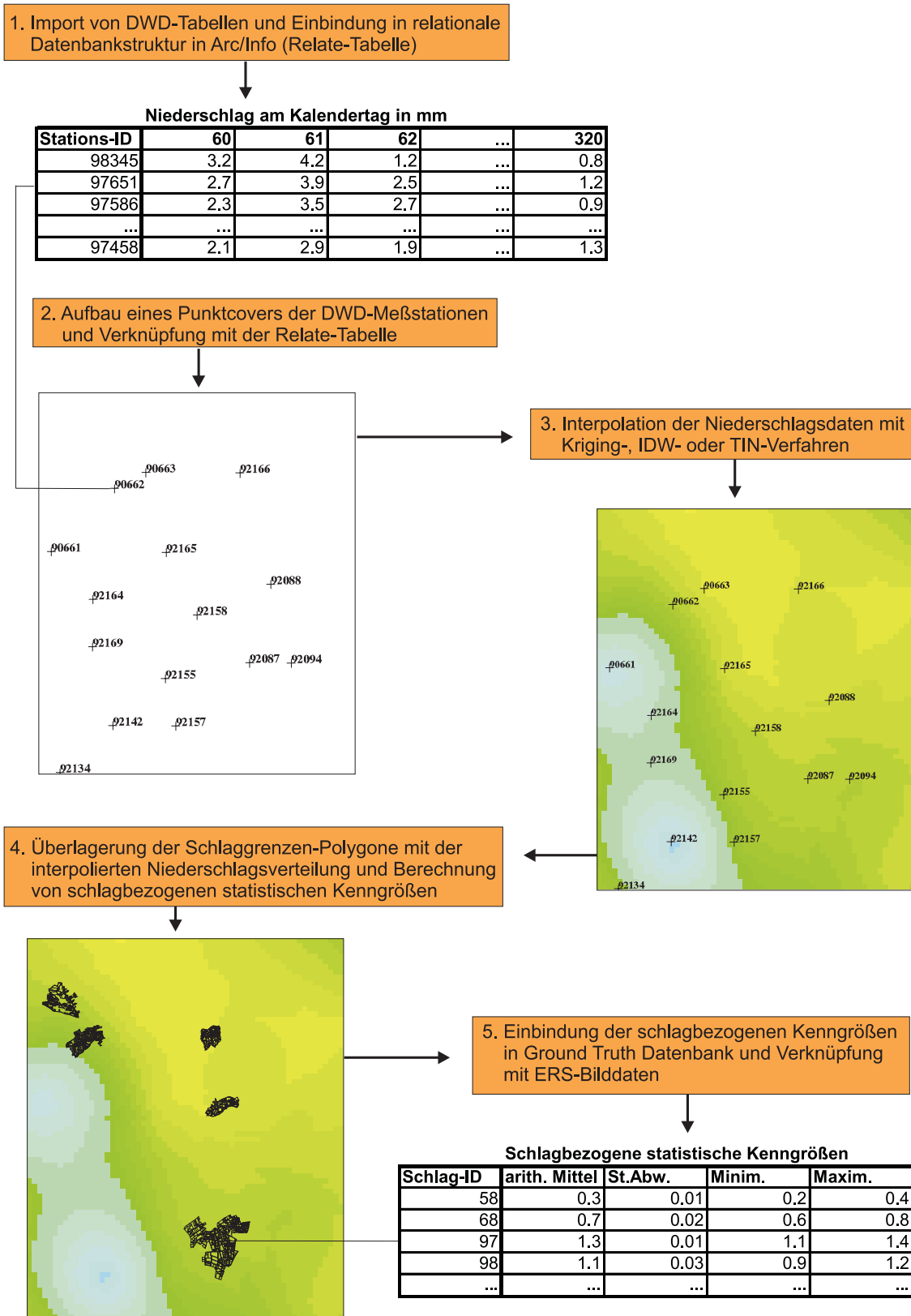


Abb. 6-8: GIS-Verarbeitungsschritte zur Ableitung schlagbezogener statistischer Niederschlagskennwerte

6.2.4 Phänologische Daten

Da das Untersuchungsgebiet mehrere naturräumliche Einheiten und Agrarregionen mit spezifischen klimatischen Eigenschaften umfaßt, wurden zu ihrer Beschreibung auch phänologische Daten ausgewertet.

Als Grundlage dienten die phänologischen Daten aus dem Klimaatlas von Bayern (1996) sowie Daten der Bayerischen Landesanstalt für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur (BayLBA). Die Rohdaten bestanden aus phänologischen Eintrittsterminen zur Aussaat, Ernte, Rapsblüte, zum Auflaufen, Ährenschieben, Fahnenschieben und Reihenschluß. Die Daten umfaßten neun Fruchtarten: Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Hafer, Winterraps, Winterroggen, Silomais, Körnermais und Zuckerrübe. Der Raumbezug der Daten wurde über die Gemeindegrenzen hergestellt, die im ATKIS500¹ zur Verfügung standen. Übergeordnete räumliche Bezugsebenen stellten Erzeuger- und Agrargebiete dar. Insgesamt konnten 3600 Datensätze ausgewertet werden, die sich auf eine Periode von 1980-1996 bezogen.

Tab. 6-10 zeigt einen Auszug des unaufbereiteten Datensatzes der importierten phänologischen Daten.

Tab. 6-10: Phänologische Daten zu zehn Hauptfruchtarten, differenziert nach Gemeindegebieten (Periode 1980-1996) (mittlere Kalendertage)

Gemeinde	Erz. Gebiet	LK	Jahr	Frucht	AS	AL	ER	ÄS	RB	MF	RS
Altomünster	THL Nord	DAH	1988	WW	311	325	228	162			
Röhrmoos	THL Nord	DAH	1987	WW	311	323	227	161			
Röhrmoos	THL Nord	DAH	1988	WW	289	305	229	171			
Altomünster	THL Nord	DAH	1988	WW	290	302	221	155			
Hohenwart	THL Nord	PAF	1984	WG	265	274	207	138			
Bergkirchen	NMS	DAH	1986	SG	89	102	224	165			
Bergkirchen	NMS	DAH	1986	SG	79	96	232	170			
Erdweg	THL Nord	DAH	1987	RA	233	253	197		135		
Sulzmoos	THL Nord	DAH	1986	RA	232	241	210		128		
Kranzberg	THL Nord	FS	1985	ZR	89	101	299				171
...
Kranzberg	THL Nord	FS	1987	MA	121	136	298			228	

LK: Landkreis; DAH: Dachau; PAF: Pfaffenhofen; FS: Freising; AS: Aussaat; AL: Auflaufen; ER: Ernte; ÄS: Ährenschieben; RB: Rapsblüte; MF: Mais Fahnenschieben; RS: Reihenschluß

Da sich die phänologischen Daten auf administrative Einheiten (Gemeinden) beziehen und daher geländeökologische Standortbedingungen nicht differenzieren, wurde auf eine GIS-technische Weiterverarbeitung der Daten verzichtet.

Statistische Auswertungen (Mittelwertvergleiche) bezüglich der räumlichen Stratifizierung phänologischer Ereignisse ergaben jedoch, daß z.B. das mittlere Datum des Auflaufens und

¹ Amtlichen Topographisch-Kartographisches Informationssystem 1 : 500 000 des BayLVA.

Ährenschiebens von Winterweizen in der Münchener Schotterebene und den angrenzenden Moorebenen gegenüber dem Tertiärhügelland signifikant um 10 Tage früher einsetzt.

Die phänologischen Daten stellen daher eine wichtige Entscheidungsgrundlage zur Abgrenzung und Einteilung des Untersuchungsgebietes in naturräumliche Einheiten dar.

6.2.5 Bodendaten

Aufgrund der Bedeutung der direkten und indirekten Einflüsse des Bodens auf die Radar-rückstreuung wurden verfügbare Bodeninformationen zur Interpretation der ERS-Daten herangezogen. Ziel der Bodendatenintegration war, analog zu den meteorologischen Daten, die bestehende schlagbezogene Datenbank durch entsprechende Bodenkennwerte zu ergänzen.

Für das Untersuchungsgebiet stand eine digitale Bodenkarte im Maßstab 1 : 50 000 vom Bayerischen Geologischen Landesamt (BayGLA) zur Verfügung. Die Beschreibung der Bodeneinheiten war in analogen Erläuterungsbänden der entsprechenden Kartenblätter und dem Datenhandbuch für die Böden des Tertiärhügellandes dokumentiert (SCHMIDT et al. 1992; FETZER et al. 1986).

Aufbau der Bodendatenbank

Zur Integration dieser Informationsquellen in das GIS wurde ein einfaches Bodeninformationssystem auf der Grundlage der verfügbaren digitalen Geometrien aufgebaut. Hierzu wurden die nach Bodenhorizonten differenzierten analogen Daten digitalisiert und in zweidimensionale relationale Tabellen abgelegt. Der Geometriebezug fand anhand der Bodeneinheitskennziffer statt. Unter der Annahme, daß ausschließlich die Eigenschaften des Oberbodens Einflüsse auf das Radarsignal ausüben können, wurden lediglich Daten des obersten Horizontes (in der Regel Ap- oder Ah-Horizont) in die Bodendatenbank aufgenommen.

Tab. 6-11 zeigt einen Auszug aus der aufgebauten relationalen Bodendatenbank.

Tab. 6-11: Auszug aus der relationalen Bodendatenbank des Bodeninformationssystems

Leg. Nr.	HM (cm)	C (%)	Korngrößenverteilung (Gew. % des Feinbodens)							X (%)	Porenraumverteilung (%)				TRG (g/cm ³)
			T	fU	mU	gU	fS	mS	gS		LK	nFK	FK	GPV	
18a	Ackerpararendzina aus carbonatreichem Schotter														
	23	1.1	27.8	8.1	12.0	12.8	16.3	13.4	9.6	28.0	8.7	12.8	37.3	46.0	1.41
21	Pararendzina, sehr humusreich, aus carbonatreichem Schotter														
	15	7.0	23.3	8.7	15.5	17.3	13.4	15.3	6.5	17.0	8.9	26.4	46.1	55.0	1.15
45a	Braunerde aus kiesreichem Molassematerial														
	25	1.4	6.7	4.8	7.2	8.9	29.0	35.3	8.1	25.0	19.5	14.7	21.5	40.9	1.57
etc.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

HM: Horizontmächtigkeit des Ap- bzw. Ah-Horizontes; C: organische Substanz; X: Bodenskelett in Gew.-% des Gesamtbodens; TRG: Trockenraumgewicht; LK: Luftkapazität; nFK: nutzbare Feldkapazität; FK: Feldkapazität; GPV: Gesamtporenvolumen

Insgesamt werden im Untersuchungsgebiet 67 verschiedene Bodeneinheiten anhand der Konzeptbodenkarte 1 : 50 000 unterschieden. Ferner wurde eine Generalisierung der Bodenkarte auf der Grundlage von sechs Hauptbodenarten (*sandig und gering humos - sandig und humos - lehmig und gering humos - lehmig und sehr humos - lehmig und hoher Steingehalt - organische Böden*) vorgenommen.

Ableitung schlagbezogener Bodenkennwerte

Im Gegensatz zu den meteorologischen und reliefbezogenen Kennwerten erfolgte die Ableitung schlagbezogener Bodenkennwerte auf Vektordatenbasis.

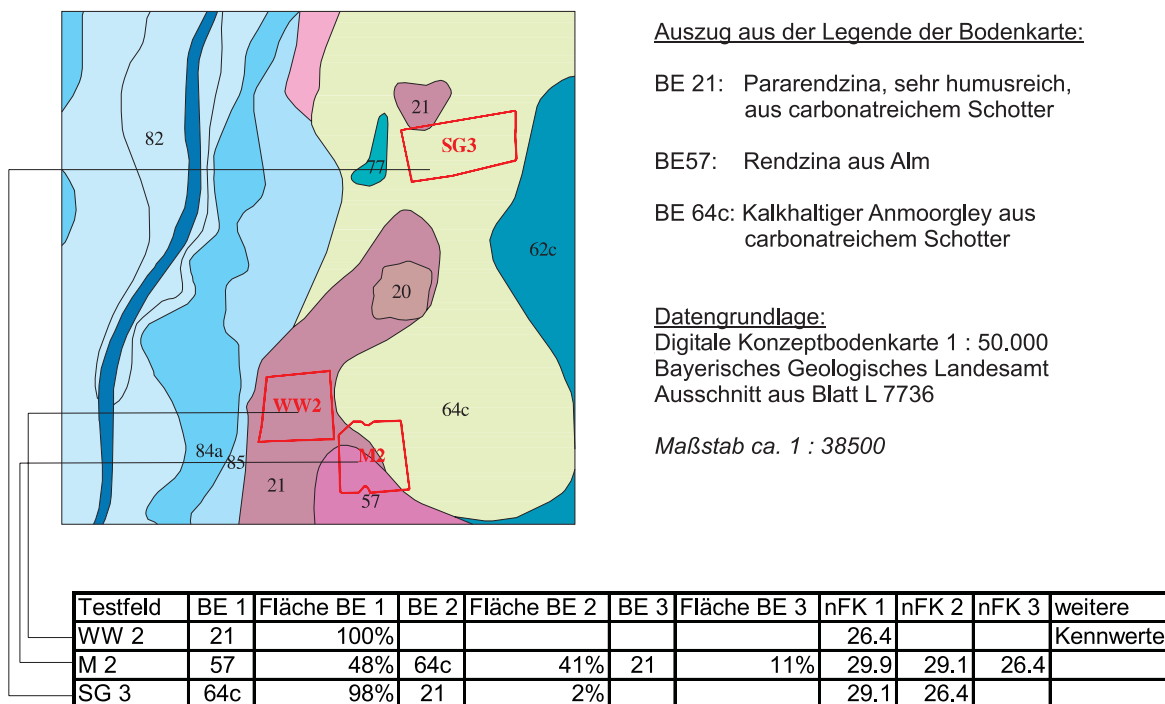


Abb. 6-9: Zuweisung von flächenanteilig gewichteten Bodenkennwerten nach vektorieller Verschneidung von Bodenkarte und Schlaggrenzen-Polygonen

Hierzu wurden die vektoriell vorliegenden Bodendaten mit den Polygonen der Schlaggrenzen räumlich überlagert. Aus dem Ergebnis der Vektor-Verschneidung ergaben sich prozentuale Anteile der eingeschlossenen Bodeneinheiten je Schlag (Abb. 6-9). Die schlagbezogenen Bodenkennwerte wurden entsprechend ihres Flächenanteils mit Hilfe des gewichteten arithmetrischen Mittels bestimmt und in die Datenbank integriert.

Die Ergebnisse dieser Verschneidung bestätigten auch Geländebeobachtungen, die zeigten, daß aufgrund der kleinräumig strukturierten pedogenen Verhältnisse schlaginterne Bodenheterogenitäten - vor allem im Tertiärhügelland - häufig anzutreffen sind.

7 Zeitreihenanalyse der Radarrückstreuung

Der temporale Verlauf der Radarrückstreuquerschnitte landwirtschaftlicher Kulturen unterliegt saisonalen Variationen, die mit der phänologischen Entwicklung der Pflanzen in Verbindung gebracht werden können. Obwohl die unterschiedlichen Muster der Zeitreihenprofile landwirtschaftlicher Kulturen qualitativ interpretierbar erscheinen (WOODING et al. 1995), sind quantitative Aussagen zu den beobachteten räumlichen sowie zeitlichen Variabilitäten nur sehr eingeschränkt möglich (SAICH & BORGEAUD 1998). Unter räumlicher Variabilität sind Unterschiede zwischen den Schlägen einer Fruchtart zu einem ERS-Aufnahmeterrain zu verstehen, die häufig auf Sorten-, Vitalitäts- oder Biomasseunterschiede zurückzuführen sind. Zeitliche Variabilitäten treten sowohl im Verlaufe einer Vegetationsperiode auf, als auch zwischen den Verläufen mehrerer Jahre. Unter der Annahme, daß die zeitlichen Variationen der Rückstreuung hauptsächlich während einer Vegetationsperiode durch Veränderungen der Struktur bzw. Geometrie und des Wassergehaltes des Pflanzenbestandes hervorgerufen werden, stellen sie das größte Informationspotential zur Trennung und damit Klassifizierung verschiedener Kulturarten dar. Räumliche und interannuelle Variabilitäten hingegen geben Anlaß zur Vermutung, daß eine Reihe von Störeinflüssen das multitemporale ERS-Signal überlagern. Diese Störeinflüsse können systemimmanent sein und beispielsweise durch die Stabilität des Aufnahmesystems, durch die Kalibrierengenauigkeit oder durch orbitale Effekte (BAN & HOWARTH 1997) hervorgerufen werden. Die Anzahl der natürlichen, umweltbedingten Einfüsse, die zur Erhöhung der Variabilität beitragen, kann sehr groß sein und spiegelt die ganze Komplexität des Systems Atmosphäre-Pflanze-Boden wider. Häufig sind es lokale Unterschiede des Bodens (Bodenbearbeitung, Bodenart, etc.), lokale kurzzeitliche meteorologische Differenzen (Niederschlag, Wind, Temperatur, Taubenetzung, etc.), regionale klimabedingte Unterschiede der Pflanzenentwicklung oder anthropogene Effekte (Sortenwahl, Aussattermine, Beregnung, etc.). Da eine synoptische Analyse all dieser Einflüsse eine unpraktikable Vielzahl von Zusatzinformationen voraussetzen würde, beschränken sich die nachfolgenden Untersuchungen der fruchtartenspezifischen SAR-Zeitprofile auf einfache deskriptive Methoden.

Eine der grundlegenden Voraussetzungen für den routinemäßigen Einsatz von SAR-Daten zur Erfassung der Arteninventare und zum Monitoring landwirtschaftlicher Kulturen ist die interannuelle Stabilität bzw. Robustheit kulturartenspezifischer Signaturen¹ in Abhängigkeit der Zeit. Trennbarkeitskriterien zwischen einzelnen Kulturarten sind daher sowohl über räumliche, d.h. Schlag-zu-Schlag-Variationen, als auch zeitliche Variationen von Jahr zu Jahr zu definieren. Ziel des interannuellen Vergleichs der multitemporalen Radarsignaturen ist es, ein von äußeren Störeffekten und Singularitäten bereinigtes, charakteristisches Zeitprofil der Radarsignaturen einzelner Kulturarten zu extrahieren. Um verallgemeinernde

¹ Als Signatur werden die Charakteristika bezeichnet, durch die ein Objekt (in diesem Fall ein landwirtschaftlicher Schlag) in einem Bild identifiziert werden kann (DIN 18716-3, 1997).

Aussagen zur Robustheit der Zeitprofile und Trennbarkeit verschiedener Kulturarten zu ermöglichen, werden deshalb folgende Aspekte überprüft:

- Räumliche Variabilität zwischen Rückstreuquerschnitten verschiedener Schläge der gleichen Kulturart eines Untersuchungsjahres,
- Aufzeigen von Zeitfenstern, in denen unter Berücksichtigung der räumlichen Variabilität verschiedene Kulturarten zu differenzieren sind,
- Analyse der interannuellen Stabilität der Zeitprofile.

Zur Prüfung dieser Voraussetzungen dienen mittlere σ^0 -Werte einzelner Schläge der Zeitreihen 1996-1998. Zur Verringerung von Randeffekten wurden die Polygone mit einer Pufferdistanz von 20 m verkleinert. Schläge mit weniger als 10 SAR-Pixeln (ca. 1 ha) werden von den Untersuchungen ausgeschlossen. Damit verbleiben insgesamt für

- 1996: 25 Schläge von fünf Fruchtarten WW, WG, MA, KA und ZR (Meßkampagne),
- 1997: 311 Schläge von 15 Kulturarten (Meß- und Boniturkampagne),
- 1998: 341 Schläge von 16 Kulturarten (Meß- und Boniturkampagne).

Zur Untersuchung der räumlichen Variabilität wird darüber hinaus auf Daten von Anbaugebieten in Thüringen, Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg zurückgegriffen, die im Rahmen von EMAP erhoben wurden.

Die phänologischen Entwicklungsstadien (EC-Stadien) sind im dezimalen System der erweiterten BBCH-Skala (STAUB et al. 1994) angegeben.

7.1 Temporaler Verlauf der Radarrückstreuung landwirtschaftlicher Kulturen

Winterweizen

In Abb. 7-1 sind die zeitlichen Veränderungen der mittleren Rückstreuquerschnitte von 65 Winterweizenschlägen des Jahres 1998 im Zusammenhang mit den charakteristischen Pflanzenentwicklungsstadien dargestellt.

Das Zeitprofil des Winterweizens (WW) zeigt einen deutlich ausgeprägten Trog mit Beginn des Schossens (EC 32-33), das in diesem Jahr sehr einheitlich im Untersuchungsgebiet Mitte Mai eingesetzt hat. Bis zu diesem Zeitpunkt erfährt das rückgestreute Signal eine zunehmende Dämpfung mit aufkommender Biomasse und Bestandesvolumen. Bis zur Blüte bzw. Beginn der Fruchtbildung des Weizens Ende Juni (EC 65-72) steigt die Rückstreuung nur minimal um etwa 1 bis 1,5 dB an. Dieser Phase folgt eine stärkere Zunahme des rückgestreuten Signals während der Kornfüllung bis zur Vollreife Ende Juli. Damit ist im Vergleich zur Wintergerste kein eindeutiges absolutes Minimum gegeben, das mit einem bestimmten Wachstumsstadium assoziiert ist. Der genaue Zeitpunkt, ab dem die Rückstreuintensität tatsächlich wieder ansteigt, läßt sich auch aufgrund des zeitlichen Abstandes von 17 bzw. 35 Tagen der Überfliegungen nicht bestimmen. Allgemein kann als

Ursache für den Wiederanstieg der Rückstreuung aller Getreidearten mit zunehmender Abreife der abnehmende Pflanzenwassergehalt und Bodenbedeckungsgrad betrachtet werden. Dadurch kann das Radarsignal wieder bis zum Boden durchdringen und von dort reflektiert werden (ULABY & BUSH 1976).

Auffallend unveränderlich stellt sich die Rückstreuintensität nach der Ernte dar, die Anfang/Mitte August stattgefunden hat, bevor im Herbst das hohe Frühjahrs-Ausgangsniveau der Rückstreuung von -5,5 bis -6 dB wieder erreicht wird, was auf die allgemeine Zunahme der Bodenfeuchte zurückzuführen ist und durch die Niederschlagsdaten bestätigt werden kann.

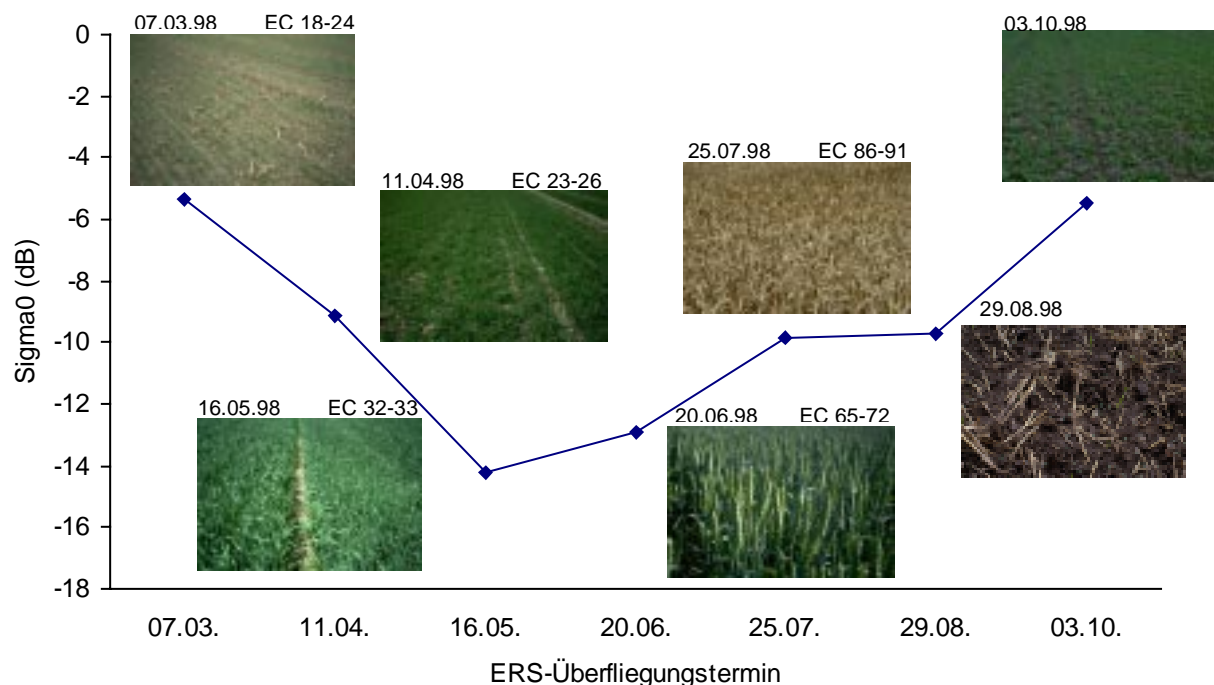


Abb. 7-1: Zeitlicher Verlauf der mittleren Radarrückstreuung Sigma0 in Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung auf Basis von 65 Winterweizenschlägen des Jahres 1998

Die Zeitprofile der einzelnen Weizenschläge zeigen einen einheitlichen Trend. Dennoch betragen die Standardabweichungen zwischen dem Mai- und dem Augusttermin 1,2 bis 1,3 dB. Lediglich während des März- und Oktobertermins sind mit 1,5 bzw. 1,6 dB etwas höhere Standardabweichungen festzustellen. Dies kann dadurch erklärt werden, daß zu Beginn der Vegetationsperiode noch große Unterschiede in der Pflanzenbedeckung auftreten. Höhere Streuungen während des Oktobertermins sind in erster Linie auf unterschiedliche Bodenbearbeitungsmaßnahmen und daraus resultierenden Bodenrauhigkeiten zurückzuführen. Im allgemeinen kann die Variation der Radarrückstreuung zwischen Schlägen gleicher Fruchtart zahlreiche Ursachen haben, die nur schwer statistisch abgesichert zu isolieren sind. Beispielsweise verursacht Lagerbildung bei Getreide - ein lokal sehr unterschiedlich auftretendes Phänomen am Ende der Vegetationsperiode - höhere Rückstreuintensitäten, was auch in Untersuchungen von WOODING et al. (1993) beobachtet werden konnte.

Wintergerste

Das mittlere Zeitprofil von Wintergerste (WG) zeigt im Vergleich zum Winterweizen gewisse Ähnlichkeiten. Auch hier ist ein ausgeprägtes Absorptionsmaximum Mitte Mai zu beobachten, was aufgrund der weiterentwickelten Phänologie der Wintergerste mit dem EC-Stadium des Ährenschiebens bzw. Blütenbeginns assoziiert ist. Im Gegensatz zum Weizen ist der Gradient der Signaldämpfung bis zum Erreichen des Minimums jedoch deutlich steiler. Ferner beträgt das Absorptionsminimum von Wintergerste etwa 2 dB weniger als das des Weizens. Ein weiterer signifikanter Unterschied zum Weizen besteht im Wiederanstieg der Rückstreuung zwischen Blütebeginn und Samenreife (Teig-/Gelbreife), der bei der Wintergerste sehr viel ausgeprägter ist und ein Niveau von -6 dB erreicht (Abb. 7-2).

Nahezu konstant verhält sich die Rückstreuung dann zwischen dem letzten Termin vor der Ernte und dem ersten Termin nach der Ernte. Es muß daher davon ausgegangen werden, daß die abreifende Biomasse vor der Ernte das Rückstreusignal kaum verändert und der Bodenanteil am Gesamtsignal bereits wieder zunimmt. Daraus ergibt sich, daß selbst bei einer deutlichen Verdichtung der Zeitreihe der Erntezeitpunkt der beiden Wintergetreide mit Hilfe der ERS SAR-Daten nicht detektiert werden kann. Im anschließenden direkten Vergleich der häufigsten Getreidearten im Untersuchungsgebiet werden weitere Differenzen deutlich.

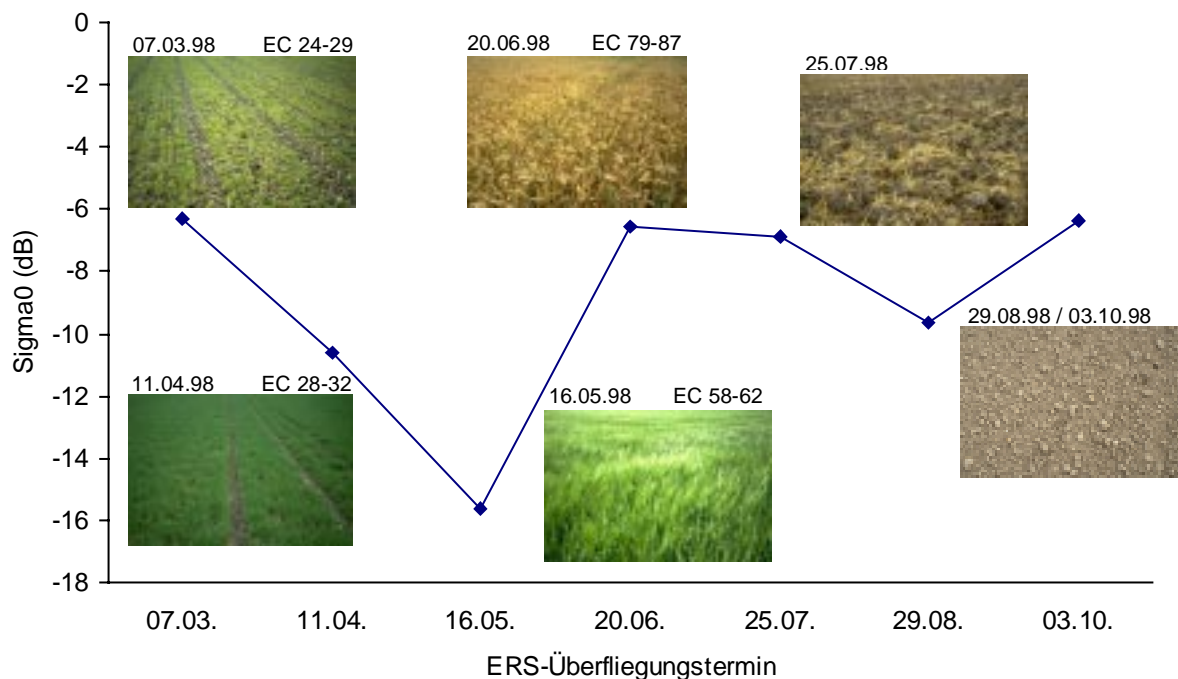


Abb. 7-2: Zeitlicher Verlauf der mittleren Radarrückstreuung Sigma0 in Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung auf Basis von 36 Wintergersteseschlägen des Jahres 1998

Die Zwischenschlagvariabilität bei Wintergerste ist allgemein höher als die des Weizens und beträgt zwischen 1,10 und 1,79 dB während der Hauptvegetationsperiode von April

bis Juli. Größere Streuungen von über 2 dB treten auch hier nur des März- bzw. Oktobertermins auf, was auf ähnliche Ursachen wie beim Weizen zurückzuführen ist.

Sommergerste

Das Zeitprofil der im Untersuchungsgebiet weit verbreiteten Sommergerste (SG) - in der Regel Braugerste - ist durch einen wesentlich geringeren Dynamikbereich gekennzeichnet (Abb. 7-3). Im Gegensatz zu den beiden Wintergetreidearten wird die Radarrückstreuung im Mai deutlich schwächer gedämpft und erreicht im Juni zum Ende der Blüte (EC 69) bzw. Beginn der Fruchtbildung (EC 76) bei ca. -12,5 dB ihr Absorptionsmaximum. Die Daten der drei Meßjahre zeigen ferner, daß die Rückstreuintensität nur bis zu den Wachstumsstadien Teigreife/Gelbreife ansteigt und zum Zeitpunkt der Totreife noch einmal sinkt. Dieses Phänomen war auch bei den anderen Getreidearten zu beobachten.

Zu den Aufnahmetermiinen zwischen Beginn des Schossens (Haupttrieb) und der Ernte bestehen zwischen den Sommergersteslägen niedrige Standardabweichungen von 0,58 bis 1,19 dB.

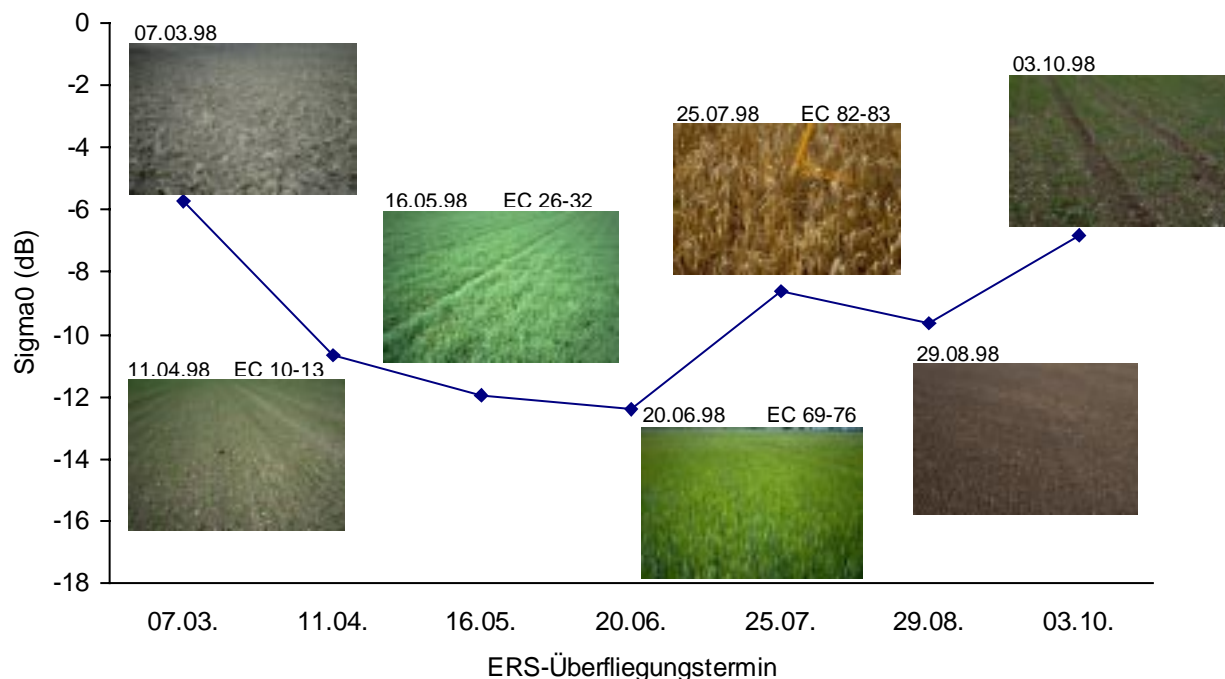


Abb. 7-3: Zeitlicher Verlauf der mittleren Radarrückstreuung Sigma0 in Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung auf Basis von 36 Sommergersteslägen des Jahres 1998

Weitere Getreidearten wie Roggen, Triticale, Hafer und Sommerweizen, die aufgrund ihres Flächenanteils im Untersuchungsgebiet von untergeordneter Bedeutung sind, weichen in ihren Zeitprofilen nur geringfügig von den untersuchten Getreidearten ab. Eine Trennung aufgrund der Rückstreusignaturen erscheint daher ausgeschlossen.

Allgemein kann somit für Getreide festgehalten werden, daß die Radarrückstreuung als Funktion der Zeit einen typischen Verlauf aufweist, der durch vier mehr oder weniger stark ausgeprägte Charakteristika beschrieben werden kann:

1. Hohe Rückstreuintensitäten zu Beginn der Vegetationsperiode, assoziiert mit geringen Pflanzenbedeckungsgraden.
2. Dämpfung der Rückstreuung mit aufkommender Vegetation bis zu einem Absorptionsmaximum, das in Abhängigkeit von der Getreideart unterschiedlich stark betont und in der Reihenfolge der Abreife der Getreidearten zeitlich verschoben ist.
3. Anstieg der Rückstreuung während der Kornfüllungs- bzw. Reifephase.
4. Weiterer, meist steilerer Anstieg nach der Ernte.

Winterraps

Winterraps (RA) besitzt ein nicht ganz so signifikant ausgeprägtes Zeitprofil wie die betrachteten Getreidearten. Dennoch kann ein eindeutiges Minimum der Rückstreuung während der Blütephase beobachtet werden, dem ein Anstieg von ca. 4 dB während der Fruchtbildung folgt (Abb. 7-4).

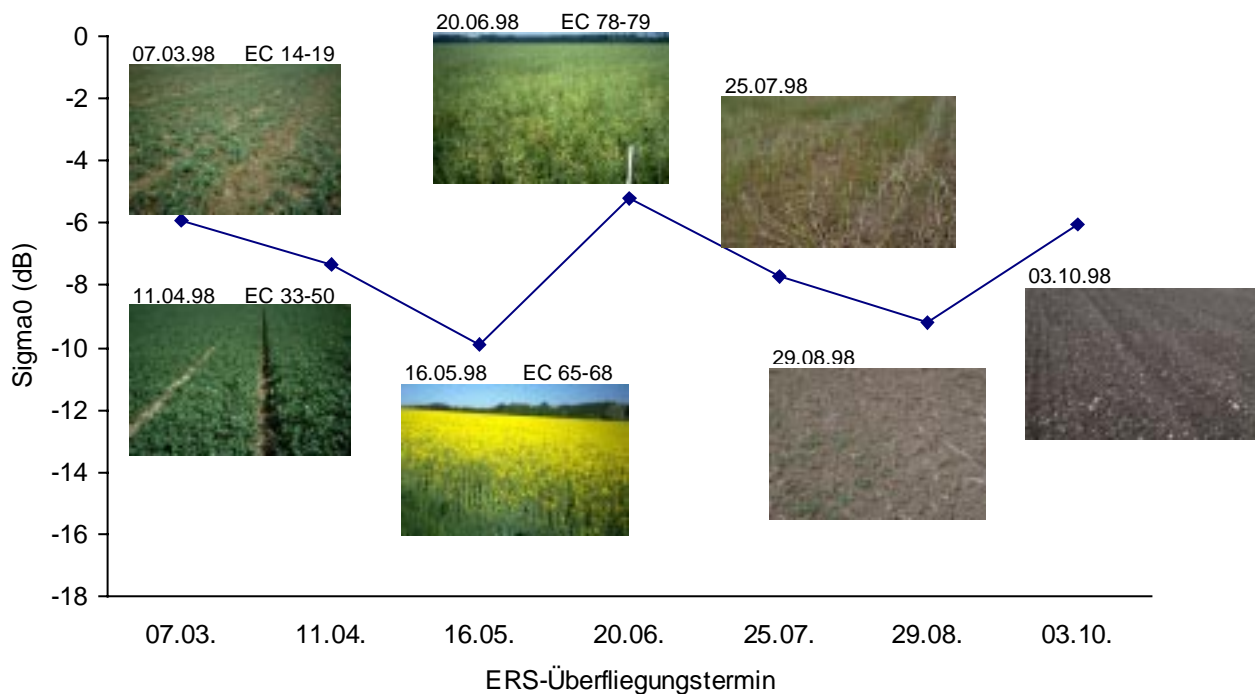


Abb. 7-4: Zeitlicher Verlauf der mittleren Radarrückstreuung Sigma0 in Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung auf Basis von 16 Winterrapsschlägen des Jahres 1998

Die maximale Rückstreuung tritt auf, wenn die Schoten ihre art- bzw. sortenspezifische Größe erreicht haben (EC 78-79). Zu diesem Zeitpunkt ist bei Winterweizen ein Rückstreuminimum zu beobachten. Winterraps weist im Vergleich zu Winterweizen und Win-

tergerste zu allen Terminen höhere Rückstreuwerte auf. Die hohen Rückstreuintensitäten im Spätsommer und Herbst (nach der Ernte) sind in der Regel mit starker Bodenrauigkeit assoziiert. Die Streuungen zwischen den einzelnen Schlägen kann bis zur Ernte als sehr gering bezeichnet werden ($s < 1$ dB). Erst nach der Ernte nimmt die Zwischenschlagvarianz erwartungsgemäß aufgrund unterschiedlicher Bodenbearbeitungsmaßnahmen wieder zu.

Insgesamt weist die Rückstreuung von Raps über die gesamte Vegetationsperiode eine Schwankungsbreite von nur 4 dB auf, was die Möglichkeit einer Zustandsbeschreibung auf Grundlage des ERS-Signals einschränkt. Die geringe zeitliche Dynamik des mittleren Rückstreusignals wird auch durch die Ergebnissen der Untersuchungen in den anderen drei EMAP-Testgebieten bestätigt (KÜHBAUCH et al. 1999).

Mais

Der zeitliche Verlauf der Radarrückstreuung von Mais (MA) kann grob in zwei Hälften eingeteilt werden: Bis zum Reihenschluß (EC 31-35) ist ein ähnlicher Trend wie bei Getreide festzustellen, jedoch bei deutlich höheren absoluten Rückstreuwerten (Abb. 7-5).

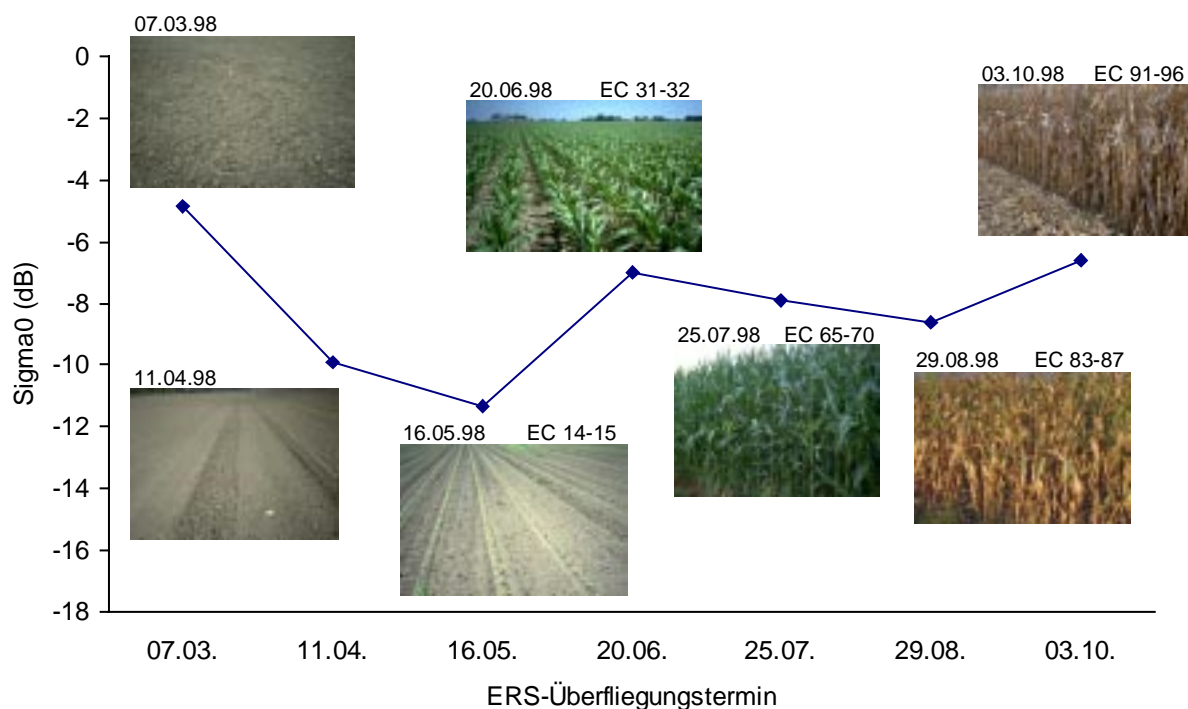


Abb. 7-5: Zeitlicher Verlauf der mittleren Radarrückstreuung Sigma0 in Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung auf Basis von 60 Maisschlägen des Jahres 1998

Nach Reihenschluß, wenn die Blätter benachbarter Saatreihen sich berühren und der Boden weitgehend bedeckt ist, verharrt das rückgestreute Signal auf einem nahezu konstant ho-

hem Niveau von ca. -8 dB. Erst kurz vor der Ernte ist ein leichter Anstieg der Rückstreuung zu beobachten.

Die Zwischenschlagvariabilität s ist allgemein etwas höher als bei anderen Fruchtarten ($1,27 < s < 2,03$ dB), was vermutlich auf Reihenrichtungseffekte (s. Kap. 9.3.6) zurückgeführt werden kann. Die größten Streuungen zwischen den einzelnen Schlägen treten am Ende der Vegetationsperiode auf, wenn ein Teil der Maisschläge bereits abgeerntet sind (Silomais) und die Ernte von Körnermais erst einige Zeit später erfolgt. Die abgeernteten Schläge weisen dabei ein um ca. 3 dB höheres Rückstreusignal auf.

Kartoffel

Mit einer mittleren Schwankungsbreite von etwa 4 dB sind die zeitlichen Variationen der Radarrückstreckoeffizienten von Kartoffelschlägen (KA) wesentlich geringer als bei Getreide (Abb. 7-6).

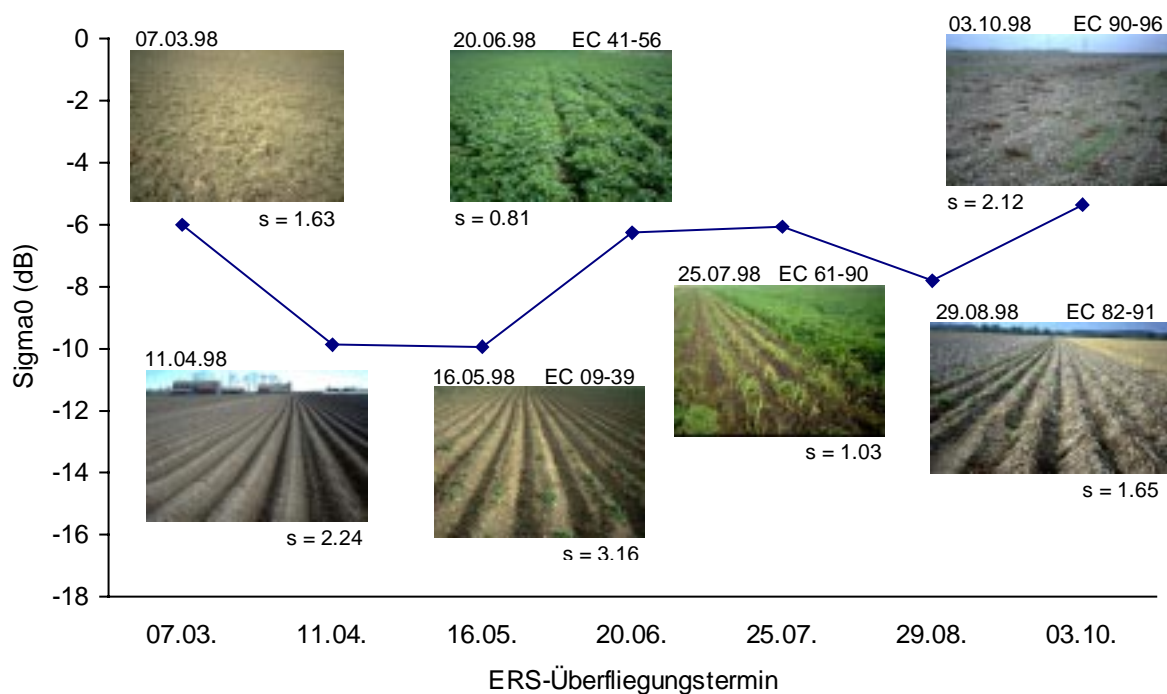


Abb. 7-6: Zeitlicher Verlauf der mittleren Radarrückstreuung Σ_0 in Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung auf Basis von 39 Kartoffelschlägen des Jahres 1998

Als bemerkenswert kann jedoch die zeitliche Veränderung der Zwischenschlagvariabilität s betrachtet werden: So findet ein signifikanter Anstieg der Standardabweichung zwischen dem März-/ April- und dem April-/Mai-Termin statt, nachdem die Kartoffeldämme präpariert sind. Grund dafür sind unterschiedliche Orientierungen der Dämme zum ERS-Sensor und Unterschiede in ihrer Geometrie (insbesondere Höhe). Sobald der Pflanzenbestand Mitte Juni geschlossen ist (EC 41-56), verliert der Reihenrichtungseffekt an Bedeutung, und zwischen den Kartoffelschlägen sind nur noch sehr geringe Streuungen zu beobachten ($s = 0,81$). Ab Juli steigt die Zwischenschlagvariabilität wieder kontinuierlich an, da nun

Sortenunterschiede (z.B. Früh- und Spätkartoffel) zu unterschiedlichen Reife- und Erntestadien führen. Die Heterogenität von Kartoffelschlägen ist dann allgemein sehr hoch.

Zuckerrübe

Das mittlere Zeitprofil von Zuckerrüben (ZR) weist einen für Hackfrüchte typischen, ausgeglichenen Verlauf auf. Die Streubreite von σ^0 beträgt über die gesamte Vegetationsperiode ca. 6 dB. Es liegt eine Dämpfung der Rückstreuung im April vor, die jedoch nicht durch eine aufkommende Vegetationsbedeckung erklärt werden kann. Bis Ende Mai wird die Rückstreuung von Zuckerrüben ausschließlich von den Bodeneigenschaften bestimmt. Nach ihrem Reihenschluß Ende Juni/Anfang Juli erreicht die Rückstreuung ein Maximum und bleibt annähernd auf einem Niveau von ca. -6,5 dB (Abb. 7-7).

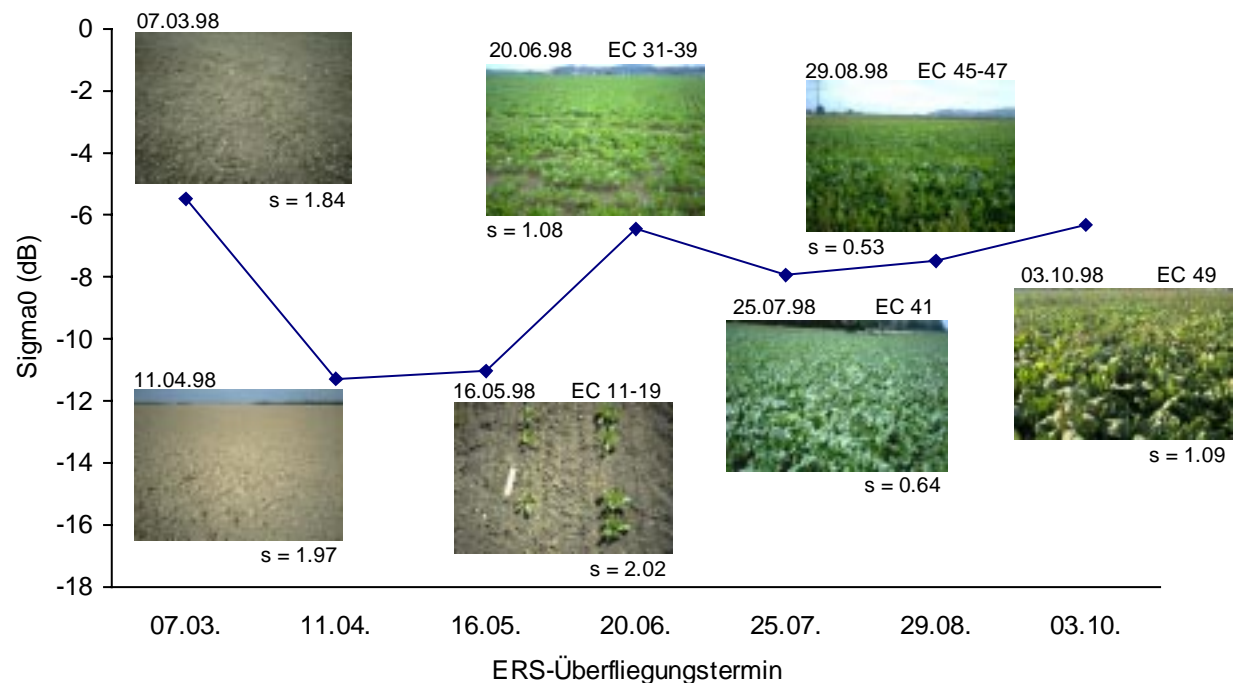


Abb. 7-7: Zeitlicher Verlauf der mittleren Radarrückstreuung Sigma0 in Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung auf Basis von 12 Zuckerrübenschlägen des Jahres 1998

Mögliche Ursache der relativ hohen Rückstreuung nach Erreichen des Reihenschlusses ist die planophile Orientierung der Blätter. Der weitere Aufbau unterirdischer Biomasse spiegelt sich im Signal nicht wider. Daß die Geometrie der Zuckerrübenpflanzen der dominierende Einflußfaktor auf die Rückstreuung ist, wird auch von GODDING et al. (1989) und GNOSA (1997) bestätigt. Befliegungen mit nicht abbildenden Scatterometern (C_{VV}) ergaben dabei ein gleichbleibendes hohes Niveau der Rückstreuung trotz weiteren Wachstums der Rüben. Erklärt wird dieses Phänomen mit der Geometrie der Rübenpflanzen: die vom Sensor abgestrahlte Energie wird zum Großteil von den im günstigen Winkel liegenden, d.h. planophil orientierten Rübenblättern direkt reflektiert.

Die Schwankungen der Rückstreuwerte zwischen den einzelnen Schlägen zum gleichen Aufnahmetermin sind relativ gering, obwohl die oberirdische Frischmasse stark variiert. Auch zum Ende der Vegetationsphase sind nur geringe Unterschiede in der Radarrückstreuung trotz hoher Ertragsunterschiede zu verzeichnen. Die beträchtlichen Ernteunterschiede (360 bis 620 dt/ha) spiegeln sich nicht entsprechend in den Rückstreuwerten wider.

Im Vergleich zur Kartoffel, sind auch die Veränderungen der Zwischenschlagvarianzen als Funktion der Zeit weniger stark ausgeprägt. Das Rückstreusignal von Zuckerrüben zeigt demnach geringere Abhängigkeit von der Saatreihenrichtung, als dies bei der Kartoffel zu beobachten ist. Dennoch erscheinen Zuckerrübenschläge nach Bestandesschluß deutlich homogener, wenn der Anteil des Bodens und seiner Heterogenität an der Gesamtrückstreuung abnimmt. Nach AUQUIERE et al. (1998) kann dieser Effekt auch anhand des mittleren Variationskoeffizienten innerhalb eines Schlages nachgewiesen werden, der mit Erreichen des Bestandesschlusses signifikant abnimmt.

7.2 Vergleich der Rückstreuzeitprofile zwischen den Kulturen

7.2.1 Getreide

Winterweizen, Wintergerste und Sommergerste umfassen im langjährigen Mittel insgesamt ca. 65% der ackerbaulich genutzten Fläche im Untersuchungsgebiet (eigene Erhebungen; BayLBA). Aufgrund dieses hohen Flächenanteils ist es von Bedeutung, inwiefern die Trennbarkeit zwischen den Getreidearten anhand ihrer Zeitprofile möglich ist.

In Abb. 7-8 sind die jeweiligen Zustände der Pflanzenentwicklung an fünf ERS-Überfliegungsterminen 1998 von beispielhaften Schlägen der drei häufigsten Getreidearten im Untersuchungsgebiet dargestellt. Der visuelle Eindruck von der Beziehung zwischen Radarrückstreuung und Pflanzenentwicklung kann wie folgt interpretiert werden:

Am 03. März befinden sich Weizenpflanzen in der Phase der Blattentwicklung. Der Boden wird mit weniger als 5% seiner Oberfläche von Pflanzen bedeckt, so daß die Rückstreuung fast ausschließlich von den Bodeneigenschaften Rauigkeit, Feuchte und Bodenart beeinflusst wird. Entsprechend stellt sich die Situation bei der Sommergerste dar, die in der Regel erst Ende März ausgesät wird. Beide Schläge sind durch relativ hohe σ^0 -Werte > -6 dB gekennzeichnet. Die Wintergerste, die bereits mehrere Bestockungstriebe hat, bedeckt den Boden schon zu etwa 10 bis 20%. Die resultierende Rückstreuung ist 1,8 bzw. 2,3 dB höher als bei WW bzw. SG.

Am 11. April ist beim WW der vierte Bestockungstrieb sichtbar. Die Bodenbedeckung beträgt nun etwa 20 bis 25%, und die Rückstreuung ist um fast 4 dB zurückgegangen. Um den gleichen Betrag hat sich auch die Rückstreuung von WG reduziert, die bereits zu 100% den Boden bedeckt und sich im Beginn des Längenwachstums (Schossen) befindet. Einen geringeren Rückgang von σ^0 verzeichnet die SG, die in der jetzigen Phase der Blattentwicklung nur spärlich den Boden bedeckt.














ERS-Überflug	Winterweizen (WW)	Wintergerste (WG)	Sommergerste (SG)
07.03.98	 EC 14 -5,75 dB	 EC 27 -7,57 dB	 EC 12 -8,22 dB
11.04.98	 EC 24 -9,64 dB	 EC 32 -11,62	 EC 12 -8,22 dB
16.05.98	 EC 32 -14,42 dB	 EC 60 -15,68 dB	 EC 28 -11,97 dB
20.06.98	 EC 69 -12,88 dB	 EC 83 -6,27 dB	 EC 71 -12,78 dB
25.07.98	 EC 87 -9,15 dB	 EC 89 -8,72 dB	 EC 89 -8,72 dB

Abb. 7-8: Vergleich der Radarrückstreuung und Pflanzenentwicklung zwischen Winterweizen, Wintergerste und Sommergerste 1998

Der 16. Mai stellt sowohl für WW als auch für WG das Minimum der Rückstreuung dar, das bei der Sommergerste erst einen Termin später erreicht wird. Der Unterschied der mittleren σ^0 -Werte beträgt 2,4 bzw. 3,7 dB. Auch unter Berücksichtigung der Zwischen-

schlagvarianzen ergibt sich damit Mitte Mai die Möglichkeit der Trennung von SG von den beiden Wintergetreiden (Abb. 7-9). Alle drei Getreidearten bedecken den Boden zu 100%. Die Geometrie der WG-Bestände ist jetzt durch noch mehr oder weniger senkrecht stehende Ähren charakterisiert. Die Blattstellung des WW ist im Gegensatz zur SG, deren Blätter gebogen sind, überwiegend schräg nach oben gestreckt.

Der 20. Juni ermöglicht aufgrund des starken Wiederanstiegs der Rückstreuung der WG ihre Diskriminierung gegenüber den beiden anderen Getreidearten, die einen um 6 dB geringeren Rückstreukoeffizienten aufweisen (Abb. 7-9). Auffallend hat sich die Oberflächengeometrie des WG-Bestandes geändert, die nun durch horizontal orientierte Ähren gekennzeichnet ist. Die SG hat in ihrer phänologischen Entwicklung den WW eingeholt. Beide Schläge haben eine fast identische Rückstreuung, obwohl die Ähre der SG im Gegensatz zur Weizenähre begrannt ist.

Am 25. Juli ist ein Wiederanstieg von σ^0 um 3,5 bis 4 dB auch beim Winterweizen und der Sommergerste zu beobachten, was mit einem Rückgang der frischen Biomasse assoziiert ist. WW ist meistens bis zur Ernte durch vertikal bzw. schräg nach oben gerichtete 9-13 cm lange Ähren charakterisiert, wohingegen die nur 4-6 cm langen Ähren der Sommergerste senkrecht nach unten weisen. Das Stoppelfeld der Wintergerste, die bereits schon seit zwei Wochen geerntet ist, zeigt eine kaum veränderte Rückstreuung im Vergleich zum Vorterrain.

Betrachtet man die Zeitprofile der gemittelten Radarrückstreuquerschnitte der drei Getreidearten am Beispiel der Daten von 1998 unter Berücksichtigung der Zwischenschlagvarianzen, wird deutlich, daß Sommergerste am besten zum Mai-Termin von den beiden Wintergetreidearten zu diskriminieren ist (Abb. 7-9, S. 79).

Im allgemeinen ist ein optimaler Zeitraum zur Trennung der Getreidearten zwischen Mitte Mai und Mitte/Ende Juli gegeben. LEMOINE et al. (1997) können dieses Zeitfenster zur Trennbarkeit der Getreidearten bestätigen, da sich die zeitversetzte Abreife des Getreides entsprechend im Rückstreusignal widerspiegelt.

7.2.2 Kartoffel, Zuckerrübe, Raps und Mais

Die in Abb. 7-10 dargestellten Zeitprofile von Kartoffel, Zuckerrübe, Raps und Mais zeigen einen über weite Teile parallelen Verlauf der mittleren Rückstreuung. Infolge der relativ planophil orientierten Blätter obiger Nutzpflanzen sind ihre Rückstreuintensitäten bei VV-polarisierter Mikrowellenstrahlung insgesamt höher als die von Getreidebeständen, die aufgrund der mehr aufrechten Blattstellung und exklusiv senkrechten Orientierung der Stengel eine mehr diffuse Volumenstreuung erzeugen.

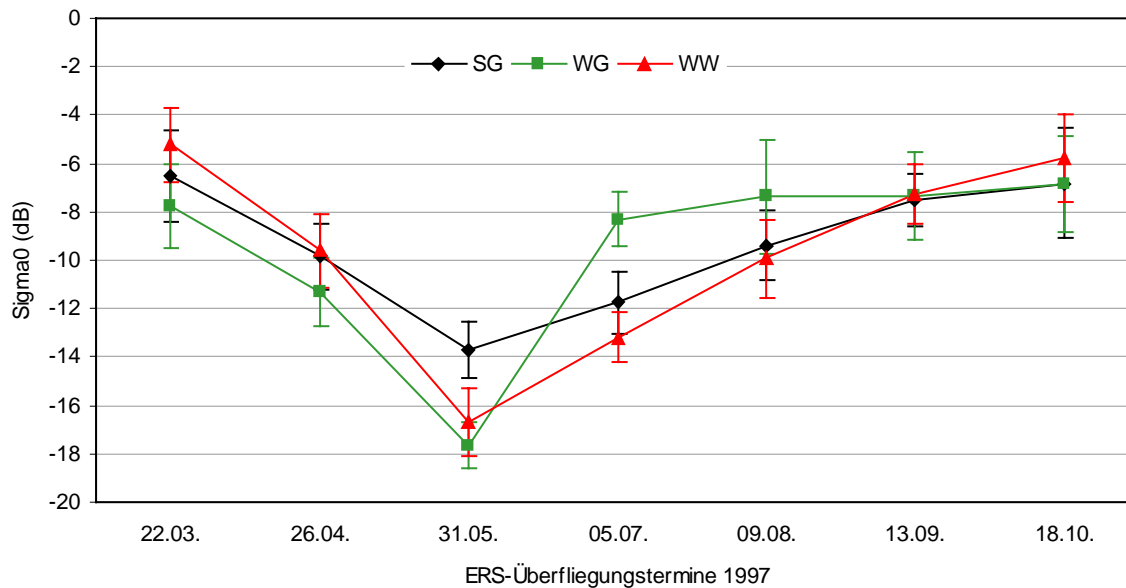


Abb. 7-9: Zeitprofile von Winterweizen, Wintergerste und Sommergerste des Anbaujahres 1998 unter Berücksichtigung der Standardabweichungen

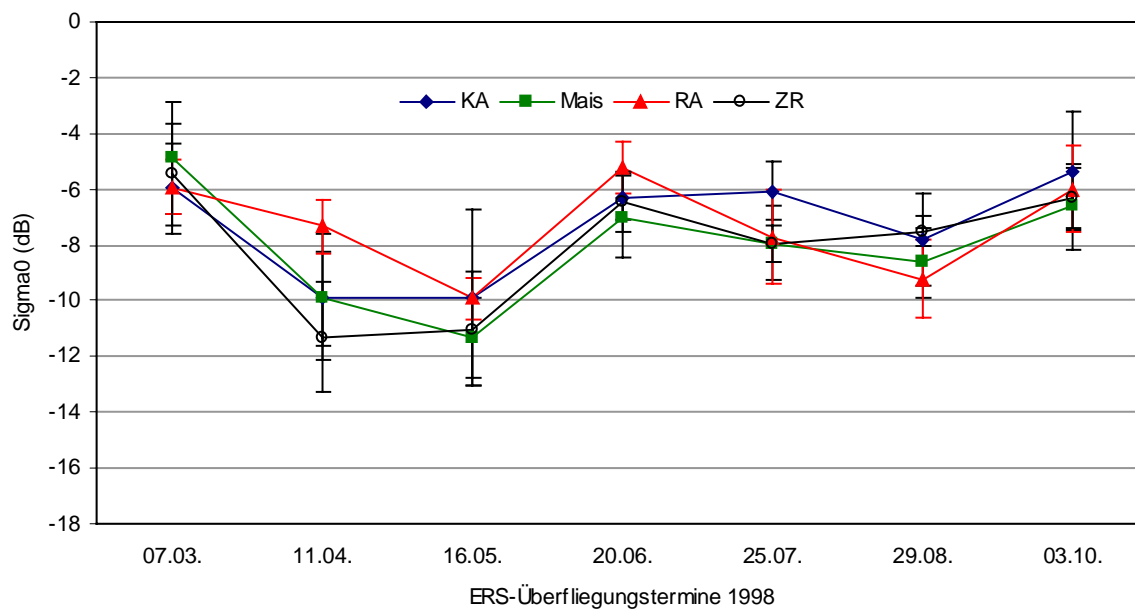


Abb. 7-10: Zeitprofile von Kartoffel, Zuckerrübe, Raps und Mais des Anbaujahres 1998 unter Berücksichtigung der Standardabweichungen

Im Gegensatz zu den Getreidebeständen sind die Streuungen zwischen den Schlägen einer Fruchtart jedoch sehr stark, wodurch eine Fruchtartenidentifizierung erschwert wird. Dennoch ergeben sich Zeitfenster, in denen Unterscheidungen möglich sind: So zeigt Raps im April eine deutlich höhere Rückstreuung als die übrigen Fruchtarten. Eine weitere Möglichkeit ergibt sich zum Juli-Termin durch die Trennung von Kartoffel zu den übrigen Fruchtarten. Eine insgesamt schlechte Trennbarkeit besteht für die Fruchtart Zuckerrübe.

7.3 Interannueller Vergleich der Radarsignaturen

Zeitliche Variationen von Jahr zu Jahr limitieren die Aussagefähigkeit der Rückstreuprofile als Grundlage für eine multitemporale Klassifizierung. Ein interannueller Vergleich der mittleren Radarrückstreuquerschnitte einzelner Fruchtarten kann Aufschluß über die Repräsentativität der Zeitprofile geben (SAICH & BORGEAUD 1999). Die in nachfolgenden Abbildungen dargestellten mittleren Rückstreuprofile basieren auf den Testschlägen des Meßprogramms der drei Untersuchungsjahre. Für die Fruchtarten Sommergerste und Mais lagen nur für 1997 und 1998 Meßwerte vor. Alle Datenpunkte sind ferner mit den jeweiligen EC-Entwicklungsstadien gekennzeichnet, um eventuelle phänologische Unterschiede zwischen den Jahren erkennbar zu machen.

Die zeitlichen Verläufe der beiden Wintergetreide (Abb. 7-11 und Abb. 7-12) sowie die von Mais¹ (Abb. 7-13) zeigen, daß gleiche phänologische Entwicklungsstadien im Jahr 1998 um ca. drei Woche früher erreicht werden, als im Jahre 1997. Im Vergleich zu 1996 beträgt die zeitliche Verschiebung sogar mehr als vier Wochen. Die unterschiedliche Pflanzenentwicklung wird besonders zu Beginn der Vegetationsperiode bis zum Erreichen des Blütenstadiums deutlich und spiegelt sich offensichtlich in den parallel versetzten Profilen der Radarrückstreuungen wider.

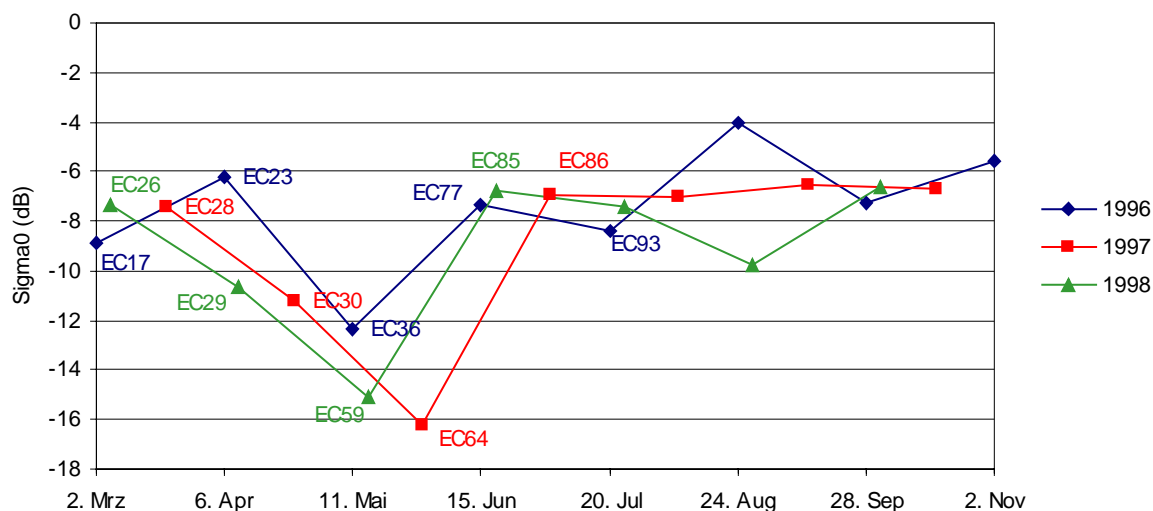


Abb. 7-11: Temporaler Verlauf der mittleren Radarrückstreuung von Winterweizen in den Untersuchungsjahren 1996-1998 (mit EC-Stadien)

¹ Für Mais stehen nur Daten der Untersuchungsjahre 1997 und 1998 zur Verfügung.

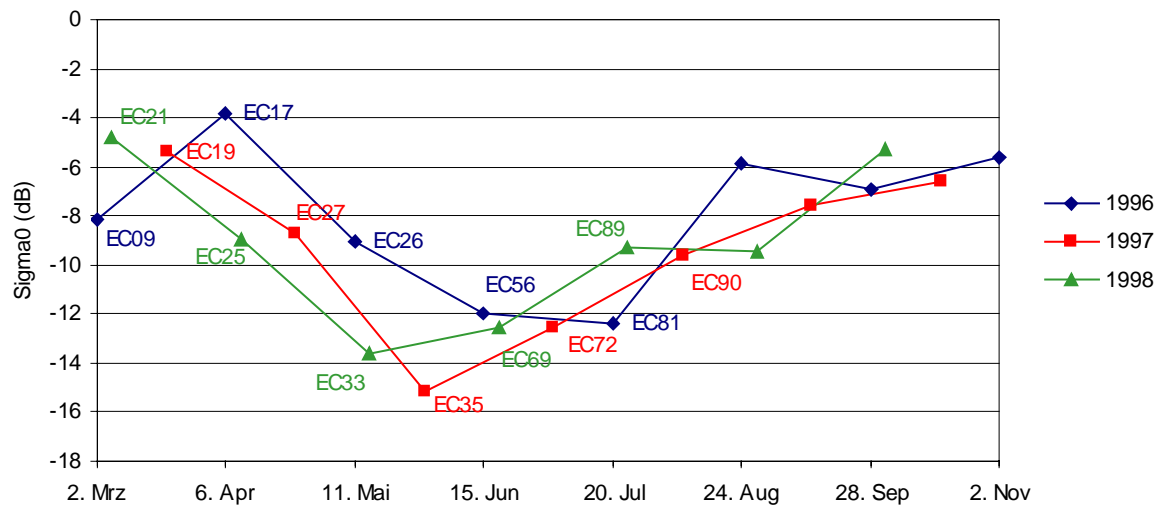


Abb. 7-12: Temporaler Verlauf der mittleren Radarrückstreuung von Wintergerste in den Untersuchungsjahren 1996-1998 (mit EC-Stadien)

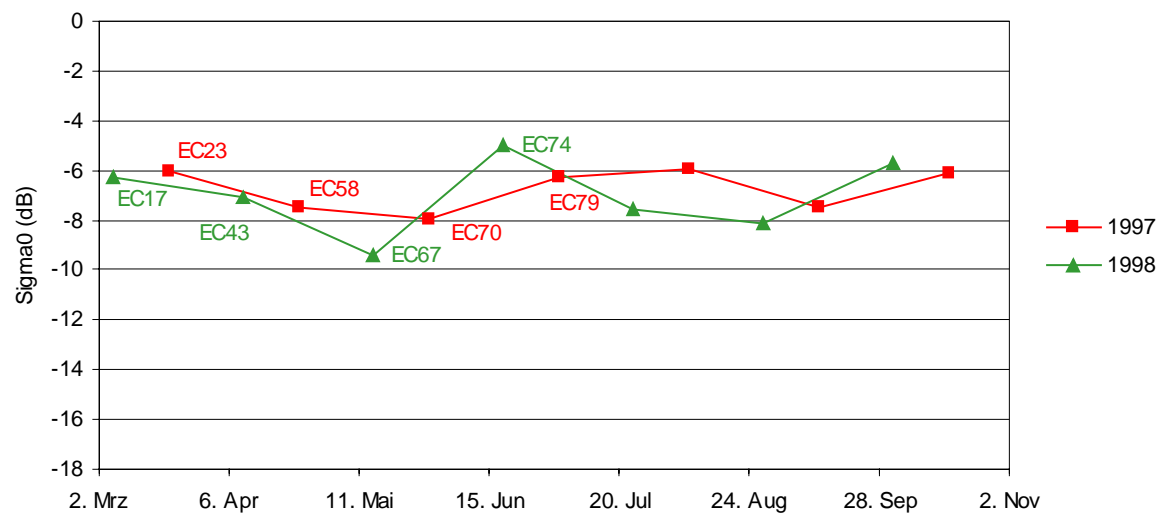


Abb. 7-13: Temporaler Verlauf der mittleren Radarrückstreuung von Mais in den Untersuchungsjahren 1997-1998 (mit EC-Stadien)

Obige Abbildungen zeigen, daß die beiden Wintergetreide und Mais das Minimum der Rückstreuung im Jahr 1998 zeitlich eher erreichen, als in den beiden anderen Untersuchungsjahren. Während der Phase der Abreife scheinen diese Zeitverschiebungen bei allen untersuchten Fruchtarten zu verschwinden. Ebenso uneinheitlich stellen sich in dieser Phase die Zusammenhänge zwischen Radarrückstreuung und Pflanzenentwicklung dar.

Obwohl für Sommergerste und Raps nur Daten aus zwei Untersuchungsjahren zur Verfügung stehen, ist dennoch ein einheitlicher Trend der Rückstreuprofile zu beobachten (Abb. 7-14 und Abb. 7-15). Die zeitigere Pflanzenentwicklung im Jahre 1998 wird besonders in den Rückstreuprofilen der Sommergerste deutlich.

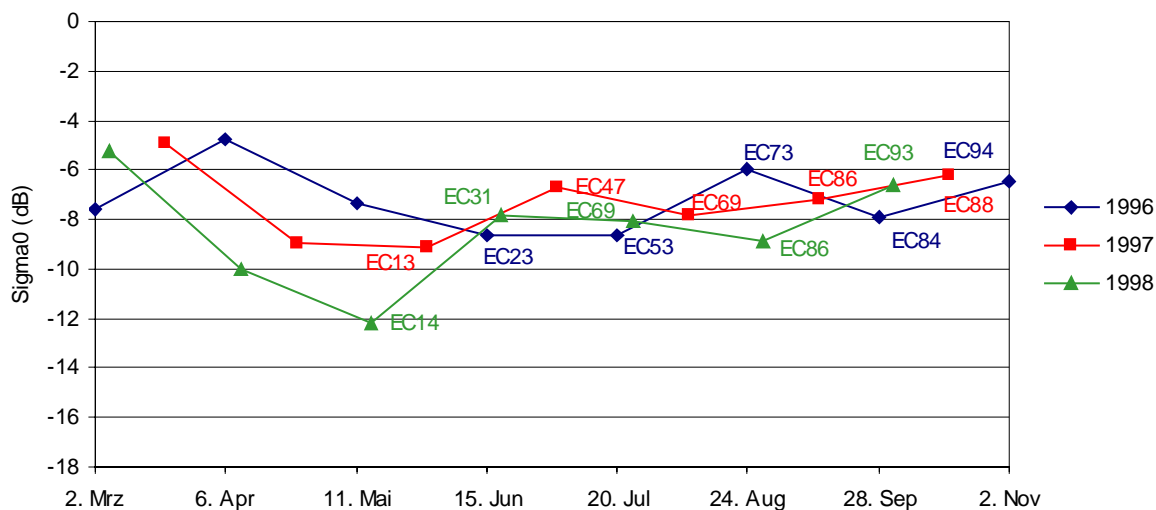


Abb. 7-14: Temporaler Verlauf der mittleren Radarrückstreuung von Raps in den Untersuchungsjahren 1996-1998 (mit EC-Stadien)

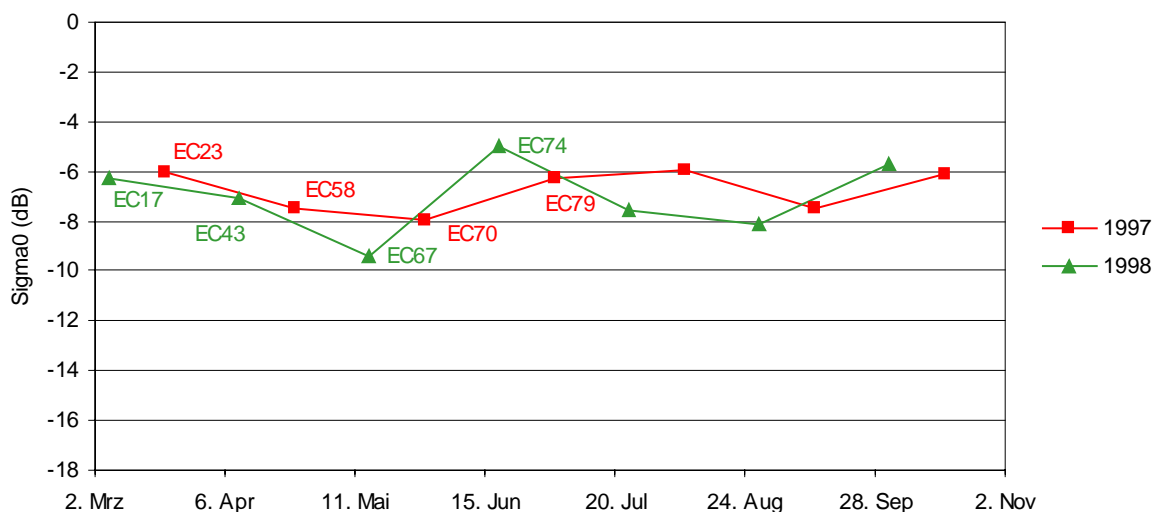


Abb. 7-15: Temporaler Verlauf der mittleren Radarrückstreuung von Sommergerste in den Untersuchungsjahren 1997-1998 (mit EC-Stadien)

Aus dem interannuellen Vergleich der Radarsignaturen kann folgendes Fazit gezogen werden:

1. Die Zeitprofile der untersuchten Fruchtarten zeigen in den drei Jahren ähnliche Verläufe.
2. Anhand der EC-Entwicklungsstadien sind zeitliche Verschiebungen von mehr als vier Wochen zwischen den Untersuchungsjahren 1996 und 1998 erkennbar.
3. Die unterschiedliche Pflanzenentwicklung in den drei Jahren wird durch die Radarrückstreuquerschnitte offensichtlich widerspiegelt und zeigt sich in den entlang der Zeitachse verschobenen parallelen Profilen.

Obwohl ein gemeinsamer Trend in den Zeitprofilen in den drei Untersuchungsjahren zu erkennen ist und Zusammenhänge zwischen der allgemeinen Pflanzenentwicklung und der Radarrückstreuung plausibel erscheinen, ist die zeitliche Auflösung der Zeitreihe mit einer 5-wöchigen Repetitionsrate nicht ausreichend, um allgemeingültigere Aussagen daraus abzuleiten.

7.4 Störeinflüsse auf die Radarsignaturen

Ein weiteres Ziel der Zeitreihenanalyse ist es, ein von äußeren Störeffekten und Singularitäten bereinigtes, charakteristisches Zeitprofil der Radarsignaturen einzelner Kulturarten zu extrahieren. Erst dann können verallgemeinernde Aussagen zur Anwendbarkeit und Stabilität von Klassifizierungsalgorithmen getroffen werden. Mögliche Störeffekte, die ein solches kulturartenspezifisches Signal überlagern sind u.a.:

- Unterschiedliche Einfallswinkel aufgrund ungleicher Aufnahmepositionen (orbitaler Effekt)
- Niederschlagsereignisse während bzw. unmittelbar vor der Aufnahme der Bilddaten
- Windeinfluß

Da für monofrequente C-Band SAR-Daten eine Quantifizierung der Signalanteile für die einzelnen Einflußgrößen nur bedingt möglich ist, wird versucht, die einzelnen Störeinflüsse an besonders ausgeprägten Singularitäten zu verdeutlichen, bei denen Abweichungen des Rückstreusignals in Größenordnungen von mehreren Dezibel vom zu erwartenden Verlauf festzustellen waren.

7.4.1 Orbitaler Einfluß

Ein Teil der beobachteten temporalen und lokalen Variabilitäten der mittleren schlagbezogenen Radarrückstreuung gleicher Fruchtarten wird durch systembedingte orbitale Einflußgrößen bestimmt. Als eine der sensitivsten Parameter hat sich hierbei der lokale Einstrahlwinkel erwiesen (ULABY et al. 1986a; BAN & HOWARTH 1997; SAICH & BORGEAUD 1998). Eine Möglichkeit, den Einfluß des lokalen Einstrahlwinkels zu beurteilen, ergibt sich aus den zusätzlichen SAR-Datensätzen des benachbarten Tracks 437. Diese Szenen wurden hinzugenommen, um während der Hauptvegetationsperiode zwischen April und August die Zeitreihe zu verdichten. Wie die übrigen Szenen des Tracks 165 wurden auch die Zusatzszenen im Tagesmodus (*descending mode*) aufgenommen (Abb. 7-16).

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in den Szenen des Tracks 437 im sogenannten *Near Range*-Bereich (näher der Nadirlinie des Satelliten), wohingegen die übrigen Aufnahmen des Tracks 165 das Untersuchungsgebiet im sogenannten *Far Range*-Bereich abbilden. Die unterschiedliche Aufnahmeposition beider Tracks verursacht einen im Mittel um $3,7^\circ$ steileren Einstrahlwinkel der Zusatzszenen gegenüber denen des Tracks 165. Die mittlere Differenz der *Slant Range*-Distanz beträgt ca. 20,35 km.

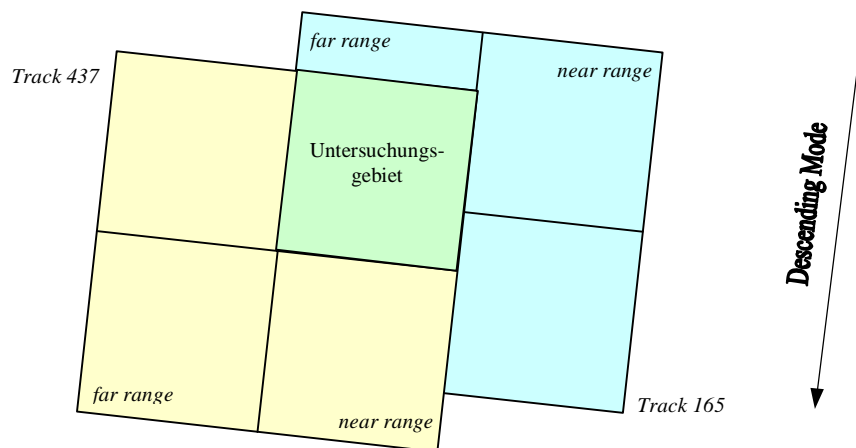


Abb. 7-16: Lage des Untersuchungsgebietes innerhalb der Tracks 165 und 437 (Zusatzszenen)

In Abb. 7-17 sind die Rückstreuzeitprofile von Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste und Kartoffel getrennt nach den beiden Aufnahmepositionen der Tracks 165 bzw. 437 für das Untersuchungsgebiet 1997 dargestellt.

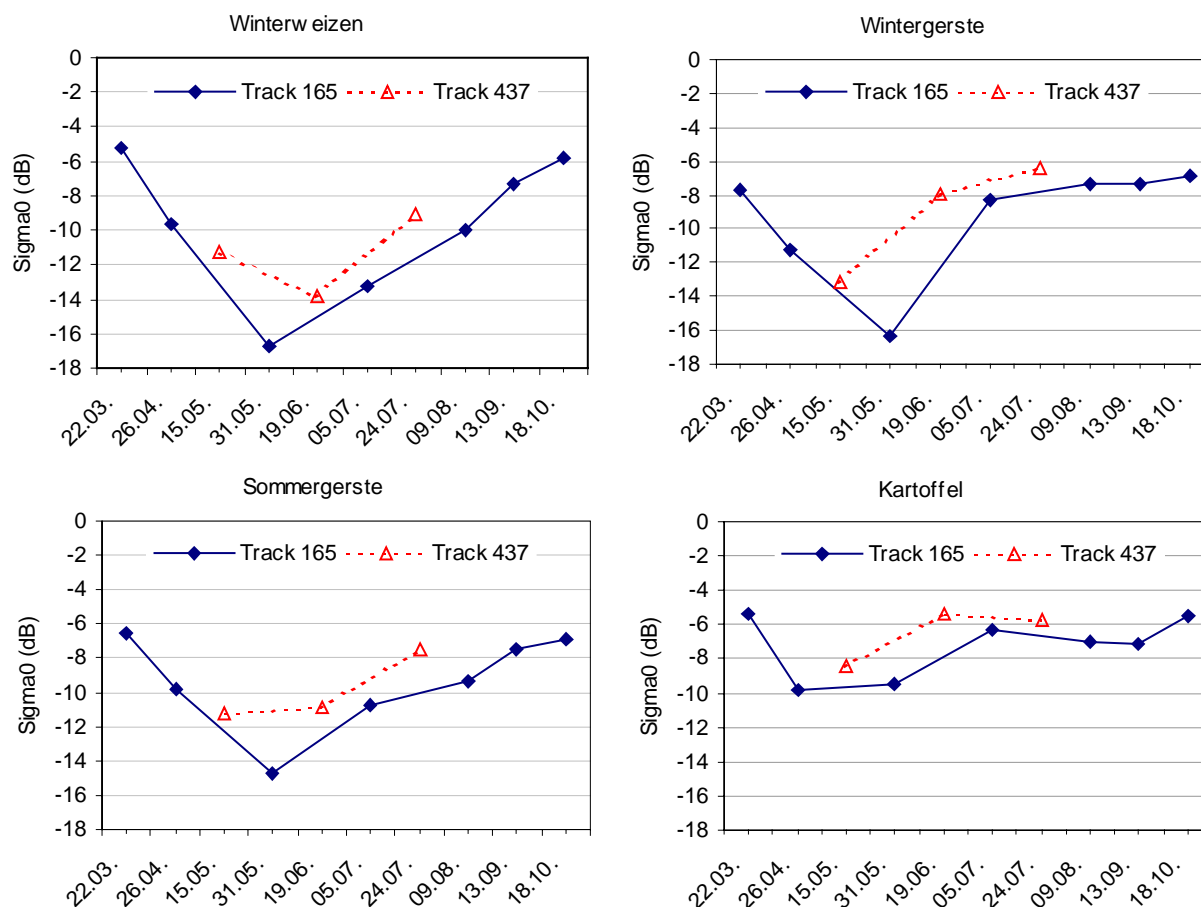


Abb. 7-17: Multitemporale Signaturen von Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste und Kartoffel getrennt nach ERS-2 Aufnahmepositionen

Wie aus Abb. 7-17 hervorgeht, ergeben sich bei den Zusatzszenen des Tracks 437 zwischen 1,5 und 2,5 dB höhere Rückstreuwerte, was auf den durchschnittlich $3,7^\circ$ steileren Einstrahlwinkel zurückgeführt werden kann. Zu vergleichbaren Ergebnissen führten in diesem Zusammenhang Untersuchungen mit ERS-1 Daten von BAN & HOWARTH (1997) sowie von ULABY et al. (1986a), bei letzterem jedoch mit HH-polarisiertem C-Band-Daten.

Daß die Radarrückstreuung in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ sehr sensitiv auf Veränderungen des Einstrahlwinkels reagiert, konnte ferner mit Hilfe des *Radiative Transfer Models RT2* (SAICH et al. 1995) an mehreren Beispielen demonstriert werden. Dabei war der Einfluß des lokalen Einstrahlwinkels für vegetationsfreie Bodenoberflächen am größten. Physikalisch kann dieser Effekt anhand des modifizierten Rayleigh-Kriteriums erklärt werden. Danach gilt eine Oberfläche als *rauh*, wenn die mittlere Höhenvarianz (RMS-Höhe) der Oberfläche größer ist, als $\lambda/4,4$ dividiert durch den Cosinus des lokalen Einstrahlwinkels (LILLESAND & KIEFER 1994). Bei konstanter Wellenlänge erscheinen Oberflächen somit rauher, wenn sie unter einem flacheren Einstrahlwinkel abgebildet werden, was zu einer Erhöhung des rückgestreuten Signals führt.

Die Abhängigkeit des Rückstreusignals von der orbitalen Aufnahmeposition bzw. des daraus resultierenden veränderten Einstrahlwinkels hat zur Konsequenz, daß die Zusatzszenen des Tracks 437 nicht unmittelbar in die Zeitreihenanalysen eingebunden werden dürfen.

7.4.2 Niederschlagseinfluß

Für großflächige landwirtschaftliche Anwendungen von SAR-Daten stellen Niederschlagsereignisse einen weiteren Störeffekt dar. SAR-Daten sind potentiell sensitiv gegenüber Feuchteveränderungen, sowohl des Bodens als auch von Pflanzenbeständen. Niederschlag während bzw. kurz vor der Aufnahme hat unmittelbare Auswirkungen auf den Wassergehalt und damit die dielektrischen Eigenschaften der beleuchteten Objekte. Die beiden Mechanismen, von denen ein Effekt auf die Radarrückstreuung landwirtschaftlicher Kulturen erwartet werden kann, sind:

1. Niederschlag (Regen oder Tau), der durch Interzeption vom Pflanzenbestand aufgenommen wird.
2. Niederschlag, der durch Abtropfen von den Pflanzen oder durch Stammabfluß den Boden erreicht und zu einer Befeuchtung der obersten Bodenschicht führt.

Mögliche atmosphärische Effekte durch Wasserwolken und Niederschlagszellen, die stark frequenzabhängig sind, sollen an dieser Stelle nicht berücksichtigt werden, da sie für Wellenlängen im C-Band vernachlässigbar sind¹.

Regional variierende Niederschläge können als zusätzliches Signalrauschen betrachtet werden, das die Zeitreihenprofile überlagert und zu einer Erhöhung der Varianz von Rück-

¹ Ein signifikanter Effekt durch Wasserwolken tritt erst bei Wellenlängen von $\lambda < 3$ cm (Frequenz > 10 GHz) auf. Für Eiswolken beträgt die Transmissivität nahezu 100% (ULABY 1981).

streusignaturen beiträgt. Der Störeinfluß, der vom Niederschlag ausgeht, hat nicht nur Konsequenzen auf die räumliche Repräsentanz fruchtartenspezifischer Zeitprofile, sondern auch auf ihre interannuelle Vergleichbarkeit. Da der Niederschlagseinfluß, vor allem bei vorhandener Vegetationsdecke, in sehr komplexer Weise die Rückstreumechanismen beeinträchtigt, kann auch mit Hilfe von zusätzlichen meteorologischen Daten und Informationen über die Landnutzung bzw. den Pflanzenbestand sein Einfluß nur schwer quantifiziert und korrigiert werden (ANG & HOBBS 1997; HOBBS et al. 1998). Daraus ergibt sich, daß Klassifikatoren lokal trainiert werden müssen, um befriedigende Genauigkeiten zu erzielen.

In verschiedenen bestehenden Rückstreumodellen wird versucht, den Niederschlagseinfluß quantitativ zu erfassen. Das *Radiative Transfer Model* RT2 (SAICH et al. 1995) oder das sogenannte *Water-Cloud* Modell (ATTEMA & ULABY 1978) behandeln freies Niederschlagswasser innerhalb eines Pflanzenbestandes als suspendierende sphärische Tropfen. Die Sensitivität des ERS-Sensors gegenüber Niederschlag wird in der Literatur im allgemeinen nicht bezweifelt: SAICH & BORGEAUD (1998) stellten fest, daß bereits geringe Mengen von 2-3 mm Niederschlag in einem 25 cm hohen Weizenbestand, zu einer Erhöhung der Radarrückstreuung um 5 dB führen. Der Einfluß von Niederschlagswasser zeigte sich bei den Modellierungen als dominant gegenüber allen anderen Rückstreumechanismen, die von der Vegetation und dem Boden als Volumen- bzw. Oberflächenstreuer ausgehen. Auch DOBSON et al. (1991) beobachteten einen Anstieg von 2-3 dB bei Koniferen bzw. 4 dB bei niedriger Vegetation. WOODING et al. (1992) beziffert den Anstieg auf 1-4 dB nach einem 10 mm starken Niederschlagsereignis kurz vor einer ERS-Aufnahme für Wiese und Winterweizen bei nicht geschlossener Pflanzendecke. Ähnliche Angaben zum Niederschlags- und Taueinfluß finden sich bei BROWN et al. (1993), PULLIAINEN et al. (1996) und WEINMANN et al. (1998).

Da die Modellierung des Interzeptionswassers als Tropfen die Realität nur bedingt widerspiegelt, wurden alternative Modelle entwickelt, die den Niederschlag als dünnen Wasserfilm auf der Vegetationsoberfläche betrachten (KLAASSEN et al. 1997). Modellierungen auf dem Maßstabniveau einzelner Blätter führten bei einem Wasserfilm von 0,2 mm auf einem ebenso dicken Blatt mit einer gravimetrischen Feuchte von 60% zu einer Zunahme der Rückstreuung von 8 dB. Die Hochrechnung der Einzelblatt-Ergebnisse auf eine dichte Pflanzendecke (Blattflächenindex von 10), unter Verwendung des Modells nach KARAM et al. (1992), ergab einen Anstieg der Rückstreuung von 1-2 dB. Der Anstieg ist damit deutlich geringer als für einzelne Blätter, da die erhöhte Absorption durch die nassen Blätter den Rückstreuanteil tieferer Pflanzenschichten verringert. Nach Überlegungen von HOBBS et al. (1998) kann der erhöhte Wassergehalt in der obersten Pflanzenschicht sogar zu einer Abnahme der Gesamtrückstreuung führen, da der Rückstreuanteil durch Mehrfachreflexionen zwischen Pflanze und Boden, die zum Sensor gerichtet sind, reduziert wird.

In gleicher Weise führt eine Bodenbefeuchtung aufgrund der zunehmenden Dielektrizitätskonstante zu einer Zunahme des Rückstreukoeffizienten σ^0 . Die physikalischen Zusammenhänge zwischen Bodenfeuchte, Dielektrizitätskonstante und σ^0 sind detailliert in der

Literatur dokumentiert (HALLIKAINEN et al. 1985; DOBSON et al. 1985; ULABY et al. 1982a; BRUCKLER et al. 1988). Die Zunahme der Rückstreuung durch eine erhöhte Bodenfeuchte ist vor allem im Frühjahr und Herbst relevant, wenn viele Ackerflächen vegetationsfrei sind oder einen nur spärlichen Pflanzenbewuchs aufweisen.

Obwohl Bodenfeuchtezunahmen und zusätzliches Wasser im Pflanzenbestand die Rückstreuung im allgemeinen erhöhen, können ihre einzelnen Anteile mit Hilfe des monofrequenten C-Bandes des ERS nur schwer voneinander getrennt werden (ULABY et al. 1996). Um die komplexen Wirkungsmechanismen zwischen Niederschlag auf Pflanzenbeständen und der Radarrückstreuung zu verstehen, muß die relative Bedeutung der beteiligten Streumechanismen erfaßt und quantifiziert werden.

Die ausgewählten Beispiele der Jahre 1997 und 1998 beschränken sich auf mittlere σ^0 -Werte von Schlägen aus zwei Teilgebieten, die durch jeweils eine zentralgelegene Niederschlagsstation repräsentiert werden¹. Damit ist gewährleistet, daß die gemessenen Niederschlagssummen, abgesehen von den allgemeinen Meßfehlern, den Gebietsniederschlag für die betrachteten Schläge repräsentieren.

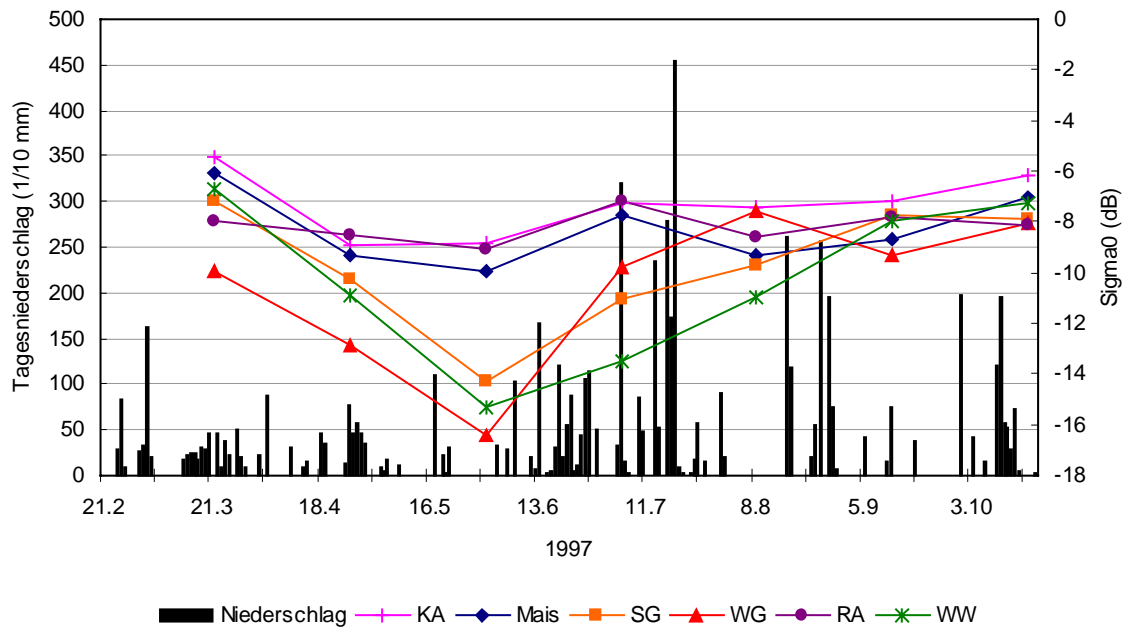


Abb. 7-18: Tagesniederschlagssummen und mittlere Radarrückstreuung der Hauptfruchtarten 1997 (berücksichtigte Schläge: Bonituregebiete Hollern u. Dietersheim; DWD-Niederschlagsstation Neufahrn)

¹ Der maximale Abstand der Schläge zur Niederschlagsstation beträgt weniger als 1,5 km. Topographiebedingte Niederschlagsunterschiede können für beide Beispiele als vernachlässigbar gering eingestuft werden.

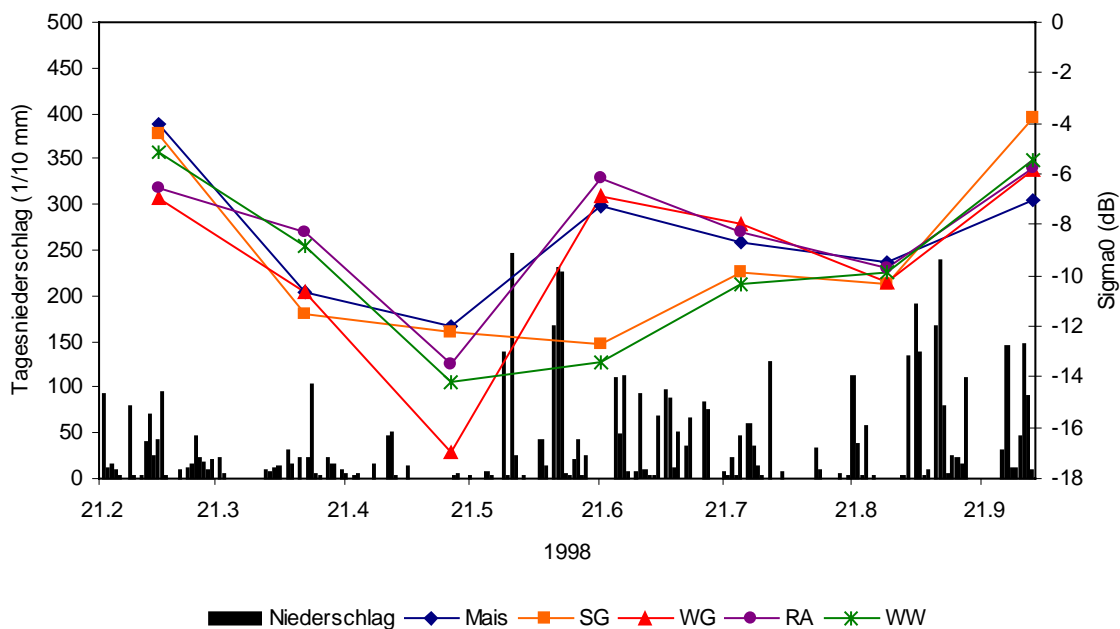


Abb. 7-19: Tagesniederschlagssummen und mittlere Radarrückstreuung der Hauptfruchtarten 1998 (berücksichtigte Schläge: Bonituregebiet Kranzberg; DWD-Niederschlagsstation Sünzhausen)

Am Beispiel der Daten des Jahres 1997 scheint ein Zusammenhang zwischen Niederschlag und Rückstreuung gegeben zu sein: So könnte der signifikante Anstieg der Rückstreuung aller Kulturen vom 31.05. zum 05.07. mit dem intensiven Niederschlag von 32 mm wenige Stunden vor der Überfliegung am 05.07. in Verbindung gebracht werden. Der gleiche Wiederanstieg der Rückstreuung ist jedoch auch im Jahre 1998 zu erkennen, obwohl es während und drei Tage vor der Überfliegung am 21.06. nicht geregnet hat. Sehr ähnlich stellten sich die Niederschlagsverhältnisse vor der letzten Überfliegung in beiden Jahren dar, als ca. 50-60 mm in der Woche vor dem Überflug gemessen wurden. 1997 blieben die mittleren Rückstreuungen jedoch annähernd konstant, wohingegen ein markanter Anstieg von σ^0 im Jahre 1998 zu beobachten war.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß zwar einzelne Niederschlagsereignisse mit den Radarsignaturen koinzidieren, ein allgemeiner Zusammenhang zwischen Niederschlag und Rückstreuung anhand der gegebenen Datengrundlage aber nicht nachgewiesen werden kann. Zu vergleichbaren Schlußfolgerungen kommen auch SAICH & BORGEAUD (1998) bei ihren vierjährigen Untersuchungen in Flevoland, wo eine zeitliche Konsistenz der Wirkungsbeziehung Niederschlag-Rückstreuung nicht gegeben war.

Beregnungsversuch

Um den Effekt der Blattbenetzung genauer zu untersuchen, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes EMAP 1997 und 1998 Feldversuche mit künstlicher Beregnung auf Zuckerrüben- und Winterweizenschlägen durchgeführt (KÜHBAUCH et al. 1998). Jeweils 5 Minuten vor dem Überflug wurde der entsprechende Schlag zur Hälfte beregnet. Die andere Hälfte des Schlages blieb trocken. Der Versuch wurde an vier Terminen durchgeführt, je-

weils zweimal 1997 in einem Zuckerrübenbestand und zweimal 1998 in einem Winterweizenbestand.

Aufgrund starker Verdunstungsraten an den Aufnahmetagen im Juli und August, mit Lufttemperaturen von ca. 30 ° C, konnte nur eine leichte Befeuchtung der Zuckerrübenblätter erzielt werden, wobei der Boden trocken blieb. Die Radarrückstreuintensität änderte sich dadurch nicht signifikant. Während des Septembertermins war der Zuckerrübenbestand noch stärker ausgetrocknet. Aufgrund der niedrigeren Außentemperaturen verdunstete allerdings nicht das ganze Wasser und der Boden wurde leicht befeuchtet. Die Radarrückstreuintensität erhöhte sich um 1,5 dB aufgrund der höheren Bodenfeuchte.

Im April und Mai 1998 wurde ein Winterweizenbestand beregnet. Obwohl durch die Beregnung - bei unveränderter Bodenfeuchte - der Pflanzenbestand benetzt wurde, konnten keine signifikanten Unterschiede der Rückstreuintensität zwischen beregnetem und nicht beregnetem Teilschlag festgestellt werden.

Als Fazit des Beregnungsversuches kann festgehalten werden, daß der zu erwartende Effekt der Blattbenetzung auf das Radarrückstreusignal experimentell nicht nachweisbar war. Allerdings war die erreichte Blattbenetzung in allen Fällen unter 20% der Blattoberflächen, so daß ein leichter Einfluß nicht ausgeschlossen werden kann. Es wurde beobachtet, daß Wasser von Pflanzen, die durch überwiegend senkrecht stehende Pflanzenteile charakterisiert sind - wie das bei Getreide der Fall ist - leicht abfließt, was zu einer relativ geringen Interzeptionsrate führt. Das trifft vor allem für größere Tropfenradien zu. Kleine Tropfen ($< 15 \mu\text{m}$), wie sie bei Nieselregen vorkommen oder von Pflanzenschutzspritzen erzeugt werden, verursachen eine deutlich höhere Pflanzenbenetzung, wobei sich das Interzeptionswasser häufig in den Blattscheiden ansammelt. Insgesamt reicht dieser Effekt jedoch nicht aus, um einen signifikanten Einfluß auf das Radarrückstreusignal auszuüben.

Der Einfluß der Bodenfeuchte auf die Rückstreuintensität konnte durch die Beregnungsversuche nachgewiesen werden und deckt sich mit den in der Literatur dokumentierten Beobachtungen. Allerdings ist der Einfluß der Bodenfeuchte mit zunehmender Mächtigkeit der Vegetationsschicht stark rückläufig. Bei einem Getreidebestand im Mai kann von einer fast vollständigen Maskierung des Bodenfeuchteanteils am Gesamtsignal ausgegangen werden (WOODING et al. 1995). In den übrigen Monaten darf der Bodenfeuchteeinfluß jedoch nicht vernachlässigt werden.

7.4.3 Windeinfluß

Ein weiterer meteorologischer Störeffekt im Zusammenhang mit der Zeitreihenanalyse und der Klassifizierung geht vom Wind aus. Wind übt einen unmittelbaren Einfluß auf die Pflanzenstruktur aus. Durch Windböen geraten Pflanzenkomponenten in Bewegung, die sowohl in elastischen Schwingungen als auch in dauerhaften, statischen Veränderungen der Vegetationsdecke resultieren (HOBBS et al. 1998). Beide Effekte können wiederum zu Lage-, Orientierungs- und Höhenveränderungen führen, wobei Pflanzen mit großer Wuchshöhe und dünnen Halmen stärker betroffen sind. Besonders sensitiv reagiert die in

den Radardaten enthaltene Phaseninformation auf Abstandsveränderungen zwischen dem beleuchteten Objekt und der Antenne, was u.a. Gegenstand der multitemporalen Kohärenzanalyse sein wird (s. Kap. 10). Aber auch die Intensität kann durch den Wind entscheidend beeinflußt werden. So werden beispielsweise Wasserflächen im Untersuchungsgebiet als schwarze Flächen dargestellt (niedrige Rückstreuquerschnitte), wenn ihre Oberfläche aufgrund schwacher Winde sehr glatt ist. Wird das Gebiet hingegen während starker Winde vom ERS-Sensor aufgenommen, heben sich Wasserflächen kaum noch von ihrer Umgebung ab.

Abb. 7-20 zeigt den Windeinfluß am Beispiel des Speichersees nordöstlich von München. Die Windmeßwerte beziehen sich auf die nahegelegene DWD-Klimastation *Erdinger Moos* und wurden in stündlicher Auflösung erfaßt. Während beider Aufnahmen war es niederschlagsfrei.



ERS-2-Aufnahme vom 02.03.1996
Windgeschwindigkeit: 8,6 m/s
Windrichtung: 31° (NE)
Mittlerer Rückstreuquerschnitt: -7,3 dB



ERS-2-Aufnahme vom 06.04.1996
Windgeschwindigkeit: 1,1 m/s
Windrichtung: 26° (NE)
Mittlerer Rückstreuquerschnitt: -18,9 dB

Abb. 7-20: Windeinfluß am Beispiel des Speichersees bei München (Maßstab ca. 1 : 137 000)

Obwohl der Einfluß des Windes offensichtlich und leicht zu beobachten ist, sind seine Auswirkungen auf die SAR-Bildgebung nur mit großem Aufwand unter Freilandbedingungen zu messen (MORRISON et al. 1998). Darüber hinaus tritt Wind häufig lokal und in Böen auf, so daß seine Erfassung zum genauen Zeitpunkt der ERS-Aufnahme für ein größeres Untersuchungsgebiet nicht möglich ist.

Einzelne Starkwindereignisse können darüber hinaus zu dauerhaften Veränderungen der Pflanzenstruktur durch sogenannte Lagerbildungen führen. Dieses Phänomen ist häufig bei Getreidebeständen zwischen dem Stadium des Ährenschiebens und der Ernte zu beobachten und wirkt sich signifikant auf die mittlere Radarrückstreuung der betroffenen Schläge aus. Hierzu wurden mit Hilfe eines T-Tests die mittleren Rückstreuquerschnitte von Getreideschlägen mit starker Lagerbildung (mehr als die Hälfte des Schlages war betroffen) denen ohne Lagerbildungen gegenübergestellt. Als Daten dienten insgesamt 187 bzw. 194 bonitierte Getreideschläge (WW, WG, SG und RO) der Untersuchungsjahre 1997 und

1998. In beiden Jahren waren während der ERS-Aufnahme am 05.07.1997 bzw. 09.07.1997 etwa 22% der Getreideschläge durch starke Lagerbildungen geprägt, wobei jeweils mehr als die Hälfte des Schlages betroffen war. In beiden Jahren ergaben sich hochsignifikant (Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,01$) höhere Rückstreuquerschnitte bei Schlägen mit Lagergetreide. Die mittleren Differenzen betragen 1,5 dB (1997) bzw. 1,6 dB (1998). Dieses Ergebnis steht auch im Einklang mit Beobachtungen von WOODING et al. (1995).

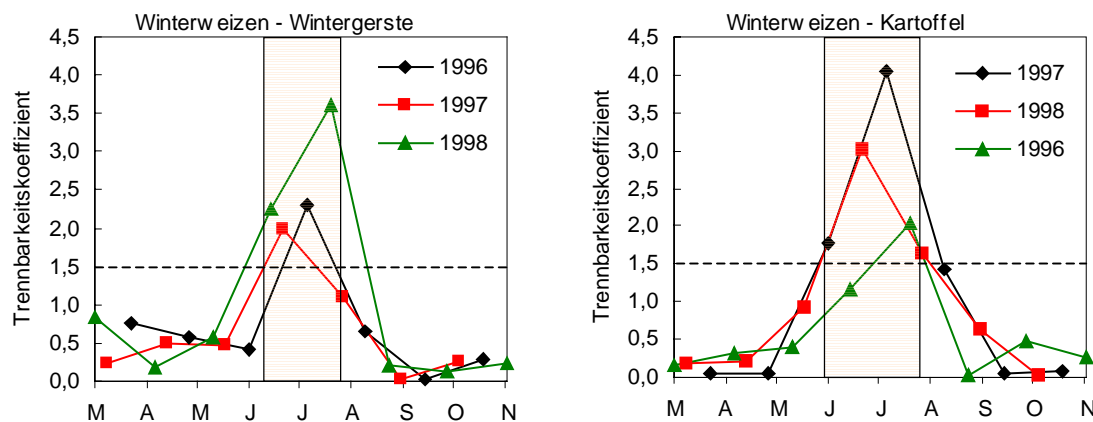
7.5 Detektion von Zeitfenstern zur Trennbarkeit von Fruchtarten

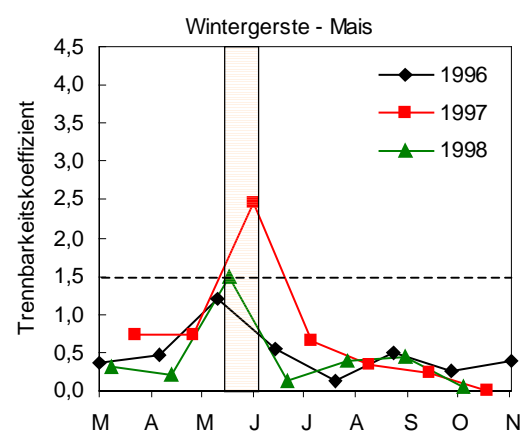
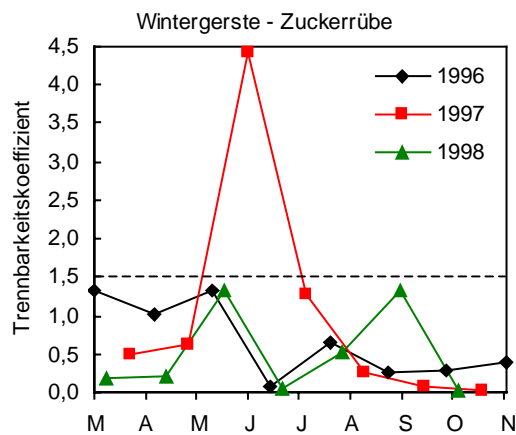
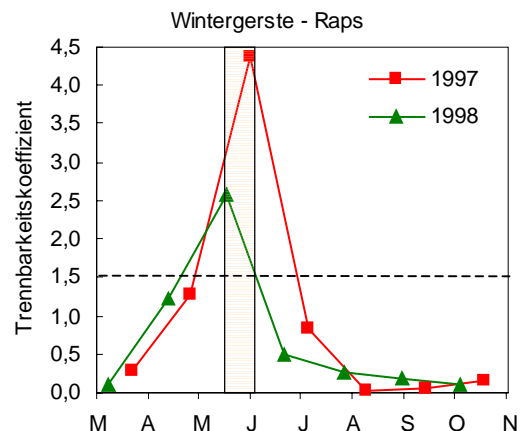
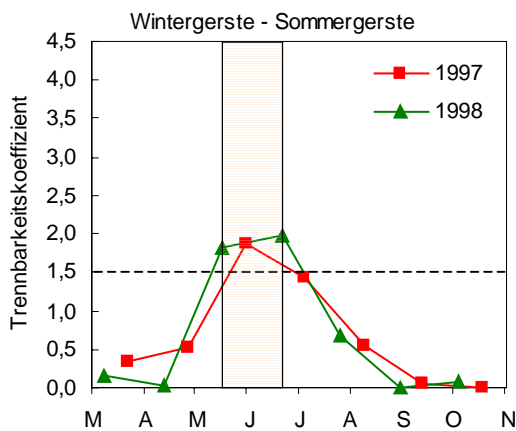
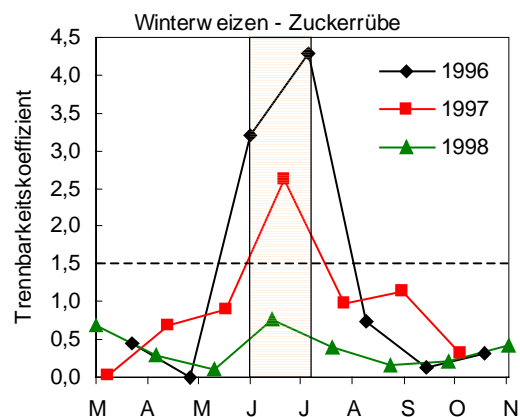
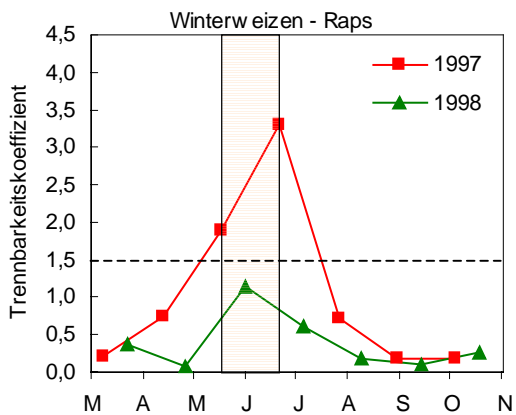
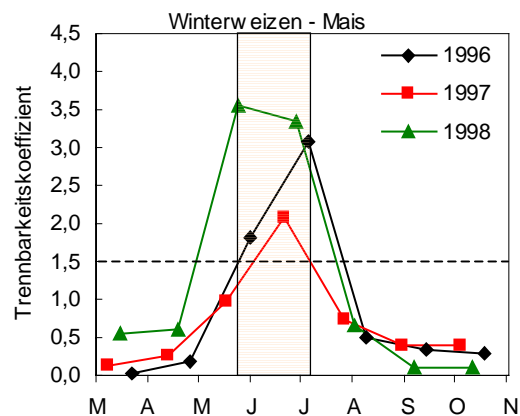
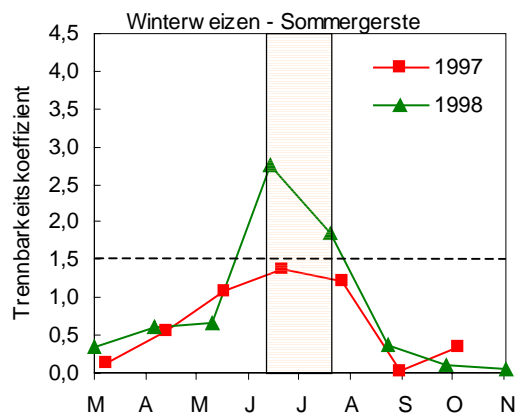
Die Variabilitäten fruchtartenspezifischer Signaturen limitieren die zu erwartende Güte einer Klassifizierung (SAICH & BORGEAUD 1998). Mit Hilfe eines einfachen Trennbarkeitsmaßes, kann die zu erwartende Genauigkeit eines Bays'schen Klassifikators hinsichtlich der Trennung zweier Fruchtarten geschätzt werden (DOBSON et al. 1992). Der Trennbarkeitskoeffizient T zur Schätzung der Klassifizierungsrate zweier Klassen mit mittleren Rückstreuungen von μ_i und Standardabweichungen von S_i ($i = 1, 2$) ist dabei wie folgt definiert:

$$T = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{(S_1 + S_2)} \quad \text{Gl. 7-1}$$

Für normalverteilte Daten, was im vorliegenden Fall angenommen werden kann, korrespondieren Klassifizierungsraten von 90% mit einem Wert von $T > 1,5$, während $T \sim 0,55$ einer Klassifizierungsrate von etwa 70% entspricht (DOBSON et al. 1992).

Nachfolgende Diagramme zeigen den Trennbarkeitskoeffizient als Funktion der Zeit zwischen jeweils zwei der insgesamt sieben häufigsten Fruchtarten im Untersuchungsgebiet. Die in Abb. 7-21 farbig markierten Zeitfenster der bestmöglichen Trennbarkeit zweier Fruchtarten definieren sich durch Werte von $T > 1,5$ (90%-ige Trennbarkeit), die möglichst in allen Untersuchungsjahren reproduzierbar sein sollten.





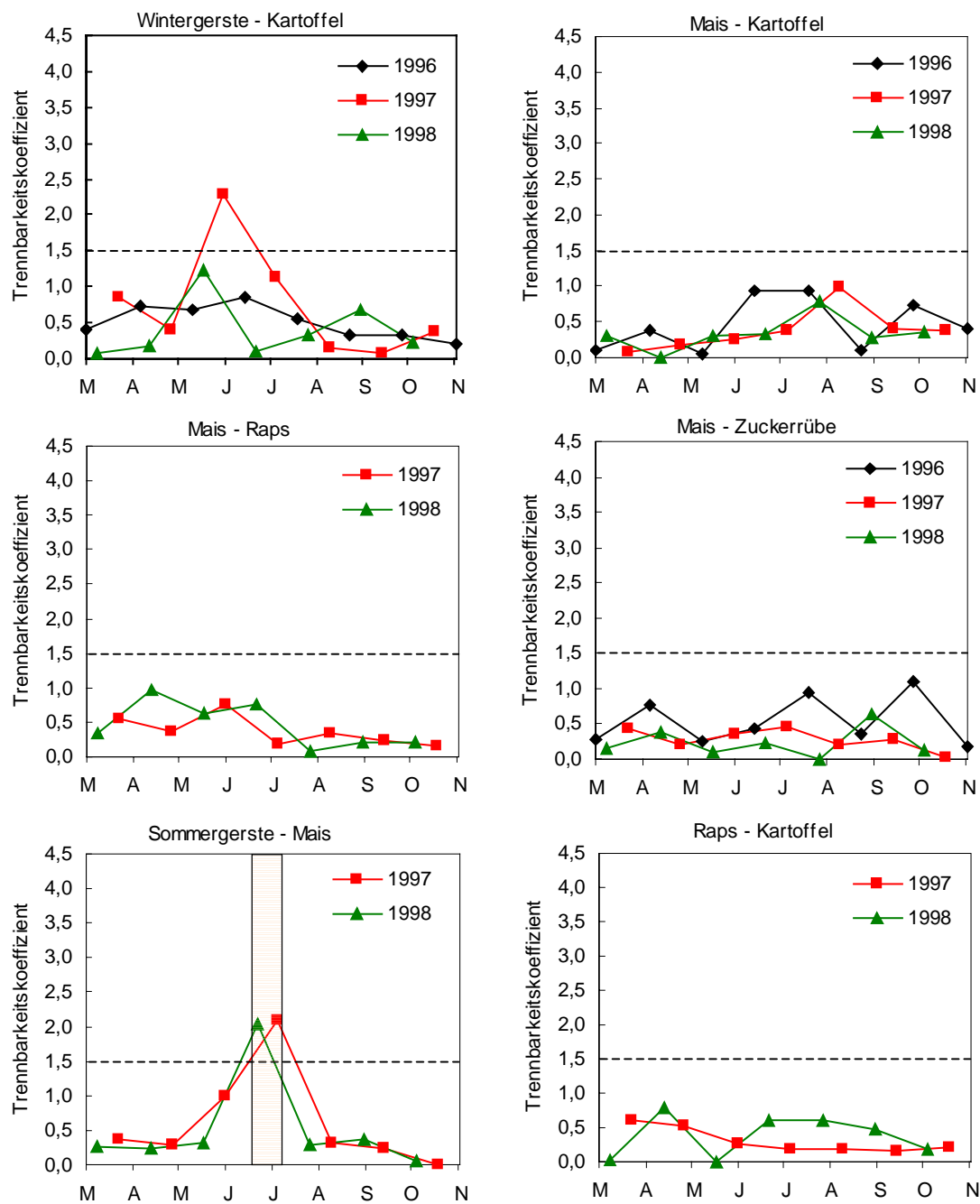


Abb. 7-21: Trennbarkeitskoeffizienten zwischen zwei Fruchtarten als Funktion der Zeit

Wie aus Abb. 7-21 hervorgeht, besteht nur für 10 der 16 untersuchten Fruchtartenkombinationen die Möglichkeit zur Klassentrennung. Das optimale Zeitfenster dazu bietet sich während einer kurzen Periode zwischen Mai und Juli. SAR-Szenen vom Frühjahr und Herbst tragen dementsprechend wenig zu einer Differenzierung zwischen den Fruchtarten bei. Darüber hinaus fällt auf, daß eine Möglichkeit zur Klassentrennung bei einigen Fruchtartenkombinationen nur in einem der drei Untersuchungsjahre gegeben ist. Daraus ist zu schließen, daß es sich in solchen Fällen um ein Ergebnis handelt, das von Jahr zu Jahr nicht reproduzierbar ist.

Die in Abb. 7-21 dargestellten Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

Tab. 7-1: Einteilung der Trennbarkeiten zweier Fruchtarten anhand des Trennbarkeitskoeffizienten T

gut trennbar ($T > 1,5$)	mäßig trennbar ($1,5 > T > 1$)	schlecht trennbar ($T < 1$)
Winterweizen - Wintergerste	Winterweizen - Raps	Mais - Kartoffel
Winterweizen - Kartoffel	Winterweizen - Sommergerste	Mais - Raps
Winterweizen - Mais	Wintergerste - Zuckerrübe	Raps - Kartoffel
Winterweizen - Zuckerrübe	Wintergerste - Mais	Zuckerrübe - Kartoffel ¹
Wintergerste - Sommergerste	Wintergerste - Kartoffel	
Wintergerste - Raps		
Sommergerste - Mais		

Die in Tab. 7-1 zusammengefaßten Ergebnisse zeigen, daß im allgemeinen zwischen den langgestreckten, schmalblättrigen Getreidearten und den breitblättrigen Hackfrüchten gute Trennbarkeiten zu erwarten sind. Wie bereits aus Abb. 7-9 zu erkennen war, ist eine Differenzierung selbst zwischen verschiedenen Getreidearten möglich. Zwischen verschiedenen Hackfrüchten und Hackfrüchten in Kombination mit Mais ergeben sich hingegen während der gesamten Zeitreihe keine ausreichenden Möglichkeiten zur Trennbarkeit der Klassen.

7.6 Zusammenfassung und Diskussion

Im folgenden sind wichtige Aussagen zur Zeitreihenanalyse zusammengefaßt:

- Der temporale Verlauf der Radarrückstreuung weist kulturartenspezifische Charakteristiken auf, wodurch eine Trennbarkeit grundsätzlich möglich wird.
- Bei der kulturartenspezifischen Betrachtung der Radarrückstreuung einzelner Schläge fällt zu bestimmten Terminen eine z.T. große Variation (bis zu 6 dB) innerhalb der Nutzungsklassen auf. Für Getreide kann eine geringere räumliche Variabilität der Rückstreuung während der Periode maximaler Biomasse festgestellt werden. Bei Hackfrüchten nimmt die Streuung zwischen den Schlägen nach Reihen- bzw. Bestandes-schluß deutlich ab, da ab diesem Zeitpunkt der Bodeneinfluß durch die Vegetations-schicht stark unterdrückt wird.
- Im Vergleich zu den anderen Fruchtarten verändern sich die Rückstreuwerte der Getreidearten im Verlauf einer Vegetationsperiode wesentlich stärker. Dieses Phänomen läßt sich dadurch erklären, daß das C-Band hauptsächlich auf Halme und kleine Blätter reagiert.
- Die Getreidearten WW, WG und SG (aber auch Roggen und Triticale) dämpfen die Radarrückstreuung am stärksten in der Zeit ab dem Schossen, vor allem aber zum Ährenschieben (Anfang Mai bis Juni, EC 30 bis EC 59). In dieser Zeit ist die Radarrückstreuung minimal.

¹ Nicht in Abb. 7-21 dargestellt.

- Der interannuelle Vergleich der Rückstreuprofile ergibt für die einzelnen Fruchtarten zwar tendenziell gleichartige Verläufe, die jedoch aufgrund unterschiedlicher phänologischer Bedingungen in den Untersuchungsjahren parallel zur Zeitachse verschoben sind.
- Die interannuelle Stabilität der Rückstreusignaturen ist bei Getreide höher als bei Hackfrüchten.
- Der Verlauf der Radarrückstreuung kann durch zeitlich und räumlich variierend auftretende Störeinflüsse beeinflusst werden (z.B. Niederschlag/Bodenfeuchte, Wind).
- Das Rückstreusignal zeige eine signifikante Abhängigkeit von der orbitalen Aufnahmeposition. Unterschiedliche Aufnahmepositionen zweier benachbarter Tracks, die im gegebenen Fall einen um $3,7^\circ$ veränderten Einstrahlwinkel bedeuten, führen zu unterschiedlichen Rückstreiquerschnitten von durchschnittlich 1,5 bis 2,5 dB. Damit können die zusätzlichen ERS-Szenen des benachbarten Tracks nicht unmittelbar in die Zeitreihenanalysen eingebunden werden¹.
- Zur Trennung von Kulturarten mittels ERS-Radarrückstreuung sind in erster Linie Szenen im Zeitraum zwischen März und Juli entscheidend, wobei die besten Trennungsmöglichkeiten von Mitte Mai bis Mitte Juli gegeben sind.
- Im einzelnen ist die Trennbarkeit zwischen Getreide und Hackfrüchten gut möglich. Zwischen verschiedenen Getreidearten kann nur bedingt unterschieden werden, wohingegen die Trennbarkeit zwischen verschiedenen Hackfrüchten als deutlich eingeschränkt zu bezeichnen ist.

¹ Damit ist nicht ausgeschlossen, daß diese Bilder im Zusammenhang mit der Klassifizierung von Bedeutung sein können.

8 Klassifizierung

SAR-Bilddaten eignen sich - wie aus Kapitel 2 hervorgeht - nur begrenzt für eine direkte statistische Klassifizierung. Dies ist in erster Linie auf die durch *Speckle* verursachte Störung zurückzuführen, die auch in vermeintlich homogenen Bildbereichen eine große Signalvarianz verursacht. Als Folge daraus kommt es zu einer erheblichen Überschneidung der Objektklassen im Merkmalsraum, die zu einer entsprechend hohen Fehlerrate bei der Klassenzuweisung durch einen Klassifikator führt (BÄHR & VÖGTLE 1998). Bekannte Klassifizierungsverfahren aus dem Bereich optischer Sensoren, bei denen die Klassenzuordnung einzelner Pixel aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften problemlos möglich ist, scheitern daher bei einer Übertragung auf SAR-Daten.

Auch durch die Anwendung diverser vorgeschalteter Filtertechniken (Lee-, MAP-, GMAP- oder Frost-Filter) bleiben die Ergebnisse pixelbezogener Ansätze unbefriedigend. Zwar kann das Signal-Rausch-Verhältnis durch die Unterdrückung hochfrequenter Störungen meistens deutlich verbessert werden, gleichzeitig werden aber auch hochfrequente Anteile des Nutzsignals ausgefiltert, was mit einem Verlust der geometrisch-räumlichen Parzellenstruktur verbunden ist und sich durch verschwommene Bildkanten äußert. Die Folge sind erhebliche Fehlklassifizierungen entlang von Bildkanten (BÄHR & VÖGTLE 1998).

Eine Reduzierung der Fehlerrate kann durch einen schlagbezogenen Klassifizierungsansatz erreicht werden. Dieser Ansatz bildet in Kombination mit weiteren Maßnahmen den Kern der radarspezifischen Klassifizierung, deren Prinzip im folgenden vorgestellt werden soll.

8.1 Klassifizierungsstrategie

Um das eingeschränkte Klassifizierungspotential der monofrequenten, einfachpolarisierten ERS SAR-Daten zu erweitern, wird eine Klassifizierungsstrategie entwickelt, die die Besonderheiten von SAR-Daten berücksichtigt und ihren Informationsgehalt optimal ausnutzt. Die wichtigsten Merkmale dieser Strategie sind:

1. Schlag- statt pixelbezogene Klassifizierung individueller landwirtschaftlicher Schläge.
2. Multitemporale Klassifizierung von SAR-Zeitreihen auf der Basis mittlerer schlagbezogener Rückstreuintensitäten.
3. Einbeziehung weiterer Merkmale aus der Signalvariation und des Grauerthistogramms eines Schlages. Hierzu zählen lokale statistische Kennwerte erster Ordnung, wie Varianz, Variationskoeffizient, Exzeß und Schiefe. Die Merkmalsextraktion erfolgt anhand nichtgeocodierter, ungefilterter SLC-Daten.

4. Einbeziehung von Kohärenzinformationen aus interferometrisch verarbeiteten Bildpaaren der ERS-Tandem-Mission¹.

Die unter 3. und 4. genannten Merkmale werden nur dann bei der Klassifizierung berücksichtigt, wenn sie zusätzliche Informationen beinhalten und signifikant zur Verbesserung der Klassifizierungsgenauigkeit beitragen. Die Prüfung und Auswahl geeigneter Merkmale wird anhand einer Diskriminanzanalyse durchgeführt.

Weitere Merkmale der Klassifizierungsstrategie ergeben sich aus der Anbindung an das aufgebaute Geoinformationssystem sowie der Kombination mit Bilddaten optischer Sensoren:

1. Aufteilung des Untersuchungsgebietes in physiogeographisch homogene Raumeinheiten unter Einbeziehung zusätzlicher Geoinformationen (Bodenkennwerte, Niederschlag, Phänologie, Relief).
2. Maskierung von nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen (Wald, Gewässer, Siedlung) mit Hilfe von ATKIS-Daten.
3. Multisensorale Klassifizierung durch Kombination von ERS- und optischen Bilddaten (Landsat TM, IRS-1C PAN bzw. SPOT PAN).

Die gesamte Prozeßkette zur schlagbasierten, multitemporalen ERS-2 Klassifizierung ist in Abb. 8-1 dargestellt.

Wie aus Abb. 8-1 hervorgeht, erfolgt die Extraktion der Bildparameter unmittelbar aus den koreferenzierten *Slant-Range*-Daten, was eine Transformation der Schlaggrenzen in die verzerrte Geometrie der Radardaten erforderlich macht. Dieser Verarbeitungsschritt ist nötig, um einer möglichen Verfälschung der *Speckle*-Statistik, bedingt durch die Geocodierung, vorzubeugen. Auch die interferometrische Bearbeitung zur Ableitung der Kohärenzwerte läßt sich nur mit den sensornahen Original-*Slant-Range*-SLC-Daten durchführen.

Die Klassifizierung der Fruchtarten erfolgt mit Hilfe des *Maximum-Likelihood*- bzw. eines Neuronalen Netz-Klassifikators. Anhand einer Identifizierungsnummer (Schlag-ID) werden die Klassifizierungsergebnisse mit den Schlag-Polygonen in Gauß-Krüger-Koordinaten verknüpft und dem GIS als fertige Fruchtartenkarte zugeführt.

Die Definition der Zielklassen orientiert sich an den am häufigsten vorkommenden Ackerkulturen im Untersuchungsgebiet, wobei zwei Klassifizierungsvarianten mit sechs bzw. elf Zielklassen gegenübergestellt werden.

¹ Die ERS Tandem-Mission wurde im Juni 1996 von der ESA beendet. Daher standen für diese Arbeit nur vier Bildpaare zwischen März und Juni 1996 zur Verfügung.

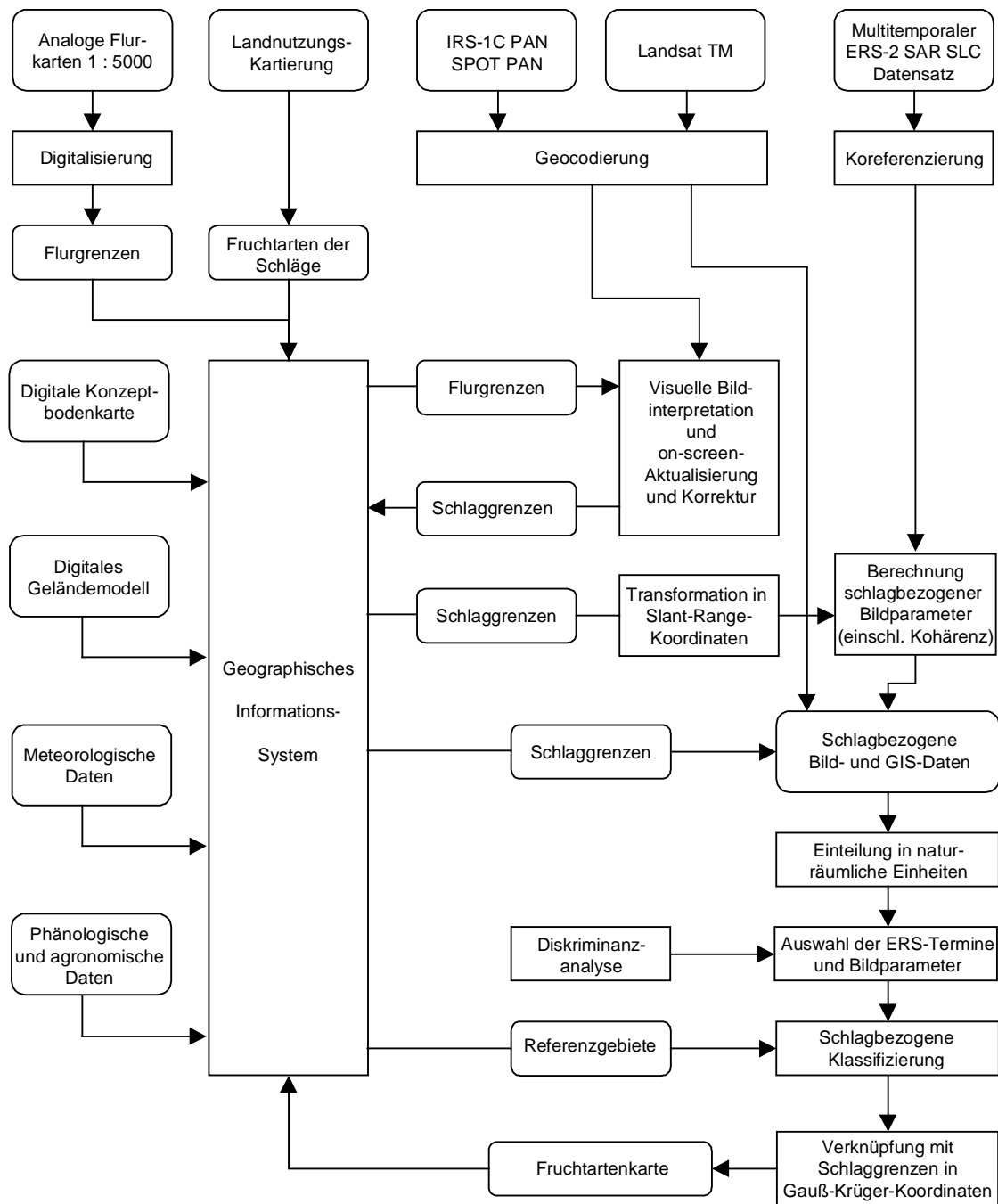


Abb. 8-1: Prozeßkette der schlagbasierten multitemporalen ERS-2 Klassifizierung mit Hilfe topographischer Flurkarten, Landnutzungskartierungen und Bilddaten optischer Sensoren

8.1.1 Schlagbezogene Klassifizierung

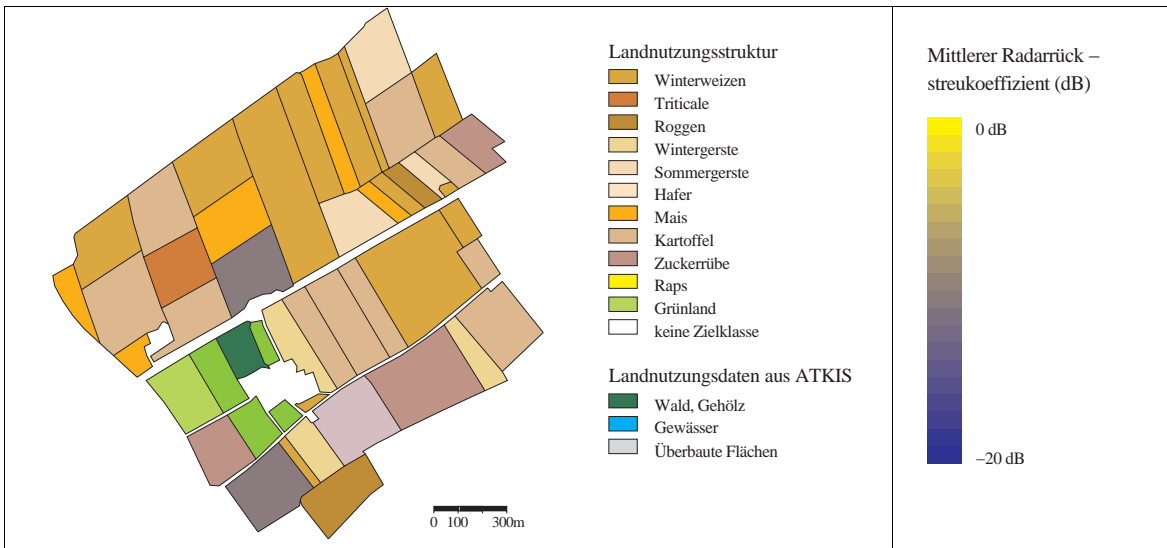
Der schlagbezogene Klassifizierungsansatz behandelt landwirtschaftliche Schläge als individuelle Objekte, aus denen bildstatistische Kennwerte abgeleitet werden können. Diese Kennwerte stellen Informationsebenen dar, aus denen die Bildkanäle für die Klassifizierung ausgewählt werden. Ein wichtiger Informationsträger ist dabei der Mittelwert der Signalintensitäten in Gebieten mit konstanter Signalkomponente, da er die *speckle*-bedingte Störung effektiv reduziert (BÄHR & VÖGTLE 1998). Neben dem Mittelwert dienen die Streumaße *Standardabweichung* und *Variationskoeffizient* sowie die Histogramm-Formparameter *Verteilungsschiefe* und *Exzeß* als zusätzliche Informationen.

Weitere schlagbezogene Kennwerte können aus dem DGM und der digitalen Bodenkarten abgeleitet werden. Wichtige Informationen sind dabei die Bodenart des Oberbodens sowie die Hangneigung in Kombination mit der Exposition zum SAR-Sensor. Im Gegensatz zu den aus den SAR-Daten abgeleiteten Kennwerten sind diese im GIS vorgehaltenen Daten im allgemeinen zeitinvariant.

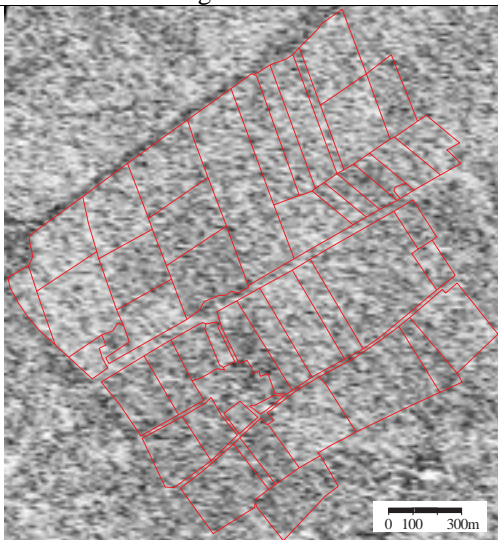
Voraussetzung für eine schlagbezogene Klassifizierung sind digitale Schlaggrenzen, die die aktuelle Landnutzungsstruktur der landwirtschaftlichen Schläge abbilden. Die Erzeugung der digitalen Schlaggrenzen erfolgte durch die Digitalisierung von Flurkarten im Maßstab 1 : 5000 und anschließender Aktualisierung anhand hochauflösender panchromatischer Bilddaten des IRS-1C bzw. SPOT (s. Kap. 6.1.6).

Diese zeitintensive Methode ist für operationelle Anwendungen von Fernerkundungsdaten, die großflächige Auswertungen zum Ziel haben, nicht praktikabel. Eine mögliche Alternative zur Lösung dieser Problematik stellen automatisierte Bildsegmentierungsverfahren dar. Ziel einer Segmentierung ist ein in Regionen aufgeteiltes Bild, dessen Segmente in bezug auf die zu extrahierenden Objektklassen (z.B. landwirtschaftliche Schläge) spektral homogen sind und daher sinnvolle Einheiten bilden. Ansätze, die diesen Zweck erfüllen, basieren überwiegend auf Kantendetektion, d.h. die Bestimmung von Bereichen starker Änderung der Werte oder auf Regionendetektion (*region growing*), d.h. die Bestimmung von Bereichen weitgehend gleicher Werte. Zur Segmentierung eignen sich insbesondere kontrastreiche Bilddaten optischer Sensoren. Gute Ergebnisse können aber auch mit multitemporalen Radardaten erzielt werden (WHITE 1994). Im Rahmen von EMAP wurde hierzu ein neues Verfahren zur Segmentierung von SAR-Daten entwickelt (GÜNZL & HELLWICH 2000), das in vorliegender Arbeit allerdings noch nicht berücksichtigt werden konnte.

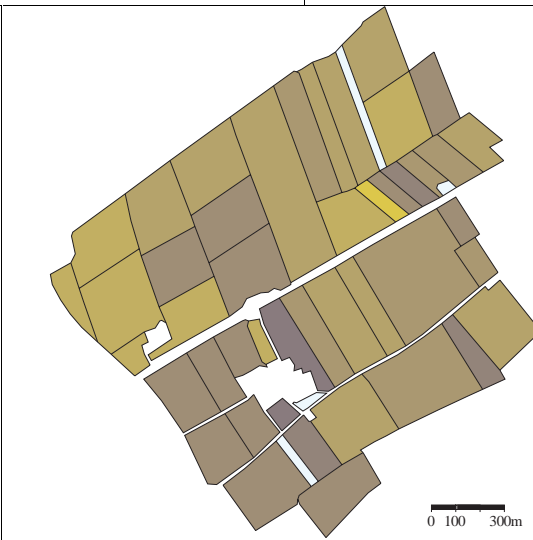
Der Vorteil der schlagbasierten Klassifizierungsmethode wird durch Abb. 8-2 verdeutlicht. Die in der linken Spalte dargestellten einzelnen ERS SAR-Aufnahmen zeigen die Dominanz des *Speckle*. Einzelne Schläge können nur vage und nur zu bestimmten Aufnahme-terminen indentifiziert werden. In der rechten Spalte sind die entsprechenden mittleren Rückstreuwerte in Dezibel dargestellt, die mit Hilfe der digitalen Schlaggrenzen aus den SAR-Aufnahmen berechnet wurden (s. Kap. 4.9).



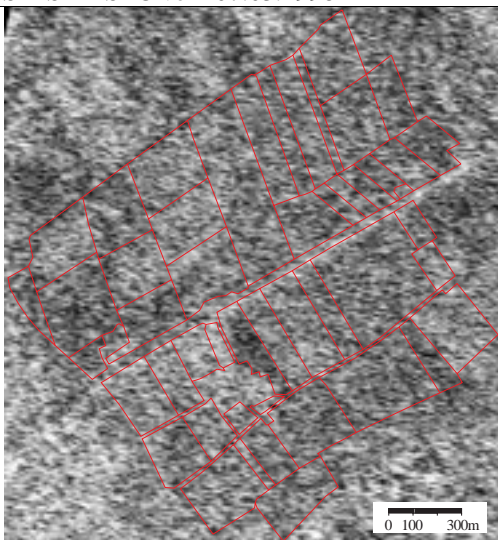
Kartierte Landnutzung 1998 im Bereich Unterschleißheim



ERS-2 SAR SLC vom 07.03.1998



Schlagbezogene mittlere Rückstreuwerte 07.03.1998



ERS-2 SAR SLC vom 11.04.1998



Schlagbezogene mittlere Rückstreuwerte 11.04.1998

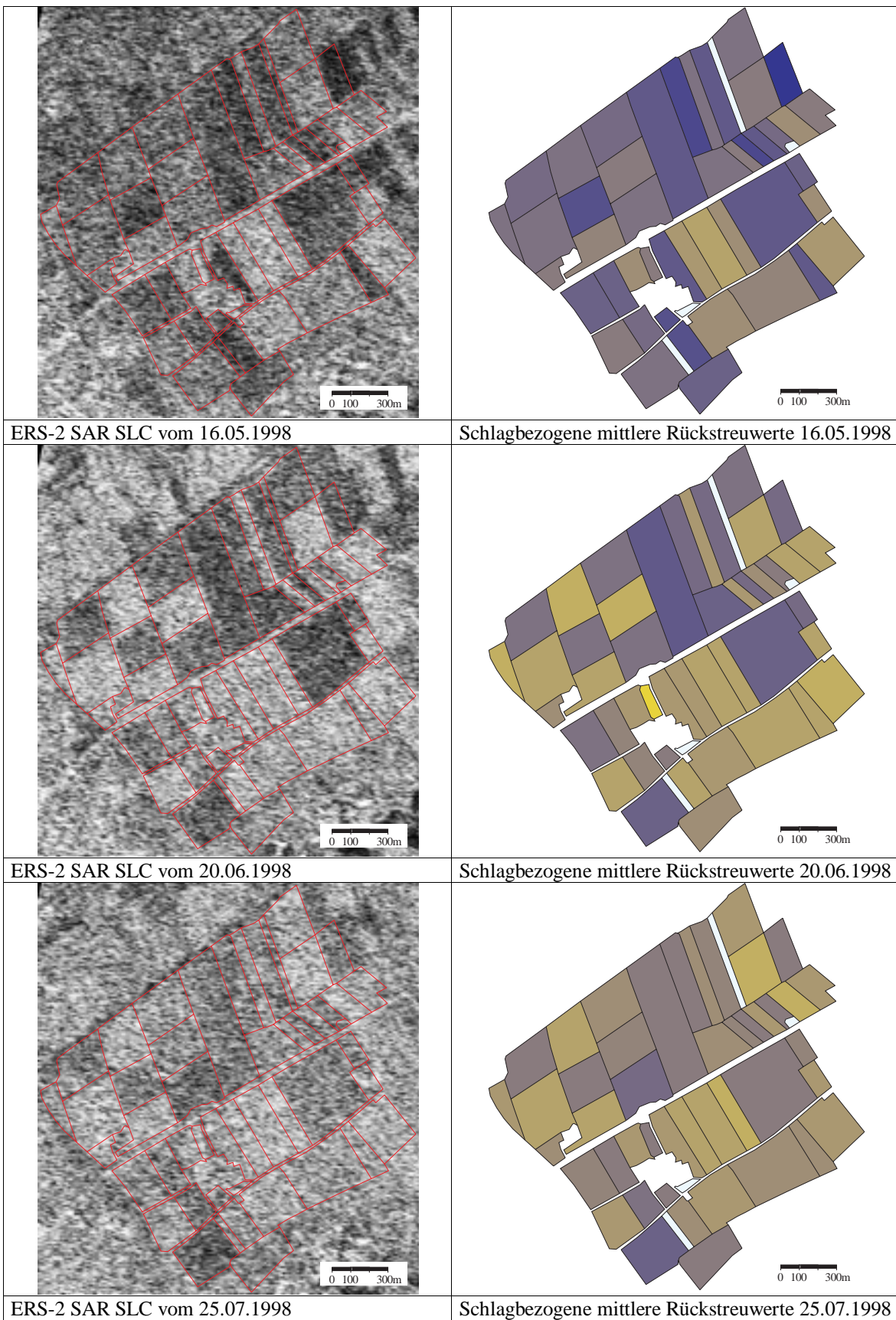


Abb. 8-2: Schlagbezogene mittlere Rückstreuwerte der ERS-2 Zeitreihe vom 07.03.-25.07.1998

Betrachtet man obige Abbildung unter dem Aspekt der zeitlichen Abfolge und der gegebenen Landnutzungsinformation, kann folgendes festgestellt werden:

1. Allgemeine Abnahme der Radarrückstreuung mit aufkommender Vegetation zwischen März und Mai (SAR-Bilder erscheinen zunehmend dunkler).
2. Zunahme der Kontraste mit dem Mai-Termin, da die mittlere Rückstreuung einiger Fruchtarten bereits wieder zunimmt (helle Flächen im SAR-Bild bzw. gelb-grüne Flächen in der Karte). Die Umrisse einzelner Schläge werden erkennbar.
3. Die Stärke der Veränderungen der Rückstreuungen zwischen den 35-Tage-Intervallen scheint mit den Fruchtarten zu korrespondieren. Beispiele dafür sind die nahezu unveränderten Rückstreusignale von Kartoffel oder Zuckerrübe zwischen dem 11.04. und 16.05., da in dieser Zeitspanne auch keine signifikanten Veränderungen der Vegetation zu beobachten sind (Flächen sind noch überwiegend vegetationsfrei). Die tendenziell leichte Abnahme der Rückstreuung bei Mais (ca. 1 dB) kann eventuell auf eine geringere Bodenrauhigkeit durch Saatbeetbereitung zurückgeführt werden. Die Rückstreuung von Winterweizen und Wintergerste nimmt hingegen stark ab, bedingt durch die große Zunahme der Biomasse. Darüber hinaus korrelieren Schläge mit starker Abnahme der Rückstreuung zwischen dem 16.05. und dem 20.06. mit der Fruchtart Sommergerste (Längenwachstum und Biomassezunahme), wobei die Rückstreuquerschnitte von Wintergerste und Roggen gleichzeitig deutlich ansteigen (beginnende Abreife).

Grundsätzlich sei bemerkt, daß es sich bei den Rückstredifferenzen $\Delta\sigma^0$ lediglich um eine Transformation und nicht um eine Erweiterung der Informationsgehaltes handelt. Inwiefern die Rückstredifferenzen dennoch als zusätzliche Bildkanäle zur Fruchtartenidentifizierung beitragen, soll anhand der Diskriminanzanalyse überprüft werden. ZMUDA et al. (1994) konnten mit Hilfe eines vergleichbaren Ansatzes (*Change Detection Thresholding*) zeigen, daß die Rückstredifferenzen multitemporaler ERS-Daten ein hohes Klassifizierungspotential besitzen.

8.1.2 Aufteilung des Untersuchungsgebietes in naturräumliche Einheiten

Ein weiterer Aspekt, der entscheidend zu einer Verbesserung der Klassifizierung größerer Bildausschnitte beitragen kann, ist die Aufteilung des Untersuchungsgebietes in physiographisch homogene Einheiten anhand von sogenannten a priori Informationen (LEMOINE & KIDDS 1998). Hierbei sind drei Aspekte von Bedeutung:

1. Die räumliche Verteilung und Häufigkeit bestimmter Fruchtarten bzw. -folgen ist eng an die pedologischen, klimatologischen und topographischen Gegebenheiten gebunden. Daraus ergeben sich Gewichtungsfaktoren, die bei der Klassifizierung als a priori Wahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden können.
2. Die Güte einer multitemporalen Klassifizierung hängt in entscheidendem Maße von der Homogenität der radarrelevanten Pflanzen- und Bodenparameter (Biomasse, Wuchshöhe, Wassergehalt, Rauigkeit) einzelner Bodenbedeckungsklassen zu bestimmten ERS-Aufnahmetermen ab. Durch die Aufteilung des Datensatzes anhand phäno-

logischer, agrarklimatologischer und pedogener Standortfaktoren kann ein möglichst synchroner Verlauf der Pflanzenentwicklung innerhalb einer naturräumlichen Einheit erwartet werden.

3. Untersuchungen zur Bodenfeuchte (s. Kap. 9.3) zeigen, daß bei vegetationsfreien Oberflächen Korrelationen zwischen der Radarrückstreuung und der Bodenfeuchte bestehen. Die oberflächennahe Bodenfeuchte wird ihrerseits maßgeblich durch die Wasserhaushaltskennwerte (z.B. nutzbare Feldkapazität) der obersten Bodenschicht und des damit verbundenen Abtrochnungsverhaltens bestimmt, die von den Basiskennwerten *Korngrößenverteilung*, *Lagerungsdichte*, *Humusgehalt* und *Grobbodenanteil* abhängen. Eine Gliederung des Untersuchungsgebietes auf der Basis charakteristischer Substrate kann daher besonders für frühe ERS-Aufnahmetermine zu einer verbesserten Unterscheidung der Bodenbedeckungsklassen führen.

Die räumliche Aufteilung des Untersuchungsgebietes basiert konkret auf Reliefparametern (Hangneigung, Höhe über NN) und Bodenparametern (Bodentyp, Bodenart, ökologische Feuchte, Grundwasserstufe, C_{org} -Gehalt, Grobbodenanteil), die aus dem DGM (Abb. 8-3a) bzw. der digitalen Bodenkarte (Abb. 8-3b) abgeleitet wurden¹.

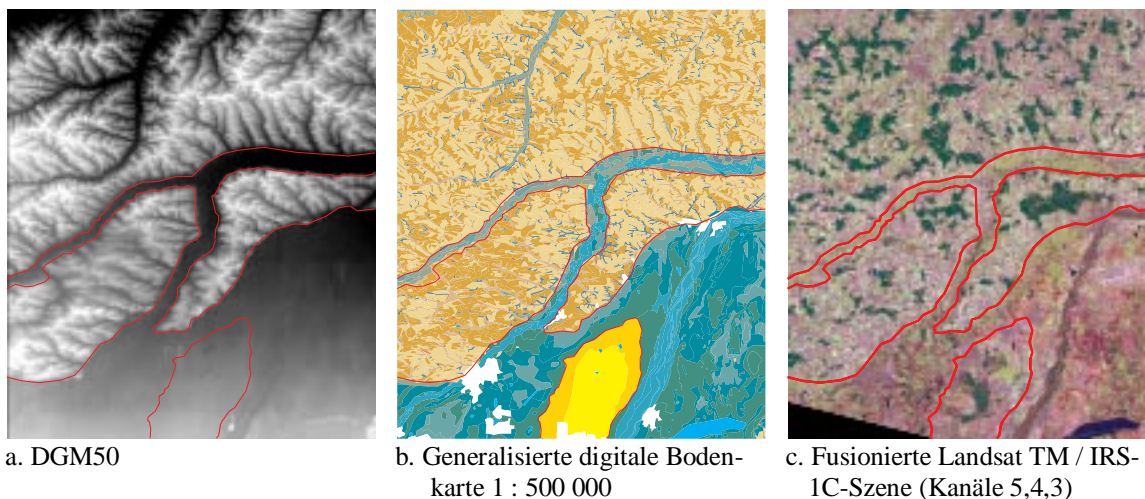


Abb. 8-3: Datengrundlage der Grobsegmentierung des Untersuchungsgebietes (Maßstab 1 : 720 000)

Weitere Einteilungskriterien ergeben sich aus den spektralen Eigenschaften von Bilddaten optischer Satellitensysteme (Landsat TM- und IRS-1C-Daten) und phänologischen Daten aus dem Klimaatlas von Bayern (Bayerischer Klimaforschungsverbund 1996). Insbesondere die Bilddaten optischer Sensoren zeichnen sehr deutlich Regionen unterschiedlicher Bo-

¹ Die Bodentypen der digitalen Konzeptbodenkarte wurden zur besseren Übersicht stark generalisiert: Grundwasserferne Böden aus äolischen Deckschichten und aus Vorlandmolasse (Braunerden; Parabraunerden) prägen das Tertiärhügelland (braune Farbtöne in Abb. 8-3b). Die Böden aus holozänen und junpleistozänen Schottern stellen die trockenen Sonderstandorte der Nördlichen Münchener Schotterebene dar (gelbe Farbtöne in Abb. 8-3b). Die überwiegend hydromorphen Böden (Gleye, Niedermoore und Auenböden) bilden das dritte Teilgebiet (grün-blaue Farbtöne in Abb. 8-3b).

denfeuchte und Vegetationsklassen nach, die räumlich mit den Relief- und Bodenparametern korrespondieren (Abb. 8-3c).

Aus der Synopse obiger Einteilungskriterien gehen drei Teilgebiete hervor (rote Linien in Abb. 8-3), die sich bezüglich ihres Reliefs, ihrer typischen Bodengesellschaften und agrarklimatologischer Verhältnisse deutlich voneinander unterscheiden und eine enge räumliche Korrelation mit der Standortkundlichen Landschaftsgliederung von Bayern nach WITTMANN (1983) sowie der Einteilung Bayerns in landwirtschaftliche Erzeugungs- und Agrargebiete nach WÜRFL et al. (1984) aufweisen. Tab. 8-1 faßt die wichtigsten Einteilungsmerkmale zusammen und zeigt typische Landschaftsausschnitte der Teilgebiete:

Tab. 8-1: Naturräumliche Gliederung des Untersuchungsgebietes unter radar-relevantem Aspekt

Tertiärhügelland (THL)	Nördliche Münchener Schotterebene (NMS)	Niedermoorgebiete bei Erdinger und Dachau und Auengebiet der Isar (DEM)
Relief: flachwellig bis hügelig	Relief: flach	Relief: flach
Leitboden: Braunerde und Parabraunerde	Leitboden: Ackerrendzina	Leitboden: Übergangsmoor, Niedermoor, Moorgleye
Besonderheiten: geringer bis mäßiger Humus- und Steingehalt im Oberboden	Besonderheiten: mäßig bis hoher Humus- und sehr hoher Steingehalt im Oberboden	Besonderheiten: sehr hoher Humus- und geringer Steingehalt im Oberboden
		

Die Aufteilung des Untersuchungsgebietes in drei naturräumliche Einheiten spiegelt sich auch in den spezifischen Anbauverhältnissen wider (Tab. 8-2).

Die ungleiche Kulturartenverteilung wird besonders an den hohen Anteilen von Winterweizen, Mais und Wintergerste im Tertiärhügelland deutlich, die zusammengefaßt fast zwei Drittel der gesamten Ackerfläche einnehmen. Die überwiegend schluffigen, gut wasserversorgten Böden des Tertiärhügellands bieten für Getreide optimale Standortbedingungen.

Charakteristisch für die gut gedränten, grundwasserfernen Schotterböden nördlich von München ist dagegen ein hoher Anteil von Sommergerste (Braugerste), da viele Standorte aufgrund ungenügender Wasserversorgung nicht weizenfähig sind. Die steinigten, aber lokaleren und gut durchlüfteten Böden werden auch den Ansprüchen von Kartoffeln gerecht.

Die größten Mais-Anteile befinden sich auf den überwiegend hydromorphen, stark humosen Böden der angrenzenden Niedermoorgebiete (Erdinger- und Dachauer Moos), da Mais auch auf staunassen, ehemals grünlandgenutzten Böden gute Wuchsbedingungen vorfindet.

Tab. 8-2: Prozentuale Anteile der Hauptfruchtarten an der Ackerfläche, differenziert nach Naturräumen auf Basis der Landnutzungskartierungen 1996-1998

Jahr	Naturraum	Flächennutzung in Prozent				Anbauverhältnisse in Prozent der Ackerfläche (AF)							
		Gesamtfläche		Landw. genutz. Fläche (LF)		WW (1)	WG (2)	SG (3)	MA (4)	RA (5)	KA (6)	Σ 1-6	Sonst.
		LF	Wald	AF	Grünland								
1996	THL	88,9	11,1	69,5	30,5	26,0	15,8	5,4	21,2	8,1	0,9	77,4	22,6
	NMS	96,6	3,4	80,9	19,1	13,6	9,8	18,5	11,7	7,8	14,3	75,7	24,3
	DEM	95,8	4,2	83,8	16,2	21,5	6,1	13,3	22,9	0,9	11,1	75,8	24,2
1997	THL	88,9	11,1	69,9	30,1	27,0	17,1	7,2	21,8	3,9	0,9	77,9	22,1
	NMS	96,6	3,4	80,5	19,5	14,1	6,6	18,9	13,7	9,5	12,5	75,3	24,7
	DEM	95,8	4,2	83,2	16,8	14,7	6,5	14,8	29,3	1,5	9,6	76,4	23,6
1998	THL	88,9	11,1	71,3	28,7	27,8	19,2	4,1	21,2	5,9	0,9	79,1	20,8
	NMS	96,6	3,4	77,9	22,1	12,0	10,8	17,9	10,5	6,3	15,1	72,6	27,3
	DEM	95,8	4,2	83,9	16,1	22,9	5,7	10,5	23,3	0,7	10,0	73,1	26,9

Die Grenzen der definierten naturräumlichen Einheiten sind auch in Abb. 6-2 (Kap. 6) dargestellt.

8.1.3 Integration von Kohärenzdaten

Die Kohärenz (siehe Kapitel 2.6.1) ist für viele praktische Anwendungen von Interesse, da sie mit den Intensitätswerten praktisch nicht korreliert ist. Um diesen Sachverhalt zu demonstrieren, wurde die Grauwert- und Kohärenzstatistik für jede Vegetationsart getrennt analysiert (KÜHBAUCH et al. 1999). Abb. 8-4 zeigt rechts oben die Verteilung der kalibrierten ERS-2 Rückstreuwerte in Dezibel und rechts unten die entsprechende Verteilung der Kohärenzwerte.

Während sich der Mais im Kohärenzbild gut von der übrigen Vegetation abhebt, läßt er sich im Intensitätsbild schlecht trennen. Die Maisschläge zeigen sich im Intensitätsbild wegen der Abhängigkeit ihrer Rückstreuwerte von der Reihenrichtung mit sehr unterschiedlichen Grauwerten, erkennbar an der breiten Verteilungskurve. Im Kohärenzbild hingegen zeigen alle Maisschläge einheitlich hohe Kohärenzwerte. Winterraps zeigt sich im Intensitätsbild mit hohen Rückstreuwerten und weist im Kohärenzbild die niedrigsten Kohärenzwerte auf.

Bei der Kohärenz handelt es sich offensichtlich um zusätzliche, aus den Radarbildern gewonnene Bildinformationen, die für die unterschiedlichen Veränderungen der Vegetationsarten typisch ist.

Inwiefern die Kohärenzinformation zur Verbesserung der Klassifizierungsergebnisse beitragen kann, wird im Zusammenhang mit den Klassifizierungsergebnissen diskutiert (s. Kap. 8.4).

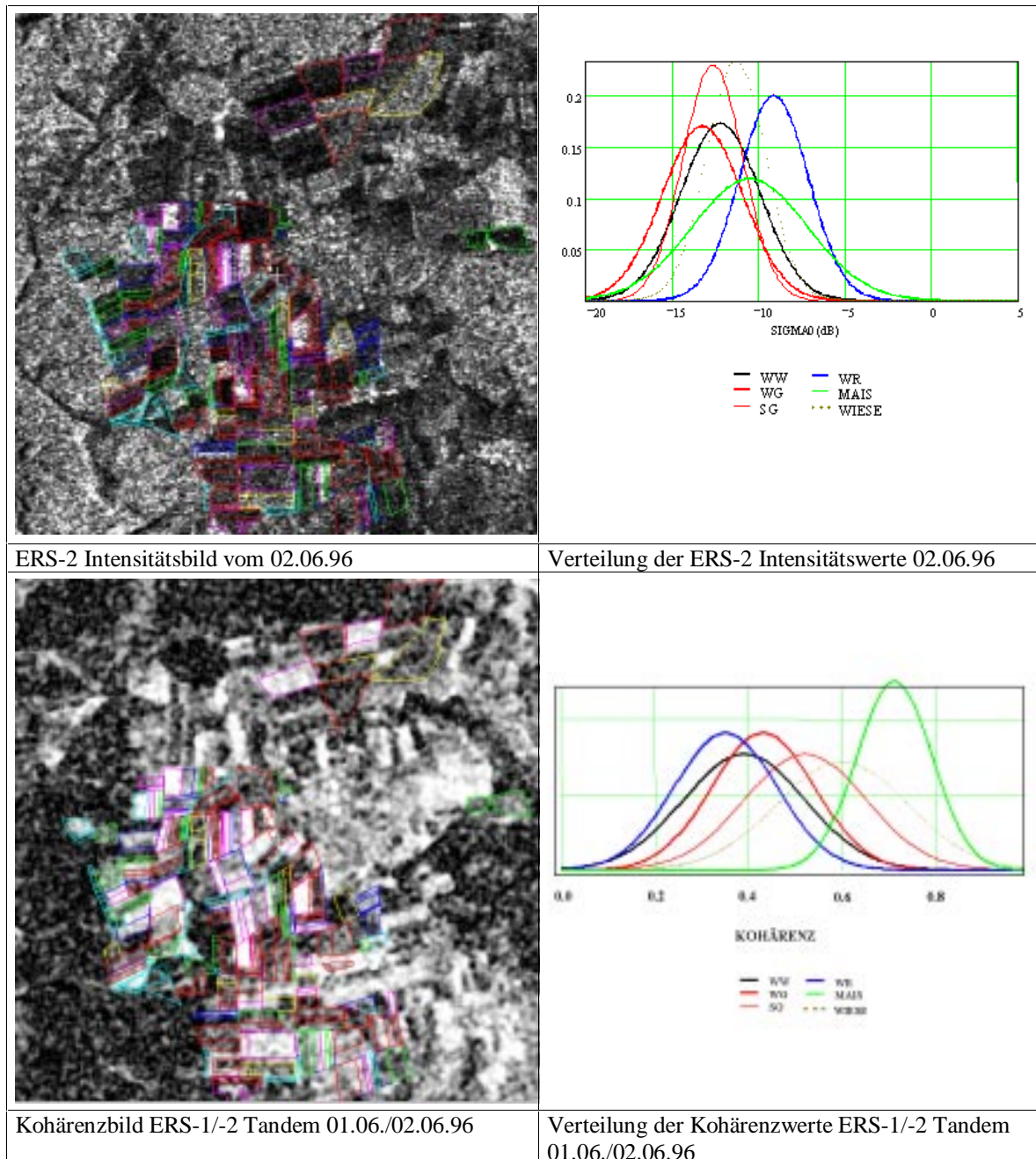


Abb. 8-4: Vergleich zwischen ERS-Intensitätswerten und Kohärenzwerten einzelner Fruchtarten (nach KÜHBAUCH et al. 1999, S. 85)

8.1.4 Kombination von ERS- und optischen Fernerkundungsdaten

Neben den multitemporalen ERS-Daten werden auch Multispektraldaten des Landsat TM und panchromatische Bilddaten des SPOT bzw. IRS-1C als Zusatzkanäle in die Klassifizierung einbezogen. Dadurch ist es möglich, im direkten Vergleich die mit den unterschiedlichen Sensoren erzielbaren Klassifizierungsgenauigkeiten unter sonst gleichen Bedingungen gegenüberzustellen. So kann geklärt werden, ob und ab welchem Vegetations-

stadium mit Radardaten vergleichbare und ausreichend genaue Klassifizierungsergebnisse wie mit Daten optischer Sensoren erzielt werden können.

Es sei erwähnt, daß auch für die Bilddaten optischer Sensoren eine schlagbezogene Klassifizierung durchgeführt wird, die auf den mittleren Grauwerten der einzelnen Spektralkanäle beruht.

8.2 Ausgewählte überwachte Klassifizierungsverfahren

Zur überwachten Klassifizierung wird die parametrische *Maximum Likelihood* (ML) Entscheidungsregel und ein nichtparametrisches Neuronales Netz eingesetzt. Beide Verfahren gehören in der Regel zum Standard kommerzieller Bildverarbeitungsprogramme. Ihre übliche pixelbasierte Anwendung wird auf den objektorientierten Ansatz übertragen, so daß jeder Schlag einem Pixel entspricht. Voraussetzung dafür ist, daß eine genügend große Anzahl von Schlägen mit bekannter Landnutzung gegeben ist, um unabhängige Trainings- und Validierungsdatensätze ausweisen zu können.

Im vorliegenden Fall dienen die Daten der Meß- und Boniturkampagne (Ground Truth Stufe 1 und 2) zur Trainierung des Klassifikators (ca. 150 bis 180 Schläge). Die Validierung der Ergebnisse findet anhand der umfangreichen Daten der Landnutzungskartierung statt. Die Anzahl der Validierungsschläge beträgt ca. 890 Schläge, nachdem eine Pufferung der Schlaggrenzen um 20 m durchgeführt wurde¹.

Da die verwendeten Klassifikatoren zu den Standardverfahren der Bildanalyse zählen, sollen ihre Eigenschaften im folgenden nur knapp skizziert werden. Detaillierte Beschreibungen sind der angegebenen Literatur zu entnehmen (BÄHR & VÖGTLE 1998; LILLESAND & KIEFER 1994; RITTER et al. 1990; RUMMELHART et al. 1986; SEGL 1996; ERDAS *Field Guide* 1994).

8.2.1 Neuronale Netze

Als Neuronales Netz-Klassifikator wird ein *Back-Propagation*-Netzwerk (BPN) eingesetzt. BPN gehört als überwachtes Klassifizierungsverfahren zur Gruppe der geschichteten *Feedforward*-Netzwerke, bei denen die Neuronen in mehreren aufeinanderfolgenden Schichten angeordnet sind. Je zwei benachbarte Schichten sind durch Neuronenverbindungen vollständig vernetzt, so daß ein Eingabesignal von der Eingabeschicht² sukzessive über die innere(n) Schicht(en) (*hidden units*) zur Ausgabeschicht geleitet wird (Abb. 8-5). Aufgrund der fixierten Richtung der Signalausbreitung werden solche Netze als *Feedforward*-Netzwerke bezeichnet (BÄHR & VÖGTLE 1998; RITTER et al. 1990).

¹ Aufgrund der geringen Schlaggrößen und der oft schmalen, langgestreckten Parzellen reduzierte sich die Flächenanzahl von ursprünglich 2875 kartierten Schläge auf 892.

² Die Eingabeschicht wird nicht als echte Neuronenschicht betrachtet, da sie nur die Aufgabe einer Signalverteilung besitzt (BÄHR & VÖGTLE 1998).

Die Neuronen, die die Knoten des Netzwerkes bilden, sind einfach strukturierte Verarbeitungseinheiten, die mehrere Signaleingänge und einen Signalausgang besitzen. Sie sollen wie ihr biologisches Vorbild funktionieren, indem sie sich durch die anliegenden Eingangssignale in einen bestimmten Ausgangszustand versetzen lassen und dieses Ausgangssignal an die Neuronen der nächsten Schicht weitergeben (Abb. 8-5). Neuronen, die oft gleichzeitig aktiv sind, verstärken ihre synaptischen Verbindungen (exzitatorische Synapsen) und umgekehrt (inhibitorische Synapsen). Die Verbindung zwischen den Neuronen ändert sich somit proportional zur korrelierten Aktivität vor und hinter dem Neuron, was als synaptische Plastizität bezeichnet wird (BÄHR & VÖGTLE 1998).

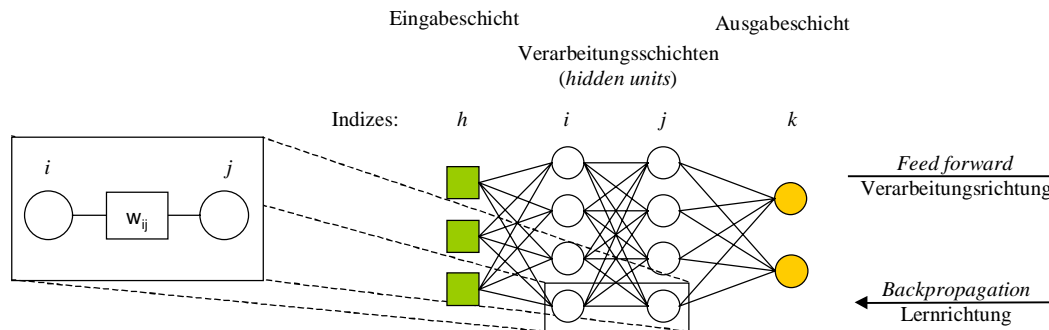


Abb. 8-5: Netzwerktopologie eines mehrschichtigen *Feedforward Backpropagation* Netzes

Das Basismodell eines Neurons, das den meisten künstlichen Neuronalen Netzen als Grundbaustein dient, stützt sich im wesentlichen auf die Vereinfachung von MCCULLOCH & PITTS (1943). Danach besteht ein Neuron aus einer Additionseinheit und einem Schwellenwert (Bias). Die Eingangssignale x_i werden an den Synapsen mit einem spezifischen Gewicht w_i multipliziert und aufsummiert (Abb. 8-6).

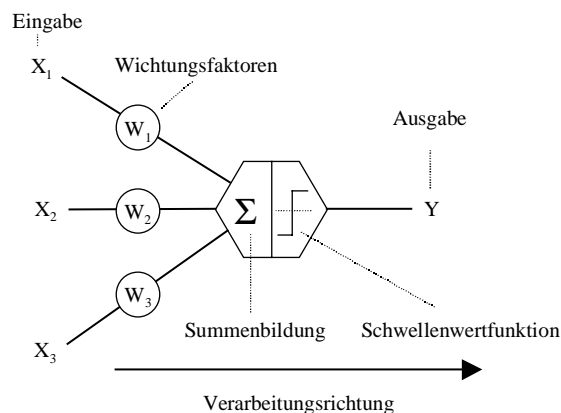


Abb. 8-6: Neuronenmodell nach MCCULLOCH & PITTS (in HERTZ 1991)

Überschreiten die aufsummierten Signale x_i den Schwellenwert, so sendet das Neuron selbst ein Signal aus. Die Ausgabe- bzw. Aktivierungsfunktion bestimmt in Abhängigkeit

vom Aktivierungswert die Stärke des weitergeleiteten Signals. Im einfachsten Fall wird das Ausgabesignal der Verarbeitungsschichten binarisiert, wie in Abb. 8-6 dargestellt. Da bei großen Signalstärken neurologische Sättigungseffekte auftreten können, werden anstelle der binären Stufenfunktion in der Regel stetige, differenzierbare und nichtlineare Ausgabefunktionen gewählt (z.B. Fermifunktion, hyperbolische Tangens oder Gaußfunktion), die insbesondere für mehrschichtige BPN erforderlich sind¹ (RUMELHART et al. 1986). Für die Ausgabefunktion der letzten Neuronenschicht wird im Falle der Klassifizierung allerdings eine binäre Codierung gewählt, wobei jedes Neuron einer Klasse zugeordnet wird.

Die am häufigsten verwendete Lernmethode Neuronaler Netze besteht in der Veränderung der internen Gewichte w_i . Bei der hier angewandten Form des überwachten Lernens werden dem BPN in der Trainingsphase verschiedene Eingabemuster mit deren optimalen Ausgabewerten präsentiert. Auf diese Art kann das Netzwerk sein Fehlverhalten quantifizieren und versuchen, durch Modifikation der Gewichte den Fehler zu minimieren. Die Gewichtung der Verbindungen entscheidet also, wie das Netz am Ausgang auf anstehende Eingangssignale reagiert. Sie wird erst durch einen iterativen Lernprozeß, in dem das Netz die Trainingsdaten verarbeitet, ermittelt. Beim untrainierten Netz sind die Gewichte der Verbindungen zunächst zufällig verteilt (RUMELHART et al. 1986).

Grundlage der BPN-Lernregel ist die verallgemeinerte Delta-Regel. Sie basiert auf der Annahme, durch Vergleich der Ist- und Sollwerte der Ausgabeneuronen die optimalen Gewichte iterativ² bestimmen zu können (CARL 1996). Die zugrundegelegte Fehlerfunktion E ist dabei direkt durch die Neuronengewichte bestimmt ($E(w)$). Die Lernregel berechnet den Gradienten der Fehlerfunktion $\delta E/\delta w$. Die Gewichtsveränderung erfolgt um einen Bruchteil des negativen Gradienten der Fehlerfunktion in Richtung des Minimums. Die partielle Ableitung des aus allen Lernmustern resultierenden mittleren Fehlerquadrats hinsichtlich einer Gewichtsveränderung der Verbindung von Neuron i nach Neuron j wird zurückgeführt und dient als Maß für die zukünftige Veränderung der Gewichtung w_{ij} . In jedem Iterationsschritt t wird die neue Gewichtsveränderung δw_t berechnet als Summe aus der alten Gewichtsveränderung multipliziert mit einem Faktor α (Momententerm) und der partiellen Ableitung des mittleren Fehlerquadrats multipliziert mit einer Schrittweite η (Lernrate):

$$\delta w_t = -\eta \frac{\delta E}{\delta w} + \alpha \delta w_{t-1} = \Delta w_t + \alpha \delta w_{t-1} \quad \text{Gl. 8-1}$$

Durch das Hinzufügen eines Moments zur aktuellen Gewichtsverbesserung kann die gegenwärtige Suchrichtung von der vorhergehenden beeinflusst werden, so daß ein schnelle-

¹ Da bei der *Backpropagation*-Lernregel jedes Gewicht in dem Maße verändert wird, wie die Verbindung am Gesamtfehler des Netzes beteiligt ist, kann anhand binärer Ausgabefunktionen keine Aussage über das Maß der Veränderung der Gewichte getroffen werden (RUMELHART et al. 1986).

² Da die eigentliche Form der Fehlerfunktion nicht bekannt ist, ist es notwendig, ein iteratives Konvergenzverfahren zu verwenden (BÄHR & VÖGTLE 1998).

res Konvergenzverhalten als mit dem einfachen Gradientenverfahren erwartet werden kann.

Mit Hilfe aller Ein- und Ausgabemuster wird das Netzwerk nun solange trainiert, bis die gewünschte Approximation der Funktion erreicht ist. Die Anzahl der dazu erforderlichen Iterationsschritte ist abhängig von der gewählten Momentumrate und Lernrate und beträgt in der Regel zwischen 100 und 1000 Iterationsschritten.

Für Klassifizierungszwecke ist jedoch eine reine Vorhersage der Trainingsmuster nicht ausreichend. Von größerem Interesse ist vielmehr die Fähigkeit des Netzes, auch Muster zu klassifizieren, die es in der Trainingsphase nicht gelernt hat. Dies setzt eine gewisse Generalisierungsfähigkeit des Netzwerkes voraus, welche stark von der Netzwerktopologie und der Auswahl umfangreicher, repräsentativer Trainingsmuster abhängig ist. Aus diesem Grund erfolgt die Training - wie beim ML-Verfahren - anhand der Testschlüge der Ground Truth Stufe 1, deren Signaturverhalten für die jeweilige Klasse repräsentativ ist. Nach der Trainingsphase ist das Netz einsatzbereit für die Klassifizierung.

Netzwerktopologie

Die Netzwerktopologie bestimmt die Eigenschaften und Möglichkeiten eines Neuronalen Netzes. Ein- und Ausgabeschicht sind durch die Vorgabe von Lernbeispielen und einer Zielvorstellung definiert: Die Anzahl der Neuronen in der Eingangsebene wird durch die Dimension des Merkmalsraumes bestimmt und entspricht im einfachsten Fall der Zahl der Eingangskanäle. Die Zahl der Neuronen in der Ausgangsebene richtet sich nach der Anzahl der Trainingsklassen. Die Anzahl der inneren Verarbeitungsschicht(en) und deren Neuronen ist weitgehend unbestimmt und unterliegt dem Variieren und Testen verschiedener Netzwerkkonfigurationen.

Die Topologie des hier eingesetzten BPN bestand aus der Minimalkonfiguration einer Eingabe- und Ausgabeschicht sowie einer Verarbeitungsschicht (*hidden unit*) mit wahlweise 1 bis 3 Neuronen pro Eingangskanal¹. Dreischichtige Netzwerke sind in der Lage, jede Funktion, ungeachtet ihrer Komplexität, der Fragestellung anzupassen.

Für die Skalierung des oben erwähnten Momententerms wurde ein Wert von 0,9 verwendet. Die Schrittweite bzw. Lernrate η variierte zwischen 0,1 und 0,2. Kleine Schrittweiten garantieren meist eine gute Konvergenz (BÄHR & VÖGTLE 1998). Die Verbesserung der Gewichte erfolgte nach jedem Lernmuster (*online*-Methode).

8.2.2 Maximum-Likelihood-Klassifizierungsverfahren

Die Klassifizierung nach der *Maximum-Likelihood*-Methode soll hier mit Verweis auf die entsprechende Fachliteratur² nur kurz beschrieben werden. Ziel der ML-Klassifizierung ist

¹ Die Zahl der Neuronen entspricht der zu trennenden Hyperebenen (CARL 1996).

² DUDA & HART (1973); SCHOWENGERDT (1983).

es, anhand von vorgegebenen statistischen Klassenbeschreibungen durch Mittelwert, Standardabweichung und Kovarianzmatrix für jedes Pixel im Satellitenbild eine Wahrscheinlichkeit für die Klassenzugehörigkeit zu berechnen und das Pixel der Klasse mit der größten Wahrscheinlichkeit zuzuordnen. Die ML-Klassifizierungen wurde unter Anwendung der ERDAS *Imagine* Standardroutinen auf die schlagbezogenen Bilddaten realisiert. Der ML-Klassifikator benötigt als Eingabe die Signaturinformation der einzelnen Trainings- bzw. Zielklassen. Für jede Zielklasse wird eine Reihe von Trainingsfelder mit bekannter Nutzung vorausgesetzt, die insgesamt das Signaturverhalten aller Schläge der jeweiligen Klasse statistisch ausreichend repräsentieren. Es hat sich gezeigt, daß es genügt, wenn etwa 10 bis 20% aller zu klassifizierenden Schläge als Trainingsfelder zur Verfügung stehen. Zunächst wird für jede Trainingsklasse ein Signatursegment erzeugt, das alle später benötigten statistischen Daten der Musterklasse enthält. Das sind Mittelwert und Standardabweichung, Korrelationsmatrix und Kovarianzmatrix für alle an der Klassifizierung beteiligten Bildkanäle. Sei n die Anzahl der beteiligten Bildkanäle, so werden die Trainingsmusterklassen im n -dimensionalen Merkmalsraum durch n -dimensionale Ellipsoide repräsentiert, wobei Form und Orientierung eines Ellipsoids durch die inverse Kovarianzmatrix und die Positionierung im Merkmalsraum durch den Mittelwertsvektor der Musterklasse bestimmt sind. Das Hyperellipsoid ist der geometrische Ort aller Bildpunkte mit konstantem *Mahalanobis*-Abstand vom Klassenmittelwert, das ist der Ort mit gleich großer Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zur jeweiligen Klasse. Ein Pixel bzw. Schlag wird als zur Musterklasse i gehörend klassifiziert, wenn seine Position im Merkmalsraum innerhalb des zur Musterklasse i gehörenden Hyperellipsoids liegt. Liegt es im Überlappungsbereich mehrerer Ellipsoide, so wird es der Musterklasse mit dem geringsten *Mahalanobis*-Abstand zugeordnet.

Die Musterklassen sind beim ML-Verfahren optimal angepaßt, da bei der Ellipsoidberechnung die Kovarianzmatrix mit eingeht. Das ML-Verfahren liefert deshalb im Vergleich zu einfacheren statistischen Klassifizierungsverfahren (z.B. *Parallelepiped*-Klassifikator) genauere Resultate. Die Anwendung des ML-Verfahrens setzt normalverteilte Grauwerte für die Fruchtarten in den einzelnen Bildkanälen voraus, welche im vorliegenden Fall gegeben ist.

8.3 Auswahl der Merkmale und Aufnahmezeitpunkte

Durch die Extraktion zahlreicher schlagbezogener Merkmale p und der Anzahl der ERS-Aufnahmen n wird ein hochdimensionaler Merkmalsraum D erzeugt:

$$D = p \cdot n \quad \text{Gl. 8-2}$$

Bei sieben bis neun SAR-Aufnahmen pro Jahr und ca. sieben extrahierten Bildkennwerten sowie einigen zeitinvarianten Merkmalen stehen insgesamt etwa 60 Merkmale bzw. potentielle Bildkanäle für die Klassifizierung zur Verfügung, von denen jedoch nur wenige für

die Klassifizierung geeignet sind. Die Notwendigkeit einer Merkmalsselektion ergibt sich aus folgenden Problemen:

1. *Redundanz*: Merkmalsvariablen, die mit anderen stark korrelieren, verfügen über einen geringen zusätzlichen Informationsgehalt.
2. *Übersättigung*: Die Güte einer Klassifizierung nimmt ab einer bestimmten Anzahl von Bildkanälen wieder ab, insbesondere dann, wenn Bildkanäle mit geringen Informationsgehalten für eine Klassentrennung hinzugefügt werden (HABERMEYER 1999).
3. *Irrelevanz*: Merkmalsvariablen, deren Varianz zwischen den Klassen gering ist, tragen wenig zur Klassentrennbarkeit bei.

Eine systematische und reproduzierbare Methode zur Auswahl der Bildkanäle, die durch besonders starke diskriminatorische Eigenschaften gekennzeichnet sind, ist durch die Diskriminanzanalyse (DA) gegeben. Alternative Methoden wären durch die Anwendung generischer Algorithmen (HABERMEYER 1999) oder die Durchführung einer unüberwachten Klassifizierung mit Hilfe des ISODATA-Algorithmus gegeben (PIERCE et al. 1998b).

Die schrittweise DA ist ein multivariates Verfahren zur Analyse von Gruppenunterschieden und gibt Aufschluß darüber, welche Merkmalsvariablen zur Trennbarkeit von Gruppen geeignet bzw. ungeeignet sind. Da es sich bei der DA um ein strukturenprüfendes Verfahren handelt, setzt es die Definition der Gruppen (Landnutzungsklassen) a priori voraus. Die DA wird daher auf einen Trainingsdatensatz mit bekannter Landnutzung angewendet.

8.3.1 Beurteilung der diskriminatorischen Eigenschaften der Merkmalsvariablen

Bei der Methode der schrittweisen DA werden die Merkmalsvariablen einzeln nacheinander in die Diskriminanzfunktion einbezogen. Dabei wird jeweils dasjenige Merkmal ausgewählt, das ein bestimmtes Gütekriterium maximiert¹. Durch die Anwendung einer schrittweisen DA werden nur Merkmalsvariablen in die Diskriminanzfunktion aufgenommen, die signifikant zur Verbesserung der Trennbarkeit beitragen. Aus der Rangfolge, mit der die Variablen in die Diskriminanzfunktion aufgenommen werden, läßt sich deren relative Wichtigkeit erkennen (BACKHAUS et al. 1994).

Das gebräuchlichste Kriterium zur Prüfung der Diskriminanz im Mehr-Gruppen-Fall bildet das multivariate Wilks' Lambda (Λ):

$$\Lambda = \prod_{k=1}^K \frac{1}{1 + \gamma_k} , \quad \text{Gl. 8-3}$$

wobei γ_k dem Eigenwert der k -ten Diskriminanzfunktion und K der Anzahl der Diskriminanzfunktionen entspricht. Anhand des inversen Gütemaßes Wilks' Lambda kann vor

¹ Bei der Verwendung des multivariaten Wilks' Lambda als Gütemaß wird dessen Minimierung angestrebt, da es sich um ein inverses Gütemaß handelt.

Durchführung der DA für jede einzelne Merkmalsvariable deren Trennfähigkeit überprüft werden (FOODY et al. 1994). Ein statistischer Kontrollparameter, der die Aufnahme unwichtiger Merkmalsvariablen verhindert, ist der sogenannte F-Wert. Er ist ein Maß für die Verringerung von Wilks' Lambda und damit für die Erhöhung der Diskriminanz, die durch die Aufnahme einer Merkmalsvariable in die Diskriminanzfunktionen bewirkt wird (BACKHAUS et al. 1994). Als Schwellenwert zur Aufnahme einer Variable wird ein F-Wert von 0,05 zugrundegelegt. Um bereits aufgenommene Variablen durch trennfähigere zu ersetzen wird ein kritischer F-Wert von 0,1 gewählt¹.

Die Basis für die multivariate Beurteilung der klassentrennenden Merkmalsvariablen bilden die standardisierten Diskriminanzkoeffizienten (b_{jk}). Da im gegebenen Fall sechs bzw. elf Landnutzungsklassen vorgegeben werden, existieren in der Regel mehrere Diskriminanzfunktionen (K). Zu jeder Diskriminanzfunktion gehört ein Eigenwert, der dem Maximalwert des Diskriminanzkriteriums (Quotient aus erklärter und nicht erklärter Streuung) entspricht. Jede weitere Diskriminanzfunktion wird dann so ermittelt, daß sie jeweils einen maximalen Anteil der verbleibenden Reststreuung erklärt. Für die gegebenen Datensätze ergeben sich mehrere Diskriminanzfunktionen, deren diskriminatorische Bedeutung bzw. Eigenwerte schnell abnehmen.

Um die klassentrennende Funktion einer Merkmalsvariablen bezüglich aller Diskriminanzfunktionen zu beurteilen, ist der mittlere Diskriminanzkoeffizient zu bestimmen. Dieser ergibt sich aus der Summe der absoluten Werte der Koeffizienten einer Merkmalsvariablen, gewichtet mit den Eigenwertanteilen (EA_k) der k -ten Diskriminanzfunktion (BACKHAUS et al. 1994):

$$\bar{b}_j = \sum_{k=1}^K |b_{jk}| \cdot EA_k \quad \text{Gl. 8-4}$$

Das Ergebnis der DA stellt eine Rangordnung von Merkmalen dar, die anhand ihres mittleren Diskriminanzkoeffizienten sortiert sind.

8.3.2 Ergebnisse der Diskriminanzanalyse zur Kanalauswahl

Die Diskriminanzanalysen zur Kanalauswahl werden zunächst mit den Referenzdaten des gesamten Untersuchungsgebietes durchgeführt. Anschließend findet eine nach der naturräumlichen Einteilung getrennte Untersuchung statt. Als Datengrundlage der DA dienen die ca. 240 Referenzschläge der Boniturgebiete².

¹ Die F-Werte wurden so definiert, daß insgesamt nicht mehr als maximal 9 Merkmale ausgewählt werden, da in Klassifizierungstestreihen festgestellt wurde, daß sich durch weitere Kanäle die Klassifizierungsgenauigkeit wieder verschlechtern.

² Da die Boniturkampagne erst ab 1997 begonnen wurde, beziehen sich die Referenzschläge für 1996 auf einen Teil der im Rahmen der Landnutzungskartierung erfaßten Schläge.

Die insgesamt 67 potentiellen Merkmalsvariablen zur Fruchtartenklassifizierung, die aus der Zeitreihe der SAR SLC-Daten¹ und den zeitinvarianten physiographischen Zusatzdaten abgeleitet wurden, sind in Tab. 8-3 zusammengestellt.

Tab. 8-3: Potentielle Merkmalsvariablen zur Fruchtartenklassifizierung

Merkmalsvariablen (schlagbezogene Mittelwerte)	Abgeleitet aus	Häufigkeit p.a.
Kalibrierter Radarrückstreuoeffizient (σ^0)	ERS-2 SAR SLC	9
Varianz der logarithmierten Amplitude (v)	ERS-2 SAR SLC	9
Verteilungsschiefe der logarithmierten Amplitude (ske)	ERS-2 SAR SLC	9
Verteilungswölbung logarithmierten Amplitude (exz)	ERS-2 SAR SLC	9
Variationskoeffizient (CoV)	ERS-2 SAR SLC	9
Differenzen von σ^0 zwischen den ERS-Terminen ($\Delta\sigma^0$)	ERS-2 SAR SLC	8
Max. Differenz zwischen σ^0 -Werten einer Zeitreihe	ERS-2 SAR SLC	1
Kohärenz* (γ) (nur 1996)	ERS-1 und ERS-2 SAR SLC	3
Lokaler Einfallswinkel (Li)	ERS-2 SAR SLC und DGM	1
Hangneigung (Slo)	DGM	1
Hangexposition (Exp)	DGM	1
Tonanteil des Oberbodens** (T)	Digitale Konzeptbodenkarte	1
Schluffanteil des Oberbodens (U)	Digitale Konzeptbodenkarte	1
Sandanteil des Oberbodens (S)	Digitale Konzeptbodenkarte	1
Skelettanteil des Oberbodens (SKT)	Digitale Konzeptbodenkarte	1
Feldkapazität des Oberbodens (FK)	Digitale Konzeptbodenkarte	1
Gesamtporenvolumen des Oberbodens (GPV)	Digitale Konzeptbodenkarte	1
Lagerungsdichte des Oberbodens (Ld)	Digitale Konzeptbodenkarte	1

* Werte zur Kohärenz konnten lediglich für drei ERS-Bildpaare im Frühjahr 1996 berechnet werden.

** Für den Oberboden wurde eine Mächtigkeit von 10 cm zugrundegelegt.

Eine differenzierte Analyse in Abhängigkeit der beiden Varianten mit 6 bzw. 11 Zielklassen, die bei der anschließenden Klassifizierung unterschieden werden, war nicht erforderlich. Alle Analysen wurden auf der Basis von elf Zielklassen durchgeführt.

Die Merkmalsvariablen, die signifikant zur Trennung der Zielklassen beitragen, sind für die Jahre 1996-1998 in Tab. 8-4 bis Tab. 8-6 zusammengefaßt:

Tab. 8-4: Kanalauswahl 1996 gemäß mittlerem Diskriminanzkoeffizienten (\bar{b}_j), differenziert nach Teilgebieten und Gesamtgebiet

	Gesamtgebiet			Tertiärhügelland			M. Schotterebene			Niedermoorgebiete		
	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j
1	σ^0	15.06.	5,31	σ^0	15.06.	5,64	σ^0	15.06.	7,16	σ^0	15.06.	6,46
2	σ^0	11.05.	4,10	$\Delta\sigma^0$	15.6.-20.7.	4,21	$\Delta\sigma^0$	15.6.-20.7.	5,46	σ^0	20.07.	6,12
3	γ	10./11.5.	3,97	σ^0	20.07.	3,87	σ^0	20.07.	4,32	$\Delta\sigma^0$	15.6.-20.7.	4,27
4	σ^0	20.07.	3,23	γ	10./11.5.	3,54	σ^0	11.05.	3,71	γ	14./15.6.	3,88
5	γ	14./15.6.	2,14	$\Delta\sigma^0$	11.5.-15.6.	2,40	γ	14./15.6.	2,21	γ	10./11.5.	2,47
6	σ^0	06.04.	1,87	γ	14./15.6.	1,69	γ	10./11.5.	1,56	σ^0	11.05.	1,83
7	$\Delta\sigma^0$	2.3.-6.4.	1,84									
8	γ	01./02.3.	1,45									

¹ Die ERS-Szenen des benachbarten Tracks (Zwischentermine) sind für die Klassifizierung von Bedeutung, obwohl sie sich orbitbedingt durch allgemein höhere Rückstreuoeffizienten auszeichnen.

Tab. 8-5: Kanalauswahl 1997 gemäß mittlerem Diskriminanzkoeffizienten (\bar{b}_j), differenziert nach Teilgebieten und Gesamtgebiet

	Gesamtgebiet			Tertiärhügelland			M. Schotterebene			Niedermoorgebiete		
	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j
1	σ^0	31.05.	3,87	σ^0	31.05.	6,37	σ^0	31.05.	6,02	σ^0	31.05.	7,64
2	σ^0	05.07.	3,71	$\Delta\sigma^0$	31.5.-19.6.	4,83	σ^0	09.08.	3,97	σ^0	05.07.	5,66
3	$\Delta\sigma^0$	22.3.-26.4.	2,00	σ^0	26.04.	3,68	σ^0	18.10.	2,10	$\Delta\sigma^0$	26.4.-31.5.	3,46
4	σ^0	26.04.	1,89	σ^0	19.06.	2,99	$\Delta\sigma^0$	31.5.-19.6.	1,97	σ^0	19.06.	3,10
5	$\Delta\sigma^0$	5.7.-24.7.	1,68	σ^0	09.08.	1,95	σ^0	26.04.	1,75	$\Delta\sigma^0$	22.3.-26.4.	2,28
6	σ^0	19.06.	1,43	σ^0	15.05.	1,88	σ^0	15.05.	1,23	σ^0	18.10.	1,66
7	σ^0	15.05.	1,12									
8	CoV	09.08.	0,63									

Tab. 8-6: Kanalauswahl 1998 gemäß mittlerem Diskriminanzkoeffizienten (\bar{b}_j), differenziert nach Teilgebieten und Gesamtgebiet

	Gesamtgebiet			Tertiärhügelland			M. Schotterebene			Niedermoorgebiete		
	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j
1	σ^0	20.06.	6,65	σ^0	20.06.	6,57	σ^0	20.06.	9,95	σ^0	20.06.	6,59
2	$\Delta\sigma^0$	16.5.-20.6.	3,65	σ^0	16.05.	6,41	$\Delta\sigma^0$	20.6.-25.7.	8,32	$\Delta\sigma^0$	20.6.-9.7.	3,69
3	$\Delta\sigma^0$	9.7.-25.7.	3,45	$\Delta\sigma^0$	16.5.-20.6.	5,86	$\Delta\sigma^0$	11.4.-16.5.	5,58	$\Delta\sigma^0$	11.4.-16.5.	2,94
4	σ^0	16.5.	1,81	$\Delta\sigma^0$	9.7.-25.7.	3,17	σ^0	25.07.	4,81	σ^0	11.04.	1,72
5	$\Delta\sigma^0$	11.4.-16.5.	1,77	σ^0	09.07.	2,96	σ^0	03.10.	3,38	σ^0	16.05.	1,53
6	σ^0	03.10.	1,63									
7	$\Delta\sigma^0$	25.7.-13.8.	1,40									
8	CoV	29.08.	0,76									

Die Ergebnisse für die drei Untersuchungsjahre zeigen, daß die Mittelwerte des Radarrückstreuungskoeffizienten σ^0 die stärksten diskriminatorischen Eigenschaften besitzen. Sie repräsentieren daher die wichtigsten Bildkanäle für die Erfassung der Arteninventare. Betrachtet man die Rangordnung bezüglich der Aufnahmetermine, zeigt sich für alle drei Jahre, daß ERS-Aufnahmen zwischen Mai und Juli über das größte Potential zur Unterscheidung verschiedener Bodenbedeckungen verfügen. SAR-Aufnahmen der frühen (März) bzw. späten Vegetationsperiode (ab August) sind von untergeordneter Bedeutung, da viele Schläge noch bzw. bereits wieder ohne Vegetationsbedeckung sind. Eine Ausnahme stellt der Oktober-Termin dar, der für die Klassifizierung von Bedeutung ist, da einige Schläge bereits mit der Kultur des Folgejahres bestellt sind. Auch die zeitabhängige Veränderung der Radarrückstreuung, ausgedrückt durch die Differenzen zwischen den Aufnahmetermeninen ($\Delta\sigma^0$), dient als zusätzliches diakritisches Merkmal zur Erfassung der Arteninventare.

Streuemaße, wie die Varianz und der Variationskoeffizient, die ein Indiz für die Heterogenität bzw. Textur innerhalb eines Schlages sind, tragen kaum zur Trennung der Klassen bei. Typische, texturerzeugende Elementarmuster für Acker- und Wiesenflächen wären einzelne Pflanzen bzw. gar deren Komponenten (Blätter, Stengel, Fruchtstände). Da diese Objekte jedoch wesentlich kleiner als die verfügbare Auflösung des Sensors sind, wird die Abbildung der Textur in den Daten bei den betrachteten Flächen verhindert. Lediglich nach der Ernte, wenn innerhalb eines Schlages verschiedene Bearbeitungsmaßnahmen

durchgeführt werden (Schlaginhomogenitäten), können Texturen in ERS-Bildern erkennbar sein. Dieser Zusammenhang zeigt sich in der Berücksichtigung des Variationskoeffizienten im Datensatz von 1997 und 1998, der jedoch für die Klassifizierung keine Verbesserung bringt. Texturmerkmale scheiden damit aufgrund der begrenzten räumlichen Auflösung des ERS-Systems und der relativ kleinen Schlaggrößen als zusätzliche Informationsebenen für die ERS SAR-Klassifizierung aus.

Auch die beiden Histogrammparameter Verteilungsschiefe (ske) und Verteilungswölbung (exz) der logarithmierten Amplitude tragen nicht zur Unterscheidung der Klassen bei.

Neben dem Rückstreumittelwert ist lediglich die Kohärenz (γ) noch von Bedeutung. Wie zuvor gezeigt werden konnte, handelt es sich bei der Kohärenz um eine von der Rückstreuintensität unabhängige Zusatzinformation, die die kurzzeitig unterschiedlichen Veränderungen der Vegetationsarten erfassen kann. Demzufolge üben die drei verfügbaren Kohärenzkanäle in 1996 einen signifikanten Einfluß auf die Diskriminanzfunktion aus und tragen als diakritische Merkmale entscheidend zur Trennbarkeit der Zielklassen bei.

Erwartungsgemäß kann die räumliche Verteilung bestimmter Bodeneigenschaften als Informationsebenen für die Klassifizierung vernachlässigt werden. Darüber hinaus werden räumliche Korrelationen zwischen Bodeneigenschaften und bestimmten Fruchtfolgen durch Grobsegmentierung des Untersuchungsgebietes nach naturräumlichen Kriterien abgeschwächt.

Die Reliefposition der Schläge, die durch die Parameter *Neigung* und *Orientierung relativ zum SAR-Sensor* beschrieben wird, findet ebenfalls in keiner Variante Berücksichtigung. Damit bestätigt sich, daß auch der Reliefeinfluß bei den gegebenen Hangneigungen unter dem Aspekt der Klassifizierung vernachlässigbar ist.

8.3.3 Erweiterung durch Bildkanäle optischer Sensoren

Für die Klassifizierung von Radardaten in Kombination mit Bilddaten optischer Sensoren erhöhte sich die Dimensionalität um weitere 8 Merkmalsvariablen, die aus den schlagbezogenen mittleren Grauwerten der 7 Landsat TM-Kanäle (TM 1 bis TM 7) und einem panchromatischen Bildkanal des SPOT bzw. IRS-1C abgeleitet wurden. Um die Klassifizierungsergebnisse vergleichen zu können, werden auch für diesen Fall die Diskriminanzanalysen nach den drei Teilgebieten getrennt durchgeführt.

Die Auswahl der klassentrennenden Merkmalsvariablen unter Einbeziehung der optischen Bildkanäle stellt sich wie folgt dar (Tab. 8-7 bis Tab. 8-9):

Tab. 8-7: Kanalauswahl 1996 unter Einbeziehung von Bilddaten optischer Sensoren gemäß mittlerem Diskriminanzkoeffizienten (\bar{b}_j), differenziert nach Teilgebieten und Gesamtgebiet

	Gesamtgebiet			Tertiärhügelland			M. Schotterebene			Niedermoorgebiete		
	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j
1	TM 4	21.04.	7,04	σ^0	15.06.	6,91	σ^0	15.06.	7,66	TM 4	21.04.	6,50
2	σ^0	15.06.	5,21	TM 4	21.04.	6,12	TM 3	21.04.	6,81	σ^0	15.06.	5,41
3	σ^0	11.05.	4,45	σ^0	20.07.	5,74	TM 4	21.04.	5,44	TM 3	21.04.	5,11
4	SPOT	23.04.	3,81	SPOT	23.04.	4,03	$\Delta\sigma^0$	11.5.-15.6.	4,13	SPOT	23.04.	4,71
5	TM 1	21.04.	2,66	$\Delta\sigma^0$	15.6.-20.7.	3,45	TM 3	21.04.	3,32	TM 3	21.04.	3,52
6	γ	10./11.05.	2,13	TM 3	21.04.	3,27	SPOT	23.04.	3,01	γ	10./11.05.	3,14
7	$\Delta\sigma^0$	15.6.-20.7.	1,99	$\Delta\sigma^0$	11.5.-15.6.	2,50	γ	10./11.05.	2,46	σ^0	01.03.	2,39
8	TM 3	21.04.	1,37	γ	10./11.05.	1,68	$\Delta\sigma^0$	15.6.-20.7.	1,85	$\Delta\sigma^0$	11.5.-15.6.	2,08
9	σ^0	06.04.	1,29	TM 1	21.04.	1,24	γ	14./15.06.	1,39	γ	14./15.06.	1,48

Tab. 8-8: Kanalauswahl 1997 unter Einbeziehung von Bilddaten optischer Sensoren gemäß mittlerem Diskriminanzkoeffizienten (\bar{b}_j), differenziert nach Teilgebieten und Gesamtgebiet

	Gesamtgebiet			Tertiärhügelland			M. Schotterebene			Niedermoorgebiete		
	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j
1	σ^0	31.05.	6,43	σ^0	31.05.	5,94	TM 4	08.04.	7,21	$\Delta\sigma^0$	26.4.-31.5.	6,77
2	TM 1	08.04.	4,87	TM 4	08.04.	5,16	σ^0	31.05.	5,87	σ^0	31.05.	6,16
3	IRS	13.08.	4,17	$\Delta\sigma^0$	26.4.-31.5.	4,31	$\Delta\sigma^0$	26.4.-31.5.	4,77	TM 4	08.04.	4,70
4	$\Delta\sigma^0$	5.7.-9.8.	3,65	IRS	13.08.	3,44	IRS	13.08.	3,50	TM 3	08.04.	4,19
5	σ^0	26.04.	3,28	TM 1	08.04.	2,65	σ^0	26.04.	2,43	IRS	13.08.	2,49
6	TM 4	08.04.	2,71	σ^0	22.03.	1,87	$\Delta\sigma^0$	5.7.-9.8.	1,88	$\Delta\sigma^0$	5.7.-9.8.	2,40
7	σ^0	09.08.	2,33	$\Delta\sigma^0$	5.7.-9.8.	1,14	TM 1	08.04.	1,57	σ^0	26.04.	1,76
8	$\Delta\sigma^0$	22.03.	1,48									
9	TM 3	08.04.	1,22									

Tab. 8-9: Kanalauswahl 1998 unter Einbeziehung von Bilddaten optischer Sensoren gemäß mittlerem Diskriminanzkoeffizienten (\bar{b}_j), differenziert nach Teilgebieten und Gesamtgebiet

	Gesamtgebiet			Tertiärhügelland			M. Schotterebene			Niedermoorgebiete		
	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j	Var.	ERS-Datum	\bar{b}_j
1	TM 4	01.08.	6,01	σ^0	20.06.	5,74	TM 4	01.08.	7,36	σ^0	20.06.	6,44
2	σ^0	20.06.	5,63	TM 4	01.08.	5,12	σ^0	16.05.	5,87	TM 1	01.08.	4,97
3	IRS	28.05.	4,77	$\Delta\sigma^0$	16.5.-20.6.	4,61	σ^0	07.03.	4,02	σ^0	16.05.	4,80
4	TM 3	01.08.	4,20	σ^0	11.04.	3,90	$\Delta\sigma^0$	11.4.-16.5.	3,80	TM 4	01.08.	3,55
5	σ^0	16.05.	3,81	IRS	28.05.	2,46	TM 3	01.08.	2,54	$\Delta\sigma^0$	20.6.-25.7.	2,81
6	CoV	20.06.	2,97	CoV	07.03.	1,98	IRS	28.05.	2,19	IRS	28.05.	2,39
7	$\Delta\sigma^0$	11.4.-16.5.	2,27	TM 3	01.08.	1,72	TM 1	01.08.	1,36	CoV	25.07.	1,54
8	σ^0	07.03.	1,67	TM 1	01.08.	1,20						
9	σ^0	25.07.	1,37									

Tab. 8-7 bis Tab. 8-9 zeigen, daß jeweils zwei bis drei Spektralkanäle des Landsat TM in die Auswahl der wichtigsten Bildkanäle mit aufgenommen wurden. In Abhängigkeit des Landsat-Aufnahmeterrmins sind dies die Kanäle 1 (0,45-0,52 μm), 3 (0,63-0,69 μm) und 4 (0,76-0,90 μm). Kanal 1 ist geeignet, zwischen Vegetation und Nicht-Vegetation zu unterscheiden. Der Wellenlängenbereich von Kanal 3 trägt aufgrund der Chlorophyllabsorption besonders zur Unterscheidung der Fruchtarten bei, ebenso wie Kanal 4 (nahes Infrarot), der für die Biomasse- und Feuchtedifferenzierung prädestiniert ist (LILLESAND & KIEFER

1994). Die Berücksichtigung der panchromatischen Bilddaten in allen drei Untersuchungsjahren verdeutlicht den hohen Informationsgehalt dieser geometrisch hochaufgelösten Daten.

Die übrigen ausgewählten Merkmale, die aus den SAR-Daten extrahiert wurden, setzen sich erwartungsgemäß wieder aus den Rückstreuwerten σ^0 und deren Differenzen zwischen den ERS-Terminen zusammen. Die Kohärenz als klassentrennendes Merkmal verliert auch durch die Erweiterung mit den optischen Bildkanälen nicht an Bedeutung.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß die Diskriminanzanalysen aller untersuchten Varianten zu einer sehr ähnlichen Kanalauswahl und Rangordnung führen. Die wichtigsten Merkmale sind die Mittelwerte der Radarrückstreuung im Zeitraum von Mai bis Juli bzw. deren Differenzen zwischen den ERS-Aufnahmeterminen.

Bei einer Kombination mit Bilddaten optischer Systeme besitzen die Kanäle 1, 3 und 4 des Landsat TM sowie die panchromatischen Bilddaten starke diskriminatorische Eigenschaften.

Trotz der guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse kann eine optimale Auswahl der Bildkanäle durch die Diskriminanzanalyse nicht garantiert werden. Insbesondere die geeignete Anzahl der Bildkanäle sollte anhand von Klassifizierungstestreihen empirisch bestimmt werden, da hierzu kein eindeutiges statistisches Kriterium vorhanden ist.

8.4 Klassifizierungsergebnisse

Die Klassifizierung erfolgt mit den Daten der Landnutzungskartierungen 1996-1998 mit Hilfe des *Maximum Likelihood*- und eines *Backpropagation Neuronal Net*-Klassifikators¹. Da beide Klassifikatoren zu den überwachten Verfahren zählen - und dementsprechend anhand repräsentativer Referenzschläge trainiert werden müssen - werden 25% aller Schläge per Zufallsgenerator als Trainingsgebiete definiert. Die restlichen 75% der Schläge dienen als Validierungsflächen.

Bei der Klassifizierung werden zwei Varianten mit unterschiedlicher thematischer Auflösung gegenübergestellt:

1. Klasseneinteilung in sechs Hauptfruchtarten² (Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps, Mais und Kartoffel), deren Trennbarkeit aufgrund vorangegangener Analysen aussichtsreich erscheint. Ihr mittlerer Flächenanteil an der gesamten Ackerfläche beträgt zwischen 73% und 79%.

¹ Die Klassifizierungen wurden mit den Bildverarbeitungsprogrammen ERDAS *Imagine*TM und PCI EASI/PACETM durchgeführt.

² Als Hauptfruchtart werden ökonomisch bedeutende Kulturen bezeichnet, die aufgrund ihrer Häufigkeit einen großen Teil der landwirtschaftlichen Nutzfläche beanspruchen.

2. Erweiterte Klassendifferenzierung von elf Hauptfruchtarten unter Hinzunahme der Klassen Triticale, Roggen, Hafer, Zuckerrübe und Grünland.

Letztere Variante ist aus Sicht des Anwenders von Interesse, da Aussagen über das Klassifizierungspotential in Bezug auf ca. 90% der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche des Untersuchungsgebietes gemacht werden können.

Alle übrigen Schläge, deren Nutzung nicht zu den Zielklassen zählen, werden ausmaskiert. Auf die Einführung einer Nullklasse kann daher verzichtet werden. Der Umfang der zu klassifizierenden Datensätze, differenziert nach den drei Teilregionen, stellt sich wie folgt dar (Tab. 8-10):

Tab. 8-10: Anzahl der zu klassifizierenden Schläge der Jahre 1996-1998, differenziert nach Teilregionen

	Gesamt			Tertiärhügelland			M. Schotterebene			Niedermoor/Auen		
	1996	1997	1998	1996	1997	1998	1996	1997	1998	1996	1997	1998
HF6*	952	946	958	588	581	585	312	313	315	52	52	58
HF11**	1182	1177	1188	712	705	707	405	407	408	65	65	73

* sechs Zielklassen (Hauptfruchtarten)

** elf Zielklassen (Hauptfruchtarten)

Die Klassifizierungsergebnisse der Jahre 1996-1998 sind differenziert nach den Flächen der drei Teilgebiete und des Gesamtgebietes in den Abb. 8-7 bis Abb. 8-9 zusammengefaßt. Die prozentualen Werte beziehen sich auf Gesamtgenauigkeiten¹. Die Klassifizierungsvarianten mit Bildkanälen der ERS-Zeitreihen sowie die Varianten aus ERS-Daten in Kombination mit Bilddaten optischer Systeme (Landsat TM und SPOT bzw. IRS) wurden mit den Kanalzusammensetzungen entsprechend der Ergebnisse der Diskriminanzanalysen durchgeführt (Tab. 8-7 bis Tab. 8-9)².

Zu Vergleichszwecken wurde zusätzlich eine ausschließlich auf Bilddaten optischer Sensoren beruhende schlagbezogene Klassifizierung durchgeführt, wobei alle 8 Eingangskanäle berücksichtigt wurden.

Abb. 8-10 und Abb. 8-11 zeigen eine Gegenüberstellung der Klassifizierungsergebnisse und der Landnutzungskartierungen der Jahre 1997 und 1998 am Beispiel der Teilgebiete Garching, Thalhausen und Scheyern. Die Gebiete Scheyern und Thalhausen sind Teil des Naturraums *Tertiärhügelland* (THL). Das Gebiet bei Garching entspricht den untersuchten Flächen des Naturraums der *Nördlichen Münchener Schotterebene* (NMS). Es ist zu beachten, daß die einzelnen Teilgebiete aufgrund ihrer Gebietsgröße in unterschiedlichen Maßstäben dargestellt sind.

¹ Die Gesamtgenauigkeit ergibt sich aus der Summe der richtig klassifizierten Schläge aller Zielklassen dividiert durch die Gesamtanzahl der zu klassifizierenden Schläge, angegeben in Prozent.

² Bei den Varianten mit Beteiligung von Bilddaten optischer Sensoren wurde auf die Klassifizierung anhand des BPN verzichtet.

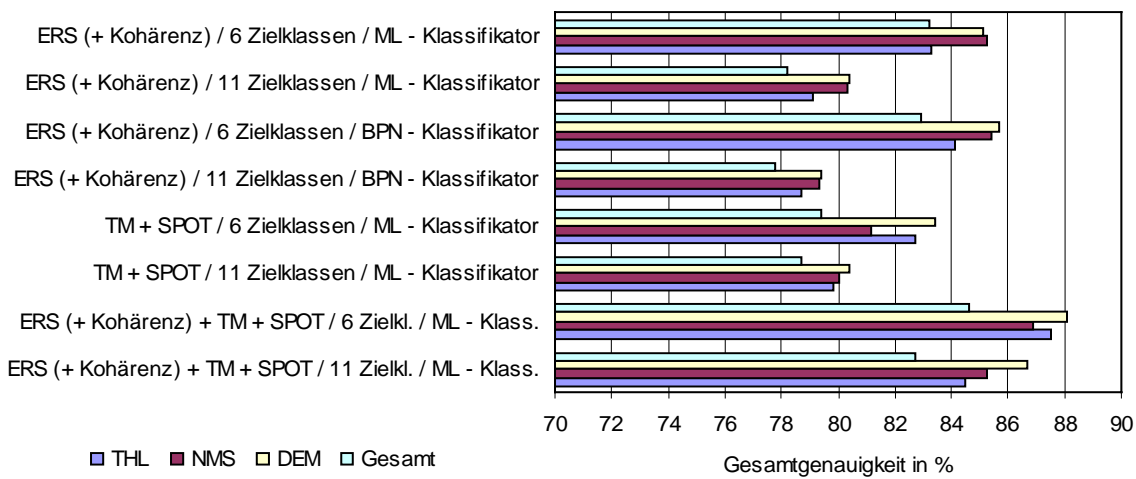


Abb. 8-7: Klassifizierungsergebnisse 1996 als Gesamtgenauigkeit in Prozent

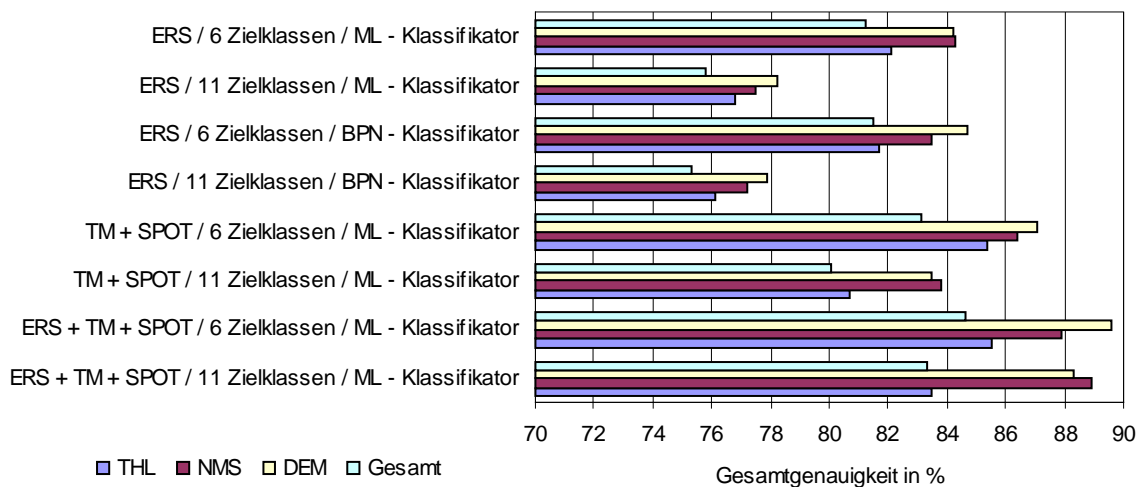


Abb. 8-8: Klassifizierungsergebnisse 1997 als Gesamtgenauigkeit in Prozent

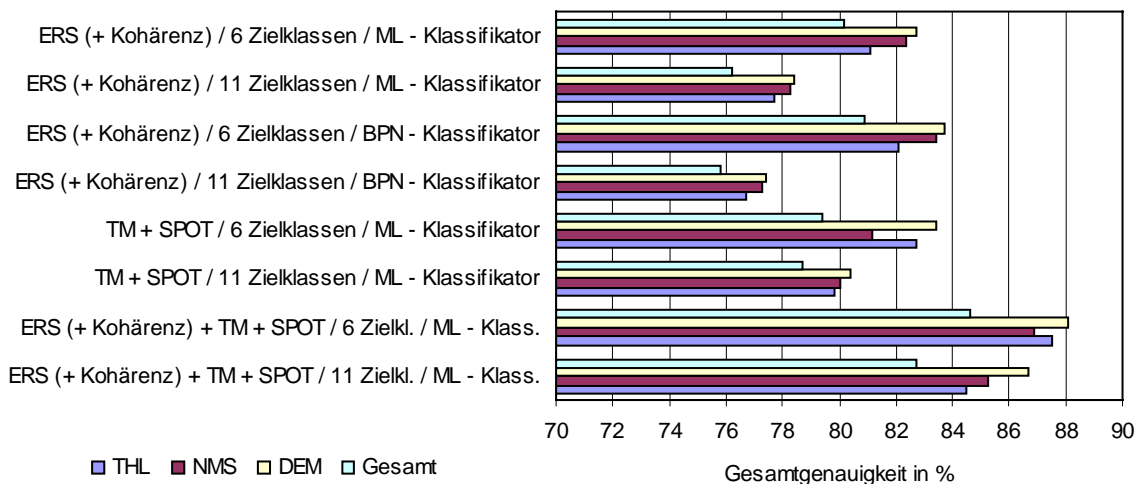


Abb. 8-9: Klassifizierungsergebnisse 1998 als Gesamtgenauigkeit in Prozent

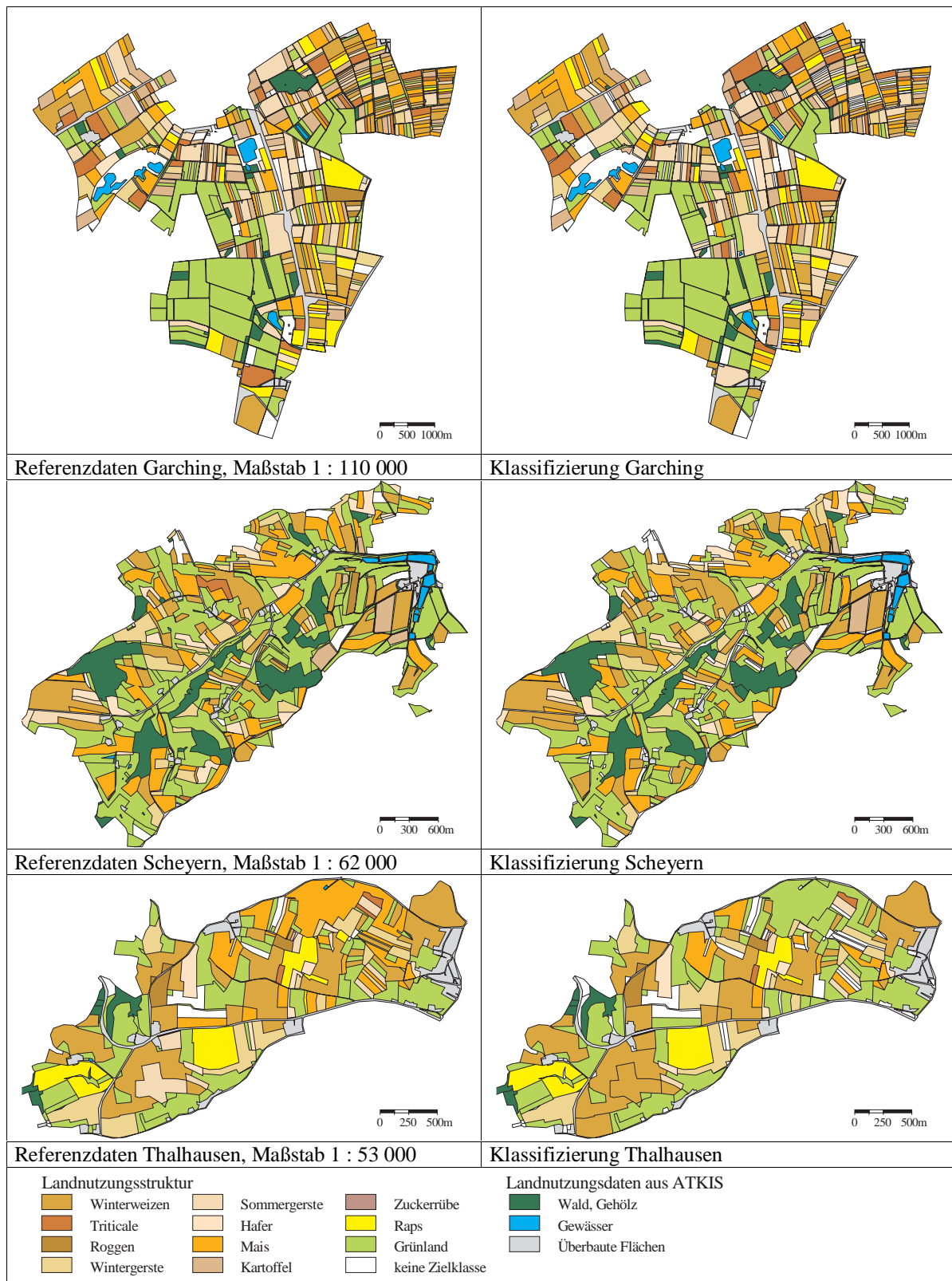


Abb. 8-10: Ergebnisse der schlagbezogenen multitemporalen ERS-Klassifizierung 1997 am Beispiel der Teilgebiete Garching, Scheyern und Thalhausen

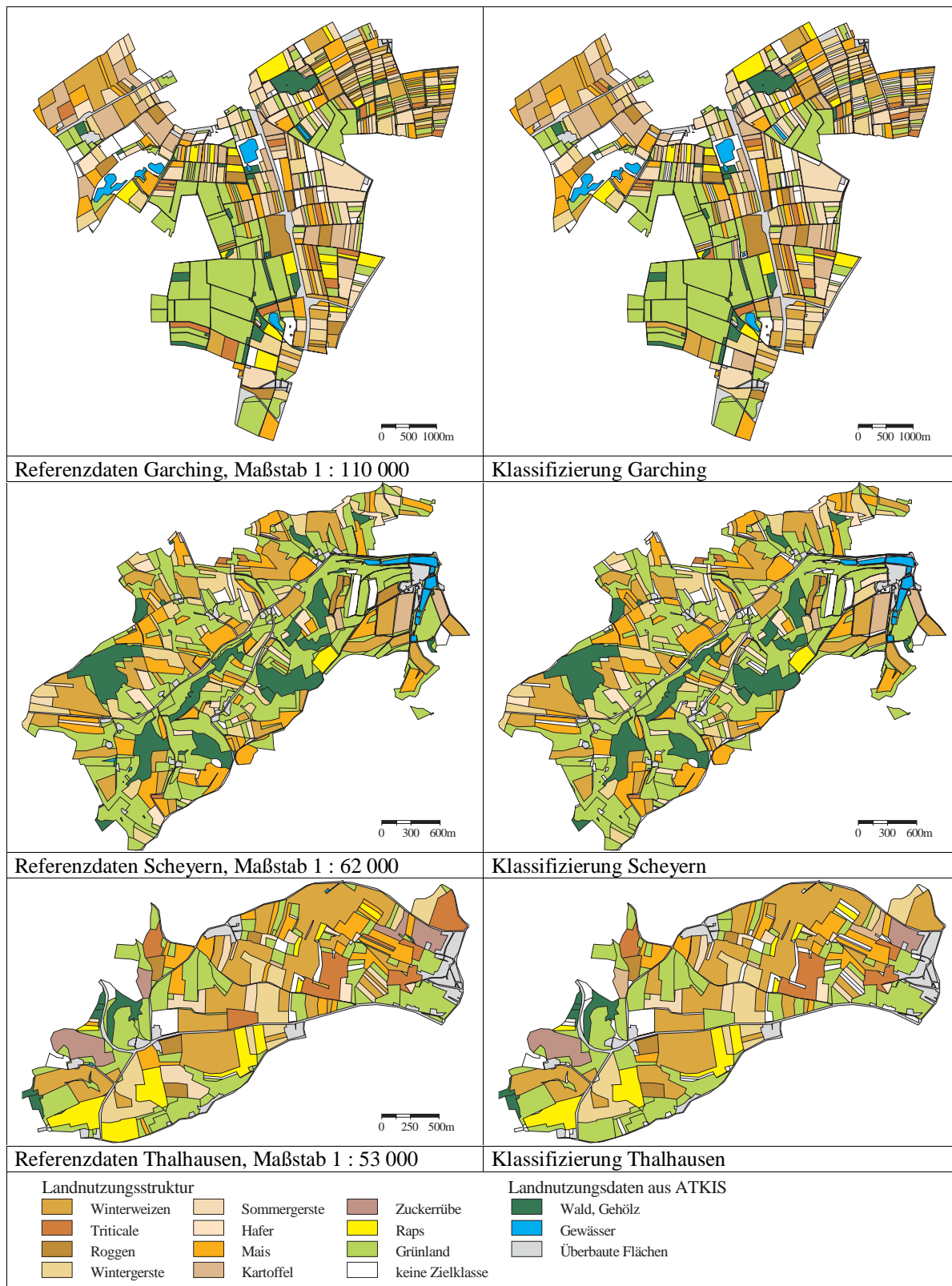


Abb. 8-11: Ergebnisse der schlagbezogenen multitemporalen ERS-Klassifizierung 1998 am Beispiel der Teilgebiete Garching, Scheyern und Thalhausen

Eine differenzierte Verifizierung der Klassifizierungsergebnisse ist anhand von Konfusionsmatrizen¹ möglich. Die Spalten der Konfusionsmatrix repräsentieren die Referenzdaten bekannter Landnutzung, die Zeilen enthalten die Anzahl der der jeweiligen Klasse zugeordneten Schläge. Aus einer Konfusionsmatrix können neben der Gesamtgenauigkeit (Prozentanteil der Diagonalelemente der Matrix an der Summe aller Stichprobenelemente) u.a. die Herstellergenauigkeit (en: *producer's accuracy*) und die Nutzergenauigkeit (en: *user's accuracy*) abgeleitet werden. Die Herstellergenauigkeit (Diagonalelemente der Matrix, bezogen auf die Spaltensumme) beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Referenzschlag korrekt klassifiziert wurde. Die Nutzergenauigkeit (Diagonalelemente der Matrix, bezogen auf die Zeilensumme) gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein im Bild klassifizierter Schlag tatsächlich dieser Klasse angehört.

Aufgrund der Vielzahl der berechneten Klassifizierungsvarianten, sollen lediglich zwei Konfusionsmatrizen dargestellt werden, die die allgemeinen Schwierigkeiten der Klassentrennbarkeit in charakteristischer Weise zum Ausdruck bringen (Tab. 8-11 und Tab. 8-12). Die Beispiele beziehen sich auf die Radardatenklassifizierungen der Region NMS des Jahres 1998, die für 6 bzw. 11 Zielklassen durchgeführt wurde. Die Trainingsdaten sind nicht in den Referenzdaten enthalten.

Tab. 8-11: Klassifizierungsergebnis NMS 1998 (Differenzierung in 6 Zielklassen; ML-Klassifikator)

		Referenzdaten bekannter Landnutzung (Angabe in Anzahl Schläge)						
		WW	WG	SG	MA	KA	RA	Σ
Klassifizierte Daten	WW	28	1	5	1	-	1	36
	WG	-	36	4	1	-	1	42
	SG	7	2	52	4	1	-	66
	MA	-	-	-	27	2	3	32
	KA	-	-	-	-	43	2	45
	RA	-	-	1	1	-	13	15
	Σ	35	39	62	34	46	20	236

Herstellergenauigkeit in %		Nutzergenauigkeit in %	
WW	80,0	WW	77,7
WG	92,3	WG	85,7
SG	83,8	SG	78,8
MA	79,4	MA	84,3
KA	93,5	KA	95,5
RA	65,0	RA	86,6
Gesamtgenauigkeit: 84,3%			

¹ Konfusions- bzw. Fehlermatrizen zählen zu den Standardevaluierungsmethoden der Bildklassifizierung und geben für jede Klasse das Verhältnis zwischen Referenz- bzw. Trainingsdaten und den Klassifizierungsergebnissen wider (LILLESAND & KIEFER 1994).

Tab. 8-12: Klassifizierungsergebnis NMS 1998 (Differenzierung in 11 Zielklassen; ML-Klassifikator)

		Referenzdaten bekannter Landnutzung (Angabe in Anzahl Schläge)											
		WW	TR	RO	WG	SG	HA	MA	KA	ZR	RA	GL	Σ
Klassifizierte Daten	WW	28	4	-	3	8	-	-	-	-	-	2	45
	TR	1	9	-	-	-	-	-	-	-	1	-	11
	RO	-	-	10	2	1	-	-	-	-	-	2	15
	WG	-	1	6	34	4	-	1	-	-	1	-	47
	SG	6	-	1	-	43	-	1	-	-	-	-	51
	HA	-	-	-	-	2	8	1	-	-	-	-	11
	MA	-	-	1	-	3	-	26	5	1	1	-	37
	KA	-	-	-	-	-	-	3	41	1	-	-	45
	ZR	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	3
	RA	-	-	-	1	1	-	2	-	-	17	-	21
	GL	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	18	20
	Σ	35	15	18	40	62	9	34	46	5	20	22	306

Herstellergenauigkeit in %		Nutzergenauigkeit in %	
WW	80,0	WW	62,2
TR	60,0	TR	81,8
RO	55,5	RO	66,6
WG	85,0	WG	72,3
SG	69,3	SG	84,3
HA	88,8	HA	72,7
MA	76,5	MA	70,3
KA	89,1	KA	91,1
ZR	60,0	ZR	100,0
RA	85,0	RA	80,9
GL	81,8	GL	90,0
Gesamtgenauigkeit: 77,5%			

Die in Abb. 8-7 bis Abb. 8-9 dokumentierten Klassifizierungsergebnisse zeigen, daß Gesamtgenauigkeiten zwischen 75 und 85% erreicht werden können, wenn die Klassifizierung ausschließlich auf Bildkanälen beruht, die aus den multitemporalen ERS SAR-Daten extrahiert wurden¹.

Die getrennte Klassifizierung nach der Aufteilung des Untersuchungsgebietes in naturräumliche Einheiten liefert generell bessere Klassifizierungsergebnisse im Vergleich zum Gesamtgebiet. Die Verbesserung, die im Mittel ca. 3 bis 4% beträgt, ist auf die geringeren Varianzen der Signaturen zurückzuführen, da innerhalb der Teilgebiete relativ homogene Pflanzenentwicklungen (Biomassen und Wuchshöhen einzelner Fruchtarten) zu beobachten waren. Betrachtet man die Ergebnisse der einzelnen Teilgebiete, zeigt sich, daß die Flächen im Tertiärhügelland etwas schlechter klassifiziert werden, als solche in der Münchener Schotterebene oder der angrenzenden Niedermoorgebiete. Ursache dafür ist die allgemein kleinräumigere Schlagstruktur und der Reliefeffekt, der im Tertiärhügelland die

¹ Insgesamt ist bei der Beurteilung der Klassifizierungsgenauigkeit zu beachten, daß lediglich 25% der Schläge einer Klasse als Trainingsgebiete dienen. Erhöht man die Trainingsquote, so nehmen auch die Gesamtgenauigkeiten zu. Im Fall der Reklassifizierung (Trainierung mit allen zu klassifizierenden Schlägen) wurden die höchsten Genauigkeiten von teilweise über 90% erzielt.

Repräsentanz der Signaturen herabsetzt. Unter der Zielvorgabe einer großräumigen Klassifizierung (z.B. ganzer ERS SAR-Vollszenen) ist daher eine Unterteilung in naturräumliche Einheiten und getrennte Klassifizierung derselben ratsam.

Die Ergebnisse des Jahres 1996 zeigen im Vergleich zu den Jahren 1997 und 1998, daß durch die Einbeziehung der Kohärenz als zusätzliche Informationsebene die Identifikationsrate um ca. 2-3 Prozentpunkte verbessert werden kann. Auch wenn interferometrische Auswertungen mit ERS-Daten nicht mehr möglich sind, nachdem am 10.03.2000 der Betrieb von ERS-1 endgültig eingestellt wurde, bleibt festzuhalten, daß die Kohärenz als interferometrisches Produkt auch im Hinblick auf Bildklassifizierungen eine wertvolle Zusatzinformation darstellt.

Betrachtet man die Ergebnisse unter dem Aspekt der eingesetzten Klassifikatoren, so ergibt sich keine eindeutige Präferenz für eines der beiden Verfahren. In Anbetracht des vergleichsweise höheren Zeitaufwandes für die Konzeption der Netzwerktopologie und der Trainierung des BPN, wird das parametrische ML-Verfahren favorisiert. Darüber hinaus werden Neuronale Netze häufig als sogenannte *Black-Box*-Verfahren bezeichnet, da die Klassenzuweisungen nicht transparent nachvollziehbar und die Ergebnisse schlecht reproduzierbar seien¹. Ein Vorteil des BPN-Klassifikators ist es jedoch, daß a priori keine Annahmen über die statistische Verteilung einzelner Klassen verlangt werden. Das BPN-Verfahren ist als nichtparametrischer Klassifikator auch dann geeignet, wenn Abhängigkeiten zwischen den Eingabekomponenten bestehen oder die Voraussetzung normalverteilter Daten für die ML-Klassifizierung nicht gegeben ist (BENEDIKTSSON et al. 1990; CARL 1996). Die Wahl des Klassifikators hat demzufolge keine nennenswerte Auswirkung auf die Klassifizierungsergebnisse.

Bevor auf den Vergleich mit Fernerkundungsdaten optischer Sensoren bzw. der Kombination aus SAR-Daten und Daten optischer Sensoren eingegangen wird, soll die Trennbarkeit einzelner Fruchtarten detaillierter diskutiert werden. Zur Evaluierung der Klassentrennbarkeit sind zwei exemplarische Konfusionsmatrizen dargestellt, die sich auf die beiden Varianten von 6 bzw. 11 Zielklassen beziehen und die allgemeine Problematik der Klassentrennbarkeit widerspiegeln (s. Tab. 8-11 und Tab. 8-12, S. 123f).

Im Fall von 6 Zielklassen (Tab. 8-11) zeigt sich, daß zwischen den Getreidearten WW, WG und SG einerseits und Mais, Raps und Kartoffel andererseits kaum Konfusionen auftreten. Zwischen den drei Getreidearten werden Konflikte insbesondere zwischen WW und SG hervorgerufen. Beide Getreidearten weisen Nutzergenauigkeiten von < 80% auf. Auch zwischen WW und WG ist keine vollständige Unterscheidung möglich, wobei WG die besten Einzelergebnisse von 85,7% bzw. 92,3% erzielt. Ein weiteres Problem stellt die Überschneidung der Klassen Mais und Kartoffel dar. Beide Kulturen sind sogenannte Somme-

¹ I. ANDERSON, der Produktmanager von ERDAS *Imagine* Inc. Atlanta, lehnt daher die Aufnahme von Neuronalen Netz-Klassifikatoren in ihr Bildverarbeitungsprogramm ab, da bislang nicht gezeigt werden konnte, daß Neuronale Netze eine konsistente, robuste und genaue Methode sind, eine große Anzahl von Landnutzungstypen zu klassifizieren (siehe www.erdas.com: Review für GeoWorld).

rungen, also Fruchtarten, die erst im Frühjahr ausgebracht werden, und daher bis Ende Juni eine ähnlich geringe Bodenbedeckung, Biomasse und Wuchshöhe aufweisen. Die erzielte Genauigkeit für Raps ist aus Sicht des Nutzers als gut zu bezeichnen: bei 86,6% der als Raps klassifizierten Schläge handelt es sich auch tatsächlich um Raps. Die Hersteller-genauigkeit von nur 65% zeigt jedoch, daß 7 Referenzschläge anderen Nutzungen zugeordnet wurden, obwohl Raps aufgrund seiner enormen Biomasse von über 80 t/ha Ende Mai/Anfang Juni und die dadurch hervorgerufene starke Dämpfung der Rückstreuintensität sich deutlich von den übrigen Fruchtarten abhebt.

Erweitert man die Anzahl der Zielklassen von 6 auf 11 (Tab. 8-12) durch drei weitere Getreidearten (Triticale, Roggen und Hafer) sowie Zuckerrübe und Grünland (überwiegend intensiv bewirtschaftete Wiesen), verstärken sich die Konflikte zwischen den einzelnen Getreidearten einerseits sowie zwischen der Gruppe Mais, Kartoffel und Zuckerrübe andererseits. Unbefriedigend ist das Ergebnis von Triticale, die zu 26% als WW klassifiziert wurde, was auf die pflanzenphysiologische Ähnlichkeit beider Fruchtarten zurückgeführt werden kann. Auch Winterroggen und Wintergerste sind schlecht zu unterscheiden, da beide Fruchtarten zu Beginn der Vegetationsperiode sehr ähnliche Bodenbedeckungsgrade, Wuchshöhen und Biomassen aufweisen. Darüber hinaus ergeben sich deutliche Überschneidungen zwischen Mais und Kartoffel bzw. Mais und Raps. Hohe Genauigkeiten können für die Klasse Grünland erzielt werden. Mögliche Ursache für die gute Trennbarkeit dieser Klasse gegenüber allen anderen Klassen ist die konstante Bodenbedeckung während der gesamten Vegetationsperiode, die zu einem relativ ausgeglichenem - und damit charakteristischem - Zeitprofil der Radarrückstreuung führt.

Insgesamt verschlechtern sich die Gesamtgenauigkeiten im allgemeinen um ca. 3 bis 5%, wenn 11 statt 6 Fruchtarten klassifiziert werden sollen. Als wenig erfolgreich erweist sich dabei der Versuch einer weiteren Differenzierung zwischen den Getreidearten, wohingegen die Hinzunahme der Klasse Grünland das Gesamtergebnis nicht verschlechtert.

Interessant ist der Vergleich mit den Ergebnissen, die mit der Kombination aus ERS-Daten und Bilddaten optischer Sensoren bzw. rein optischer Sensoren erzielt werden. Zunächst sei daran erinnert, daß die Aufnahmezeitpunkte der verfügbaren wolkenfreien Szenen optischer Sensoren in allen drei Untersuchungs-jahren gute, aber keine idealen Voraussetzungen für eine Erfassung der Arteninventare bieten (s. Kap. 5, Tab. 5-2). Ferner zeigen die Klassifizierungsergebnisse der Bilddaten optischer Sensoren eine starke Abhängigkeit vom Aufnahmeterrain. Die höchsten Gesamtgenauigkeiten mit 83,1% (6 Zielklassen) bzw. 80,1% (11 Zielklassen) werden 1998 erzielt, als eine Landsat TM-Szene vom 01.08. sowie eine IRS-Szene vom 28.05. verfügbar waren. In diesem Jahr werden mit den Bilddaten optischer Sensoren bessere Ergebnisse als mit Radardaten erzielt. Entsprechend schlechter stellen sich dagegen die Ergebnisse der Jahre 1996 und 1997 dar, in denen mit Radardaten gleiche bzw. sogar höhere Gesamtgenauigkeiten erreicht werden. Die Unterschiede zwischen den Varianten mit 6 und 11 Zielklassen betragen bei den Klassifizierungen der optischen Bilddaten etwa 2 bis 3%.

Die kombinierte Klassifizierung von optischen Kanälen und ERS-Eingangskanälen kann die Genauigkeiten der reinen Radarklassifizierung um ca. 3 bis 4% steigern. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen mit rein optischen Bilddaten und der kombinierten Variante betragen ca. 2 bis 3%.

Unter Berücksichtigung der Abhängigkeit der Ergebnisse mit Bilddaten optischer Sensoren vom jeweiligen Aufnahmeterrain kann folgendes festgehalten werden:

- Auch in witterungsbedingt ungünstigen Jahren, sind mit ERS SAR-Daten Landnutzungs-klassifizierungen mit konstant guten Ergebnissen möglich, während optische Aufnahmesysteme unter Umständen gar keine Auswertungsmöglichkeit bieten.
- Stehen wolkenfreie Bilddaten optischer Sensoren aus der Hauptvegetationszeit (Mai bis Juli) zur Verfügung, können in der Regel geringfügig höhere Klassifizierungsgenauigkeiten als mit ERS-Daten erzielt werden.
- Eine deutliche Verbesserung wird durch die multisensorale Klassifizierung von ERS- und Bilddaten optischer Sensoren erreicht.

8.5 Frühzeitige Erfassung der Landnutzung

Für ökonomische Planungszwecke (Ernteertragsschätzung) und landwirtschaftliche Kontrollmaßnahmen besteht ein Bedarf an einer möglichst frühzeitigen Erfassung der Landnutzung und ihrer Aufwuchsbonitur im Hinblick auf eine frühzeitige Ernteertragsschätzung (YAKAM-SIMEN & NEZRY 1999).

Nachfolgend wird daher untersucht, wie sich die Klassifizierungsgenauigkeiten einzelner Fruchtarten verändern, wenn die Zeitreihe der ERS-Aufnahmen rückschreitend eingeschränkt wird. Im Gegensatz zu den bisher durchgeführten Klassifizierungen, bei denen die Auswahl der Kanäle sich aus den Ergebnissen der Diskriminanzanalyse ergab, werden für folgende Testreihen nur die Rückstremittelwerte am Beispiel der Zeitreihe 1998¹ des Teilgebietes bei Garching berücksichtigt (Tab. 8-13). Die frühesten Termine maximaler Genauigkeit sind in Tab. 8-13 hervorgehoben.

Beurteilt man die Ergebnisse unter dem Aspekt der Gesamtgenauigkeit, so ergibt sich:

- Ein Optimum von 83,9% mit einer Zeitreihe von sechs ERS-Szenen zwischen dem 07. März und 29. August 1998.
- Mit fünf ERS-Szenen (März bis Juli) verschlechtert sich die Gesamtgenauigkeit nur geringfügig um 1,2% auf 82,7%.
- Die Erweiterung der Zeitreihe durch die Hinzunahme des Oktober-Termins auf insgesamt sieben ERS-Szenen verschlechtert das Gesamtergebnis um 2,5%.

¹ Als Zeitreihe wurden nur ERS-Aufnahmen des gleichen Orbits mit 35-tägiger Repetitionsrate berücksichtigt.

Tab. 8-13: Klassifizierungsgenauigkeiten (in %) bei sukzessiver Einschränkung der ERS-Zeitreihe

Anzahl ERS-Szenen	Zeitreihe von ... bis	Herstellergenauigkeit						Gesamtgenauigkeit
		WW	WG	SG	MA	RA	KA	
7	07.03. bis 03.10.	77,1	85,0	83,8	82,3	65,0	84,7	81,4
6	07.03. bis 29.08.	85,7	87,5	83,8	79,4	80,0	84,7	83,9
5	07.03. bis 25.07.	88,5	90,0	79,0	76,5	90,0	78,2	82,7
4	07.03. bis 20.06.	82,8	90,0	72,5	70,5	90,0	78,2	79,3
3	07.03. bis 16.05.	62,8	72,5	59,6	50,0	90,0	67,4	64,9
2	07.03. bis 11.04.	48,6	75,0	14,5	41,1	80,0	19,6	40,5
1	07.03.	11,4	77,5	80,	41,1	75,0	0	30,8
Maximale Genauigkeit bei minimaler Anzahl von ERS-Szenen								
3	11.04. bis 20.06.	80,0	87,5	77,4	76,5	90,0	86,9	82,3

Wird eine maximale Gesamtgenauigkeit bei einer minimalen Anzahl von ERS-Szenen angestrebt, kann dies mit einer Zeitreihe von nur 3 ERS-Szenen zwischen April und Juni realisiert werden. In diesem Fall können immer noch 82,3% der Schläge richtig klassifiziert werden.

Die fruchtartenspezifischen Herstellergenauigkeiten zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Anzahl der berücksichtigten Aufnahmetermine. Dabei haben Veränderungen der Zeitreihe häufig gegenläufige Auswirkungen auf die Ergebnisse einzelner Fruchtarten. So verbessern sich beispielsweise die Ergebnisse für Mais kontinuierlich mit der Anzahl der Szenen, wohingegen sich die Ergebnisse für Raps gleichzeitig verschlechtern, da nach der Rapsernte (Mitte Juli) die Schläge eine sehr heterogene Bodenbedeckung aufweisen.

Im allgemeinen kann festgehalten werden, daß Sommerungen wie Mais oder Kartoffel, nur dann ausreichend genau klassifiziert werden können, wenn die ERS-Zeitreihe Bilder der mittleren bis späten Vegetationsperiode umfaßt. Besonders für die Unterscheidung von Mais und Kartoffeln sind September- bzw. Oktober-Aufnahmen entscheidend. Für Winterungen wie Winterweizen, Wintergerste und Raps sind Aufnahmen bis einschließlich Juni von großer Bedeutung. Zusätzliche Szenen verschlechtern die Ergebnisse für diese Fruchtarten. Umgekehrt verbessern sich die Ergebnisse für Sommerungen, wenn auf frühe Aufnahmetermine von März bis April verzichtet wird.

Die Auswirkungen von Variationen bezüglich des Umfangs von ERS-Zeitreihen wurde auch von SCHOTTEN et al. (1995) im Rahmen einer schlagbasierten Klassifizierung in Flevoland untersucht. Dabei konnte gleichermaßen festgestellt werden, daß die Güte der Klassifizierung mit der Anzahl der verwendeten Szenen zunimmt. Optimale Ergebnisse wurden jedoch erst mit acht SAR-Szenen erzielt, wobei ähnliche Gesamtgenauigkeiten von 80% (bezogen auf die Anzahl der Schläge) bzw. 88% (bezogen auf die Gesamtfläche) erreicht wurden.

Ausführungen von LEMOINE & KIDDS (1998) sowie YAKAM-SIMEN & NEZRY (1999) zufolge, kann eine Bestimmung der Nutzungsart bereits schon im April erfolgen, wenn die spezifischen Informationen über die Zeit und Art der Feldbearbeitung und der damit verbundenen Bodenrauhigkeit von Herbst- und Winteraufnahmen des ERS ausgenutzt wird.

8.6 Hierarchischer Klassifizierungsansatz

8.6.1 Methode

Ein Nachteil der bisher vorgestellten Klassifizierungsverfahren besteht darin, daß alle Zielklassen gleichzeitig mit denselben ungewichteten Bildkanälen klassifiziert werden, wobei häufig Merkmale aus der gesamten ERS-Zeitreihe zugrundeliegen. Wie im Rahmen der Zeitreihenanalyse gezeigt werden konnte, ist die Trennbarkeit zweier Fruchtarten jedoch auf ganz bestimmte, meist sehr enge Zeitfenster beschränkt (s. Kap. 7.5). Werden in solch einem Fall weitere Bildkanäle außerhalb des optimalen Zeitfensters hinzugezogen, verlieren die Signaturen an Eindeutigkeit, und das Klassifizierungsergebnis verschlechtert sich. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, wurde ein hierarchischer Klassifizierungsansatz entwickelt, der auf den mittleren σ^0 -Zeitreihenprofilen der Fruchtarten beruht. Ansätze dieser Art werden in der Literatur als *sequential-masking* Technik bezeichnet und wurden sowohl für Zeitreihen von Bilddaten optischer Sensoren als auch multitemporaler Radardaten erfolgreich angewandt (BAN & HOWARTH 1999).

Die schrittweise Maskierung ist ein interaktiver Prozeß, bei dem das Ergebnis nicht in einem einzigen Vorgang ermittelt, sondern durch eine Folge von Einzelentscheidungen schrittweise erzielt wird. In einem ersten Schritt wird der Bilddatensatz zunächst in zwei übergeordnete Klassen eingeteilt, deren Trennbarkeit besonders leicht fällt und damit mit hoher Genauigkeit vollzogen werden kann. Diese beiden Subklassen, die sich aus mehreren Fruchtarten zusammensetzen, sollten sich daher anhand ihrer σ^0 -Mittelwerte zu mindestens einem bestimmten ERS-Termin deutlich unterscheiden. Anschließend werden diese beiden Klassen in jeweils zwei weitere Unterklassen aufgeteilt, wobei wiederum die bestmögliche Trennbarkeit die Klasseneinteilung bestimmt. Dieser Schritt wird wiederholt, bis auf der untersten Hierarchieebene eine Klasse durch eine Fruchtart repräsentiert wird¹. Die Komplementärklasse wird dabei jeweils ausmaskiert. Jeder Klassifizierungsschritt wird überwacht durchgeführt, wobei wiederum 25% der Daten als Trainingsdaten dienen. Da es sich bei den Klassifizierungen stets nur um binäre Entscheidungen anhand eines oder zweier Bildkanäle handelt, können einfache Entscheidungsregeln wie das Schwellenwert-, *Minimum Distance*- oder *Parallelepiped*-Verfahren benutzt werden. Als diakritische Merkmale dienen ausschließlich die schlagbezogenen mittleren Rückstreukoeffizienten einer ERS-Jahreszeitreihe.

Die einzelnen Schritte der Klasseneinteilung und die entsprechende Auswahl der ERS-Termine muß für jedes Jahr neu angepaßt werden, da die ERS-Termine und die Pflanzenentwicklung zeitlich verschoben sind. Ähnliche Entscheidungs- bzw. Hierarchiemuster zwischen den Jahren können aufgrund der interannuellen Stabilität der Rückstreu-Zeitreihenprofile erwartet werden.

¹ Die Interpretierbarkeit der Subklassen nimmt in der Regel mit zunehmender Hierarchiestufe bzw. Diversifizierung ab.

Die Logik des hierarchischen Klassifizierungsansatzes ist am Beispiel des Bilddatensatzes für 1998 in Abb. 8-12 dargestellt. Die entsprechenden Zeitreihenprofile der sieben zu klassifizierenden Fruchtarten ist in Abb. 8-13 dokumentiert.

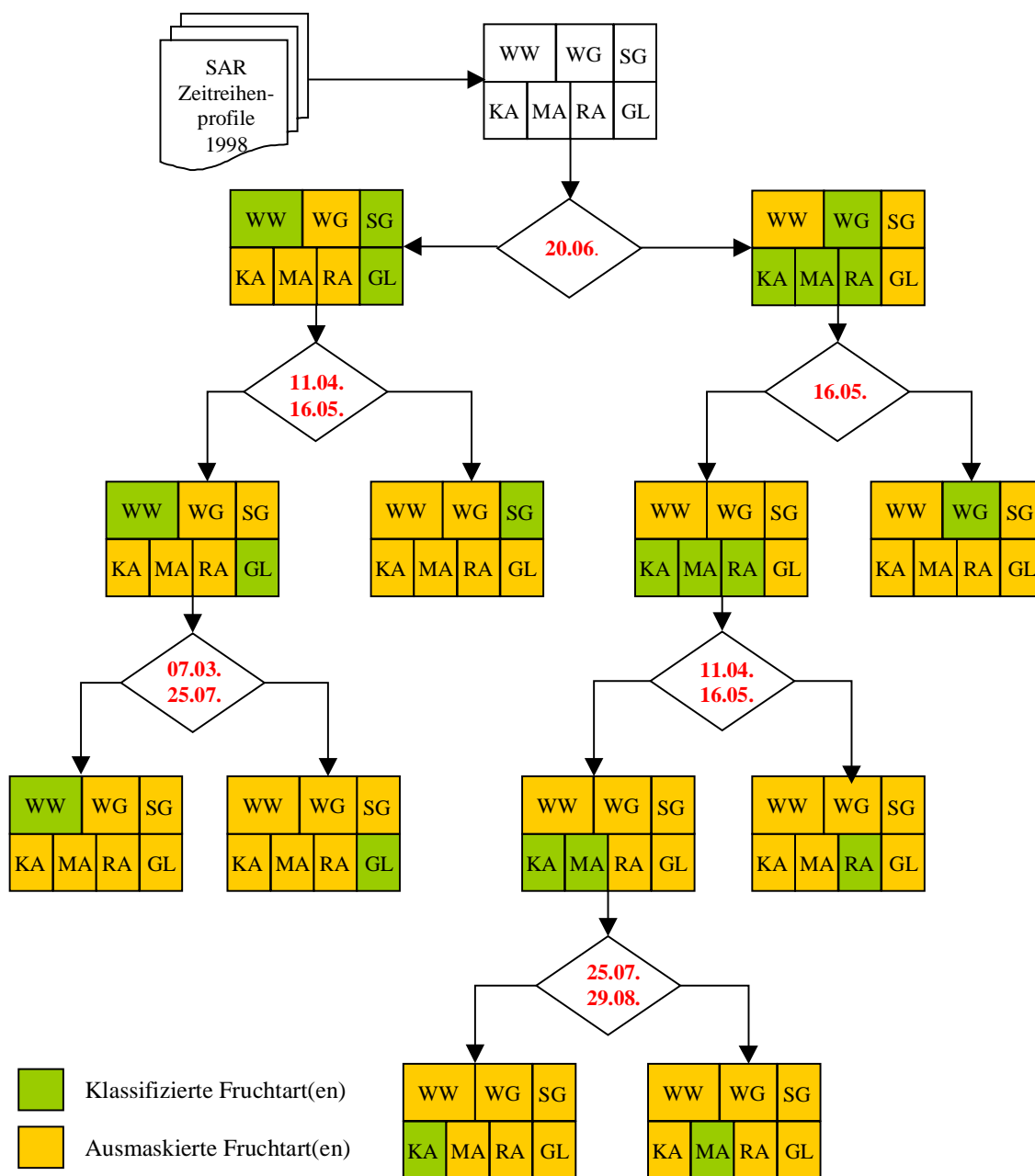


Abb. 8-12: Ablaufschema der hierarchischen Klassifizierung von 7 Fruchtarten am Beispiel der ERS-Zeitreihe von 1998

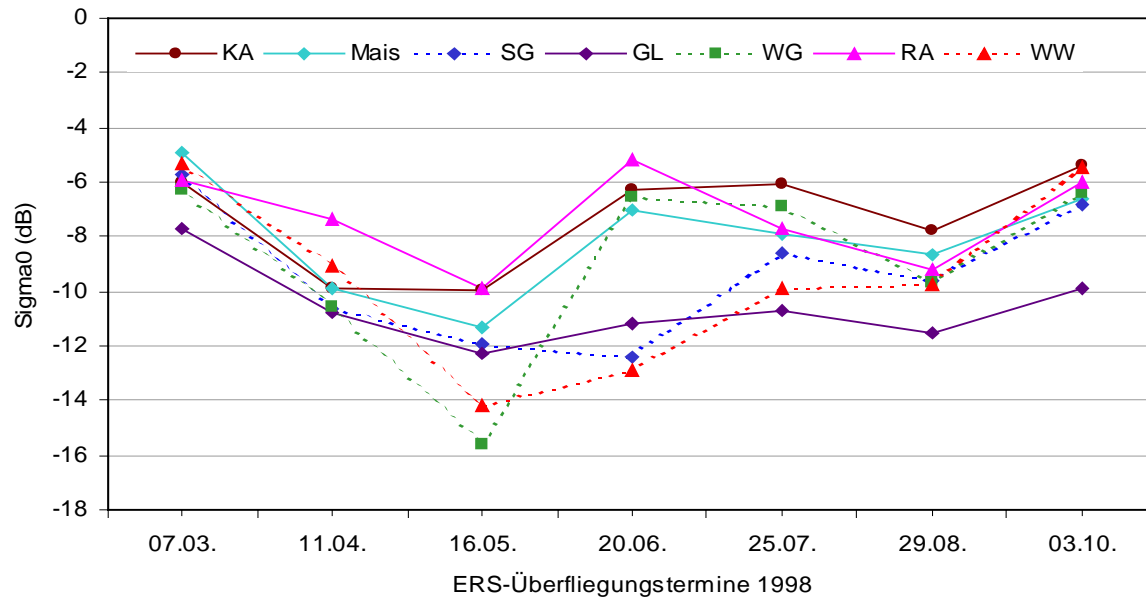


Abb. 8-13: Zeitprofile der mittleren Rückstreuung von 7 Fruchtarten 1998

8.6.2 Ergebnisse der hierarchischen Klassifizierung

Um das Potential des hierarchischen Klassifizierungsansatzes für multitemporale ERS SAR-Daten zu evaluieren, wurde lediglich ein Datensatz des Teilgebietes bei Garching aus dem Jahre 1998 ausgewertet¹.

Wie aus Abb. 8-13 hervorgeht, bestehen zum Zeitpunkt 20.06.1998 σ^0 -Differenzen von > 5 dB zwischen den Fruchtarten WW, SG und GL einerseits und den Kulturen WG, MA, KA und RA andererseits. Diese beiden Subklassen können demzufolge mit einer sehr hohen Genauigkeit von 98,0% getrennt werden. Die großen Rückstreudifferenzen vom 20.06. dürften vorrangig auf signifikante Frischmasseunterschiede zurückzuführen sein.

Maskiert man WG, MA, KA und RA-Felder aus, kann anhand der mittleren Rückstreuung der Termine 11.04. und 16.05. SG von WW und GL getrennt werden (σ^0 -Differenzen von 2-3 dB). Die Diskriminierung von SG ist daher möglich, weil WW und GL im Vergleich zu SG am 16.05. eine etwa doppelt so hohe Frischmasse aufweisen. Am 11.04. resultieren die Differenzen daraus, daß SG-Schläge vegetationsfrei sind und WW und GL den Boden vollständig bedecken. Dennoch können beide Klassen nur mit einer mäßigen Genauigkeit von 82,2% getrennt werden. Geeignete Zeitpunkte zur Klassifizierung der verbleibenden Fruchtarten WW und GL ergeben sich zu Beginn (07.03.) und am Ende der Vegetationsperiode (25.07.). Die Unterscheidung kann mit einer Genauigkeit von 94,5% erfolgen.

¹ Da das Klassifizierungsergebnis stark von den Rückstreuvarianzen zwischen den Schlägen derselben Klasse bzw. Fruchtart abhängt, empfiehlt es sich auch bei dieser Methode, eine Grobsegmentierung des Datensatzes anhand naturräumlicher Kriterien durchzuführen.

Betrachtet man die Klasse der Fruchtarten WG, KA, RA und MA, so ergibt sich aus Abb. 8-13, daß WG am 16.05. eine signifikant niedrigere Rückstreuung im Vergleich zu den übrigen drei Fruchtarten aufweist und daher mit einer sehr hohen Genauigkeit von 97% klassifiziert werden kann.

Im nächsten Schritt erfolgt die Diskriminierung von RA anhand des April- und Mai-Termins (91,8% Genauigkeit).

Die Klassifizierung der beiden letzten Fruchtarten MA und KA ist aufgrund ihrer ähnlichen Rückstreuprofile nur anhand der späten ERS-Termine vom 25.07. und 29.08. mit einer Genauigkeit von nur 82,3% möglich.

Da sich die Fehler durch sämtliche Hierarchiestufen fortpflanzen, ergibt sich aus den Einzelergebnissen eine Gesamtgenauigkeit von nur 79,8%. Das Ergebnis zeigt jedoch, daß alternativ zu den ML- und BPN-Verfahren auch mit Hilfe eines einfachen hierarchischen Klassifizierungsansatzes vergleichbare Gesamtgenauigkeiten erzielt werden können.

8.7 Diskussion zur Klassifizierung

Trotz der bekannten Vorteile aktiver Fernerkundungssensoren, wie Wetter- und Beleuchtungsunabhängigkeit, sind ERS SAR-Daten nur unter bestimmten Voraussetzungen für die Erfassung der Landnutzung geeignet. Einschränkend wirkt sich, wie bei allen zur Zeit existierenden orbitalen SAR-Systemen, der monofrequente und einfachpolarisierte Betriebsmodus aus¹. Eine weitere Problematik ergibt sich aus den physikalischen Streumechanismen am Boden und dem daraus resultierenden, systemimmanenten *Speckle*-Effekt.

Um obigen Einschränkungen entgegenzuwirken, wurde ein radarspezifisches Klassifizierungskonzept realisiert, daß durch folgende Merkmale gekennzeichnet ist:

1. Multitemporale Klassifizierung von ERS-Zeitreihen.
2. Objektorientierte, d.h. auf individuellen landwirtschaftlichen Schlägen basierende Auswertung der Fernerkundungsdaten.
3. Grobsegmentierung des Untersuchungsraumes im Vorfeld der Klassifizierung.
4. Einbeziehung der Kohärenz und bildstatistischer Kennwerte der Signalvariation, soweit sie signifikant zur Unterscheidung der Klassen beitragen.
5. Kombination von ERS SAR-Daten mit Bilddaten optischer Sensoren.
6. Optimierung der Kanalauswahl mit Hilfe multivariater Analysemethoden.

Klassifizierungsmethoden multitemporaler ERS-Aufnahmen, die die zeitlichen Veränderungen der physikalischen und geometrischen Eigenschaften der Streuer analysieren, bilden die Grundlage für eine genaue Klassifizierung. Eine multitemporale Betrachtungswei-

¹ ERS-1/-2: C_{vv}; JERS-1: L_{hh}; RADARSAT: C_{hh}.

se ist nicht nur wegen des geringen Informationsgehaltes einzelner ERS-Aufnahmen notwendig, sondern immer dann von Bedeutung, wenn zu unterschiedlichen Zeitpunkten signifikant unterschiedliche Ausprägungen eines untersuchten Phänomens - wie der Landnutzung - herrschen. Diese unterschiedlichen Ausprägungen spiegeln sich in den temporalen Verläufen der schlagbezogenen mittleren ERS-1/-2-Rückstreuquerschnitte einzelner Fruchtarten wider, deren Charakteristika eine Fruchtartenidentifizierung ermöglichen. Multitemporale Auswertungen sind im Zusammenhang mit satellitengetragenen SAR-Systemen die Regel, da Bilddaten in regelmäßigen Zeitintervallen und konstanter Qualität verfügbar sind.

Eine deutliche Verbesserung der Identifikationsraten wird jedoch erst dann erzielt, wenn eine schlag- statt pixelbezogene Klassifizierungsmethode realisiert wird. Dieser Ansatz ermöglicht die Auswertung ungefilterter ERS SAR-Daten, da durch die Mittelwertbildung über alle Pixel eines Schlates der für Radardaten typische *Speckle*-Effekt eliminiert wird. Voraussetzung dafür sind aktuelle digitale Schlaggrenzen, deren Erzeugung allerdings mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden ist.

Erfolgt im Vorfeld der Klassifizierung größerer Untersuchungsgebiete zusätzlich eine Einteilung in natürräumlich homogene Einheiten (Grobsegmentierung), können 6 Hauptfruchtarten mit > 80% bzw. 11 Hauptfruchtarten mit 75 bis 80% Genauigkeit differenziert werden.

Zieht man das von ULABY (1998) skizzierte Potential von SAR-Daten als Vergleich heran (Tab. 8-14), kann als Fazit festgehalten werden, daß durch die Einbeziehung zusätzlicher Geoinformationen (vektorielle Schlaggrenzen, Bodenkarte, DGM, etc.) deutlich verbesserte Ergebnisse gegenüber pixelbasierten Ansätzen, ohne Zusatzinformationen erzielbar sind. Nach ULABY (1998) ergibt sich nämlich bei einer pixelbasierten Klassifizierung von monofrequenten, einfachpolarisierten SAR-Daten eine maximale Genauigkeit von nur ca. 60%, wenn lediglich fünf Klassen (Wasser, urbane Flächen, Wald, niedrige Vegetation und vegetationsfreie Flächen) unterschieden werden sollen (sogenannte Level 1 Klassifizierung). Die Einbeziehung mehrerer einkanaliger Aufnahmen (multitemporale Klassifizierung) erhöht die Klassifizierungsgenauigkeit um maximal 10 bis 15%.

Tab. 8-14: Mit Radarfernerkundungsdaten erzielbare Klassifizierungsgenauigkeiten in Abhängigkeit von den Systemeigenschaften der SAR-Sensoren (nach ULABY 1998)

Radarfrequenzen	Polarisation	Klassifizierungstyp	Genauigkeit
1 Frequenz	1 Polarisation	Level 1 monotemporal	60%
1 Frequenz	1 Polarisation	Level 1 multitemporal	70-75%
1 Frequenz	1 Polarisation	Level 2 monotemporal	30-40%
1 Frequenz	1 Polarisation	Level 2 multitemporal	40-55%
2 Frequenzen	2 Polarisationen	Level 1	96%
2 Frequenzen	2 Polarisationen	Level 2	90%

Soll auf einer zweiten Stufe innerhalb der Klasse *niedrige Vegetation* zwischen mehreren Fruchtarten differenziert werden (sogenannte Level 2 Klassifizierung), beträgt nach ULABY

(1998) die Genauigkeit nur noch 30 bis 40% im monotemporalen Fall bzw. 40 bis 55% im multitemporalen Fall. Beides ist als völlig unzureichend zu bezeichnen. Das in Tab. 8-14 kursiv dargestellte Szenario entspricht den in dieser Arbeit gegebenen Randbedingungen.

8.8 Ausblick zur Klassifizierung

Neueste Forschungen versuchen, die komplementären Eigenschaften von Radardaten und Bilddaten optischer Sensoren zum Zwecke der Landnutzungsklassifizierung stärker als bisher auszunutzen. Dabei wurden allgemein positive Synergieeffekte durch die Kombination der unterschiedlichen Bilddatenquellen festgestellt, was zu signifikanten Verbesserungen der Klassifizierungsergebnisse führte (BRISCO & BROWN 1995; HAACK et al. 2000; HAACK & BECHDOL 2000; KUPLICH et al. 2000).

Ein ähnliches Potential zur Verbesserung der Landnutzungsklassifizierung kann durch multifrequente/polarisierte SAR Beobachtungen herbeigeführt werden, wobei eine Sensorausstattung mit zwei Frequenzen einer mit zwei Polarisationen und einer Frequenz vorzuziehen sei (ULABY 1998). Da derartige orbitale SAR-Systeme noch nicht existieren, können aus der Kombinationen existierender SAR-Systeme (ERS-2, JERS-1 und RADARSAT) multifrequente/polarisierte Datensätze simuliert werden. Eine vielversprechende Kombination ergibt sich dabei aus den C_{vv} -Daten des ERS-2 und den L_{hh} -Daten des JERS-1. So konnten KELLNDORFER et al. (1998b) zeigen, daß eine kombinierte multitemporale Auswertung von ERS/JERS-Daten die Ergebnisse einer Vegetationsklassifizierung signifikant verbessert.

Wie die Experimentaldaten der Shuttle-Mission X-SAR/SIR-C zeigten, wird sich das Potential der Radarfernerkundung bezüglich einer differenzierteren Fruchtartenklassifizierung durch den Einsatz neuer multifrequenter Systeme deutlich erhöhen. Fortschritte diesbezüglich sind in naher Zukunft durch das von der ESA entwickelte *Advanced Synthetic Aperture Radar* (ASAR) an Bord des ENVISAT-1 zu erwarten. Das ASAR, das wie seine Vorgänger ERS-1/-2 weiterhin nur mit einem C-Band ausgestattet ist, wird über verschiedene Polarisationsmodi und einen variablen Einstrahlwinkel zwischen 15° und 40° verfügen und somit das Nutzungspotential für terrestrische Anwendungen gegenüber der ERS-Baureihe deutlich erweitern (SUCHAIL et al. 1999). Darüber hinaus gewährleistet das ASAR eine kontinuierliche Fortsetzung der ERS-Meßreihen (ATTEMA et al. 1999). Weitere geplante Sensoren sind LightSAR¹ (L-Band vv, hh, hv, vh) und PALSAR² (L-Band hh,vv).

¹ LightSAR ist eine Initiative der NASA zur Entwicklung eines kostengünstigen Radarsatelliten zur Erdbeobachtung (http://lightsar.jpl.nasa.gov/lightsar_archive/facts/97/). Das System verfügt über 6 verschiedene Aufzeichnungsmodi mit Bodenauflösungen von 3 m (Spotlight High Resolution) bis 100 m (ScanSAR). Der Start ist für Ende 2000 geplant.

² Der PALSAR Sensor ist einer von drei Instrumenten an Bord des japanischen *Advanced Land Observation Satellite* (ALOS), dessen Aussetzen im Jahre 2002 geplant ist. Der multipolarimetrische ALOS/PALSAR wird wie sein Vorgänger JERS im L-Band operieren und wie ASAR/ENVISAT-1 über einen ScanSAR-Modus verfügen (<http://www.eorc.nasda.go.jp/ALOS/science.html>)

9 Ableitung bio- und bodenphysikalischer Parameter aus ERS SAR-Daten

9.1 Zielsetzung

Ziel der folgenden Untersuchung ist es, mit Hilfe von ERS SAR-Daten weiterführende Informationen über den Zustand von Böden und der Vegetation landwirtschaftlich genutzter Flächen zu erschließen, die über die Identifizierung der Kulturart hinausgehen. Die Untersuchungen bauen somit auf den im Vorfeld erzielten Ergebnissen der Landnutzungsklassifizierung auf.

Im Mittelpunkt des Interesses sollen zwei Parameter stehen, deren Informationsgehalt für zahlreiche Anwendungsbereiche von weitreichender Bedeutung ist:

1. Oberflächennahe Bodenfeuchte
2. Biomasse

Die Bodenfeuchte nimmt eine Schlüsselstellung in hydrologischen, meteorologischen und ökologischen Prozessen ein. Wichtige Interaktionen zwischen Atmosphäre und Geosphäre werden von ihr gesteuert: z.B. Evapotranspiration, Oberflächenabfluß, Infiltration, Grundwasserneubildung oder Pflanzenentwicklung. Auch im Rahmen agrarökologischer Entscheidungsregeln ist die Information über den aktuellen Feuchtezustand des Bodens eine wichtige Steuergröße. Verschiedene landwirtschaftliche Maßnahmen, wie die Bodenbearbeitung (Abschätzung der Befahrbarkeit), die Aussaat von Kulturen, das Ausbringen von flüssigem Stickstoffdünger oder die Anwendung von Herbiziden (Aufnahmefähigkeit des Bodens) können mit Hilfe aktueller Bodenfeuchteinformationen zeitlich optimiert werden, um somit einen Beitrag zum Boden- und Gewässerschutz zu liefern. Im Gegensatz zu herkömmlichen, arbeitsintensiven in situ Verfahren besitzen Radarfernerkundungsdaten das Potential, sowohl die räumliche als auch zeitliche Dynamik der Bodenfeuchte zu erfassen.

Die zeitliche Entwicklung der Biomasse einer Kulturart ist ein direkter Indikator für den zu erwartenden Ernteertrag. Eine regelmäßige Abschätzung der Biomasse aus Radardaten könnte auch der Verbesserung bestehender Wachstumssimulationsmodelle dienlich sein und damit indirekt zu einer exakteren Ertragsschätzung beitragen. Auch im Maßstabsniveau einzelner Schläge können Biomassekarten schlaginterne Inhomogenitäten aufzeigen, so daß in Verbindung mit zusätzlichen Bodeninformationen geeignete Maßnahmen ergriffen werden können. Eine solche Anwendung setzt allerdings geometrisch höher auflösende Radarsysteme als den ERS-1/-2 voraus, um für Großbetriebe relevant zu werden, die schon heute mit Hilfe von GPS-Systemen teilschlagbezogene Landbewirtschaftung betreiben (*precision farming*).

Die aus den Radardaten abgeleiteten bio- und bodenphysikalischen Parameter stellen jedoch nur dann eine wertvolle Ergänzung zu in situ Verfahren dar, wenn sie den Genauigkeitsanforderungen der potentiellen Anwender genügen. Generell werden für die Schätzung der Bodenfeuchte Genauigkeiten von $< 5\%$ bzw. $< 3\%$ für die Biomasse-schätzung gefordert (SAICH et al. 1995).

Aufgrund der regelmäßigen, wetterunabhängigen Aufnahmen, die mit Radarsystemen möglich sind, kann die Quantifizierung relativer Veränderungen der Parameter als Funktion der Zeit eine wertvolle Information darstellen. Auf eine absolute Kalibrierung der Modelle kann in diesem Fall verzichtet werden.

9.2 Modellierung der Radarrückstreuung

9.2.1 Typisierung existierender Modelle

Die Modellierung der Radarrückstreuung von Vegetation und Böden hat in den letzten drei Dekaden eine Vielzahl unterschiedlichster Ansätze verfolgt, die entsprechend der zugrundeliegenden physikalischen Theorie und ihrer Qualität eingruppiert werden können. Für praktische Anwendungszwecke, mit zur Zeit operationell verfügbaren SAR-Daten, sind Kriterien wie Invertierbarkeit sowie Art und Umfang erforderlicher Zusatzdaten von Bedeutung. Die Qualität eines Modells mißt sich dabei an seiner Vorhersagegenauigkeit, seiner räumlichen und zeitlichen Übertragbarkeit sowie seines Gültigkeitsbereiches hinsichtlich Frequenz, Einfallswinkel und Polarisation. Dementsprechend können drei Modellklassen unterschieden werden:

- **Empirische Modelle** haben in der Regel nur für ein begrenztes Gebiet, einen bestimmten Zeitpunkt und eine bestimmte Sensorkonfiguration Gültigkeit. Dennoch sind auf Grundlage einer umfassenden Ground Truth-Datenbasis einfache Korrelationen oder Regressionen probate Methoden, um unmittelbar Zusammenhänge zu Bestandes- und Bodenparametern aufzuzeigen, die eine physikalisch begründbare Wirkung auf den Rückstreuquerschnitt ausüben können. Einzelne Effekte auf die Rückstreuung zu isolieren, gelingt jedoch nur unter definierten, a priori bekannten Randbedingungen, die mit Hilfe von Ground Truth-Parametern beschrieben werden können. Die multifaktoriellen Einflüsse auf das Rückstreusignal mit Hilfe von multiplen Regressionen zu modellieren, ist grundsätzlich möglich. Die Ergebnisse sind allerdings wenig robust und entbehren meist einer physikalischen Kausalität. Generell bietet die Sensorausstattung des ERS, mit nur einer Frequenz, einer Polarisation und invariantem Einfallswinkel nicht die Möglichkeit, den Einfluß mehrerer unabhängiger Größen zu determinieren. Der Bonus der Multitemporalität kann dieses Defizit auch nur dann kompensieren, wenn für mindestens zwei unabhängige Aufnahmen bestimmte Einflußgrößen als konstant betrachtet werden können. Bei einer Bildwiederholungsrate von 35 Tagen und der hohen Veränderlichkeit landwirtschaftlicher Flächen bleibt ein solcher Ansatz auf wenige Anwendungen beschränkt (z.B. Bodenfeuchtemonitoring).

- **Semi-empirische Modelle** basieren meist auf physikalischen Theorien, die so weit vereinfacht wurden, daß eine Invertierung des Algorithmus möglich wird. Die Ableitungsalgorithmen zeichnen sich im Gegensatz zu den empirischen Modellen durch eine gewisse Robustheit aus, was ihre räumliche und zeitliche Übertragbarkeit steigert. Semi-empirische Modelle werden häufig für kombinierte Pflanzen-Boden-Probleme angewandt und setzen mehrere unabhängige Radarbeobachtungen voraus (Multifrequenz- und/oder Multipolarisationssysteme). Ein typischer Vertreter dieser Modellkategorie ist das sogenannte *Water-Cloud* Modell von ATTEMA & ULABY (1978), das als vereinfachtes Strahlungstransfermodell¹ erster Ordnung betrachtet werden kann. Die Abhängigkeit der Rückstreuung wird dabei auf zwei Parameter (Boden- und Pflanzenfeuchte) reduziert. Der empirische Teil begründet sich durch die Anpassung mehrerer Konstanten durch nichtlineare Regressionsanalysen. Aus oben genannten Gründen sind semi-empirische Modelle zur Ableitung bio- und bodenphysikalischer Parameter mit ERS-Daten nur bedingt anwendbar. Die nachfolgende Anwendung des *Water-Cloud* Modells kann demnach nur durch Zuhilfenahme zusätzlicher Ground Truth-Informationen realisiert werden, indem entweder die Bodenfeuchte oder die Pflanzenfeuchte als bekannt vorausgesetzt werden (s. Kap. 9.4.4).
- **Theoretische Modelle** lassen sich grob in wellenbasierte Ansätze (LANG & SIDHU 1983; CHAUHAN & LANG 1989) und Intensitätsansätze aufteilen. Letztere, die *Radiative Transfer* Modelle, gliedern sich wiederum nach Komplexität in solche 1. Ordnung (KARAM & FUNG 1983; ULABY et al. 1990 - MIMICS²), 2. Ordnung (KARAM et al. 1992; SAICH et al. 1995 – RT2³) und Monte Carlo Ansätze. Theoretische Modelle ermöglichen grundsätzlich die Aufspaltung der Nettorückstreuung in verschiedene Streumechanismen und tragen zum allgemeinen Verständnis dieser bei. Im Gegensatz zu empirischen und semi-empirischen Modellen sollten theoretische Modelle global anwendbar sein. Die Invertierbarkeit wird allerdings durch ihre Komplexität behindert (SAICH et al. 1995). Als nachteilig für praktische Anwendungen erweist sich ferner der hohe Parametrisierungsaufwand. Viele theoretische Modelle benötigen nicht nur zahlreiche, sondern meist schwer meßbare Eingangsparameter. Dabei haben sich bestehende Methoden zur Beschreibung komplexer natürlicher Objekte, wie eine Bodenoberfläche oder ein Pflanzenbestand, als inadequat herausgestellt (ULABY 1998). Da theoretische Modelle meist vollpolarimetrisch sind und große Frequenzbereiche abdecken, bilden sie die Grundlage für das Design optimierter zukünftiger SAR-Sensoren. Detaillierte Beschreibungen theoretischer Modelle sind u.a. bei SAICH et al. (1995) bzw. OLIVER & QUEGAN (1998) zu finden.

¹ Im folgenden als Radiative Transfer (RT)-Modell bezeichnet.

² Michigan Microwave Canopy Scattering Model.

³ 2nd Order Radiative Transfer Model.

9.2.2 Vorgehensweise zur Ableitung bio- und bodenphysikalischer Parameter

Gemäß der Zielsetzung soll im ersten Teil der Untersuchung eine Modellierung der Bodenfeuchte erfolgen. Aufgrund der weitgehenden Maskierung des Bodenfeuchteinflusses auf die Radarrückstreuung durch die Vegetation, werden ausschließlich vegetationsfreie¹ Flächen berücksichtigt. Wie aus Abb. 9-1 hervorgeht, wird die Gesamtrückstreuung zu Beginn der Vegetationsperiode ausschließlich durch die Eigenschaften des Bodens bestimmt. Der boden-induzierte Rückstreuteil nimmt in dem Maße ab, wie der vegetations-induzierte Anteil zunimmt. Erst im Reifestadium, wenn der Vegetationsbestand wieder transparenter für die Mikrowellenstrahlung wird, wird der Einfluß des Bodens sowie Interaktionen zwischen Boden und Pflanze wieder stärker (ULABY et al. 1984).

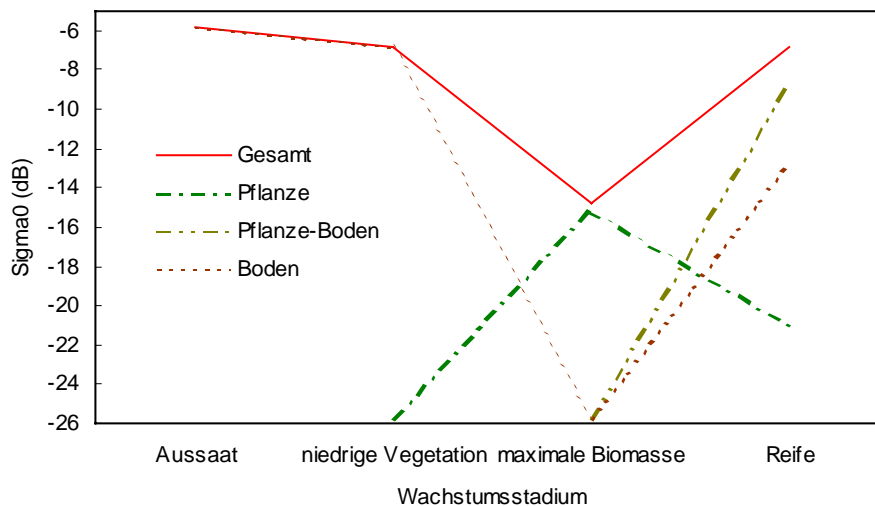


Abb. 9-1: Zeitliche Veränderung der Rückstreuteile von Boden, Pflanzen und Pflanze-Boden zur Gesamtrückstreuung am Beispiel von Winterweizen (nach WOODING et al. 1995)

Das Bodenfeuchtemodell basiert auf der Annahme einer einfachen linearen Regression zwischen dem Rückstreuquerschnitt (σ^0) und der volumetrischen Bodenfeuchte (m_v) der obersten Zentimeter eines Bodens:

$$\sigma^0 (dB) = C + D \cdot m_v \quad \text{Gl. 9-1}$$

Der empirisch ermittelte Koeffizient C beschreibt die Rückstreuung von trockenen Böden; der Koeffizient D bringt die Sensitivität der Rückstreuung auf Veränderungen der Bodenfeuchte zum Ausdruck ($d\sigma^0/dm_v$).

Neben der Bodenfeuchte wird die Radarrückstreuung durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Bodenrauigkeit
- Periodische Anbaustrukturen (Reihenrichtung)

¹ Die Definition der Modellbedingungen und die entsprechende Datenauswahl ist in Kapitel 9.3 dokumentiert.

- Topographie und lokaler Einfallswinkel
- Bodeneigenschaften (Bodenart, Lagerungsdichte, Humusgehalt, Steingehalt)

Durch Datenstratifizierung und die Ergänzung empirisch ermittelter Korrekturterme in Gl. 9-1 wird versucht, den Einfluß obiger Faktoren auf die Ableitung der Bodenfeuchte zu minimieren.

Im zweiten Teil der Untersuchung steht die Ableitung von ertragsindikativen Pflanzenparametern, insbesondere der Biomasse und dem absoluten Wassergehalt der Vegetation, im Vordergrund. Hierzu werden drei Modellansätze verfolgt:

1. Lineare Regressionsanalysen
2. Anwendung des semi-empirischen *Water-Cloud* Modells nach ATTEMA & ULABY (1978)
3. Multiple Regressionsanalysen

Aufgrund der einfachen empirischen bzw. semi-empirischen Modellansätze können die gefundenen Beziehungen zwischen der Radarrückstreuung und den Bestandesparametern unter Berücksichtigung der jeweiligen Rahmenbedingungen unmittelbar invertiert werden. Auf eine Anwendung theoretischer Modelle, wie IEM¹, RT2 oder MIMICS mußte aufgrund fehlender Eingangsparameter verzichtet werden.

Datengrundlage bilden die intensiv beprobten Testschläge der Ground Truth-Meßkampagne der Jahre 1997 und 1998. Zur Untersuchung des Reihenrichtungseffektes wurde zusätzlich auf die Daten der Schlagbonitur 1997 und 1998 zurückgegriffen.

9.3 Modellierung der Bodenfeuchte vegetationsfreier Flächen

9.3.1 Physikalische Zusammenhänge

Die Stärke des Rückstreuquoeffizienten σ^0 von einer im Mikrowellenbereich beleuchteten Bodenoberfläche wird von zwei Größen beherrscht:

1. Rauigkeit der Bodenoberfläche
2. Dielektrizitätskonstante (ϵ) der Bodenoberfläche

Dem Einfluß der Bodenrauigkeit auf den Rückstreuquerschnitt wird generell die größte Bedeutung beigemessen, wobei sich die Parametrisierung nach wie vor als äußerst komplex erweist (ULABY 1998). Neuere Ansätze beschreiben die Bodenrauigkeit daher als Überlagerung mehrerer finiter räumlicher Skalen: Die kleinste Skala bezieht sich auf die isotrope Rauigkeit (*random roughness*), die hauptsächlich durch die Größe der Bodenaggregate (Bröckel bzw. Klumpen) charakterisiert ist. Übliche Parameter zur Messung der

¹ Integral Equation Model (FUNG et al. 1992; FUNG et al. 1996).

kleinskaligen Rauigkeit sind RMS-Höhe¹ (vertikale Komponente) und Korrelationslänge (horizontale Komponente)². Typische RMS-Höhen für Ackerflächen bewegen sich zwischen 0,5 cm (glatte Oberfläche; z.B. Saatbeetvorbereitung oder gewalzte Oberflächen) und 4 cm (raue Oberfläche; z.B. frisch gepflügter Acker mit großen Bodenklumpen). Die Korrelationslängen variieren entsprechend zwischen ca. 4 cm und 10 cm (BEAUDOIN et al. 1990). Schwierigkeiten ergeben sich allerdings bei der Schätzung der horizontalen Rauigkeitskomponente, insbesondere dann, wenn die Oberflächen zusätzlich durch periodische Strukturen überlagert werden, die aus Bodenbearbeitungsmaßnahmen resultieren können (MATTIA et al. 1998; LE TOAN et al. 1998; DAVIDSON et al. 1998). So zeigten in situ Messungen mit Laser-Profilern eine Abhängigkeit der gemessenen Korrelationslänge von der Abtastbreite des benutzten Gerätes (MANNINEN et al. 1998). Die periodischen Bearbeitungsstrukturen können einer mittleren Rauigkeitsskala zugeordnet werden, die sich horizontal durch den Reihenabstand weniger Dezimeter definiert. Dem überlagert ist eine äußere Makro-Skala (einige 10er-Meter), die den Geländeeinfluß der beleuchteten Fläche repräsentiert. Die meisten Methoden zur Beschreibung einer isotrop rauhen Oberfläche legen eine stationäre Zufallsvariable zugrunde, die entweder in Form einer Gaußschen oder exponentiellen Autokorrelationsfunktion abfällt (BORGEAUD & BELLINI 1998).

Untersuchungen zur Sensitivität der ERS-Radarrückstreuung gegenüber Rauigkeitsveränderungen ergaben, daß bei relativ glatten Oberflächen (RMS-Höhen < 1 cm) kleinste Veränderungen der Rauigkeit sich sehr stark (mehrere Dezibel) auf das Rückstreusignal auswirken. Erst ab einer Bodenrauigkeit mit RMS-Höhen > 3 cm ist die Rückstreuung weitgehend unabhängig gegenüber weiterer Rauigkeitszunahmen (TANSEY & MILLINGTON 1997). Die meisten Ackerflächen sind jedoch durch Rauigkeiten mit RMS-Höhen > 1 cm charakterisiert (ALTESE et al. 1996).

Die zweite wichtige Einflußgröße stellt die komplexe Dielektrizitätskonstante ϵ dar. Sie ist eine fundamentale Größe, die die Reflexions- und Absorptionseigenschaften von Wellen charakterisiert, die mit einem Material interagieren (ULABY et al. 1996). Insbesondere der Realteil der Dielektrizitätskonstante ϵ_r zeigt eine strenge nichtlineare Abhängigkeit gegenüber der volumetrischen Bodenfeuchte m_v (HALLIKAINEN et al. 1985). Für völlig trockene Böden nimmt ϵ_r frequenzunabhängig den Wert von ca. 2,5 an. Im Vergleich dazu weist Wasser einen Wert von ca. 81 auf. Entsprechend nimmt mit zunehmender Befeuchtung des Bodens die Dielektrizitätskonstante zu, wobei der Anstieg auf den Volumenanteil des Bodenmatrix-Wasser-Gemisches zurückzuführen ist. Bei vollständig gesättigten Böden und einer Frequenz von 5 GHz beträgt ϵ_r zwischen 25 und 32 in Abhängigkeit von der Bodenart bzw. der Feldkapazität.

¹ Die RMS-Höhe entspricht der Standardabweichung der lokalen Höhenvariation der Oberfläche.

² Zur Beschreibung der vertikalen Rauigkeitskomponente wird auch häufig der ks-Wert herangezogen, der die RMS-Höhe in Abhängigkeit von der Wellenlänge beschreibt (ULABY 1998).

Das dielektrische Verhalten feuchter Böden ist im geringeren Maße auch von der Bodenart abhängig (HALLIKAINEN et al. 1985). Physikalische Ursache dafür ist die Abnahme der Dielektrizitätskonstanten mit zunehmendem Anteil an gebundenem Wasser¹ im Boden. Dieser steht im funktionalen Zusammenhang mit der spezifischen Oberfläche der Bodenmatrix und damit der Korngrößenverteilung (SCHACHTSCHABEL et al. 1992). Somit weisen tonige Böden bei gleicher volumetrischer Bodenfeuchte im Vergleich zu sandigen Böden einen niedrigeren ϵ_r -Wert auf. Hohe spezifische Oberflächen sind auch für Böden mit großen Anteilen an organischem Material kennzeichnend, so daß von einem invers proportionalen Zusammenhang zwischen der Dielektrizitätskonstanten und dem Gehalt an organischem Material ausgegangen werden kann (Abb. 9-2).

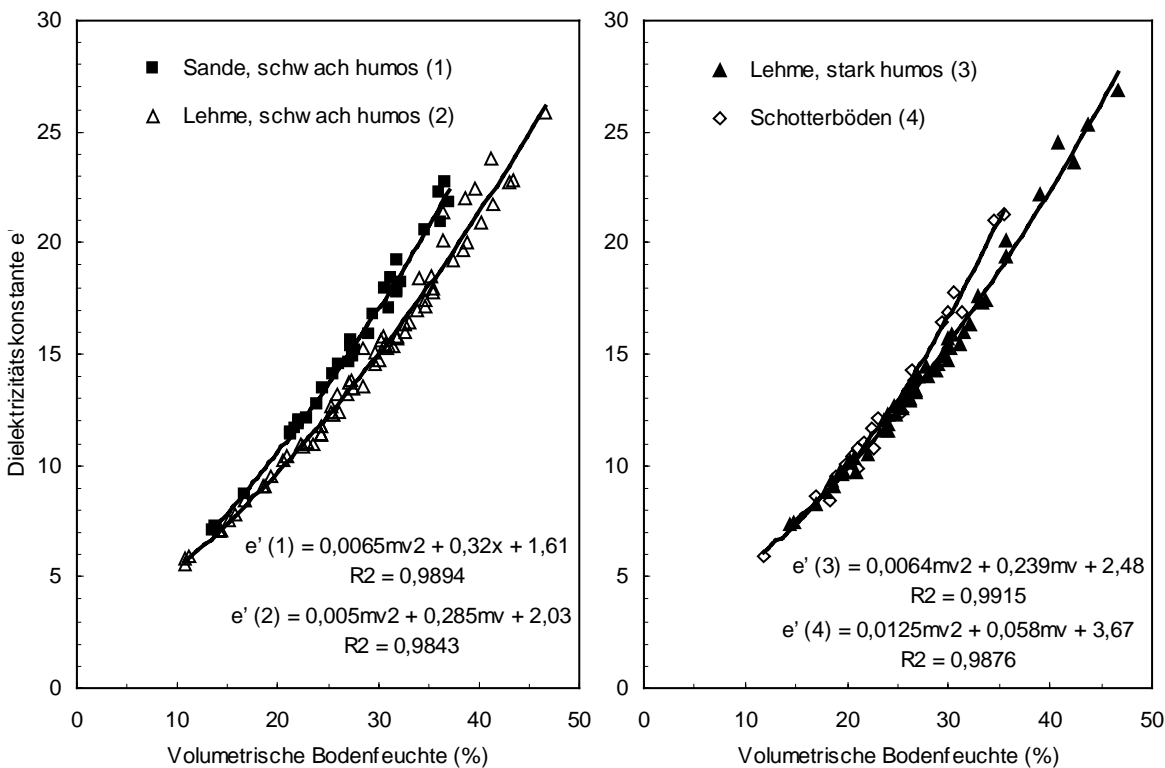


Abb. 9-2: Beziehung zwischen Dielektrizitätskonstante und Bodenfeuchte in Abhängigkeit der vier Bodenartengruppen

Die von HALLIKAINEN et al. (1985) gefundenen Zusammenhänge zwischen Dielektrizitätskonstante und volumetrischer Bodenfeuchte zeigen in Abhängigkeit des Ton- und Sandgehaltes eine sehr gute Anpassung an Polynominalfunktionen zweiten Grades. Überträgt man die entsprechende Funktion² auf die gegebenen Sand- und Tongehalte der Böden des Untersuchungsgebietes, werden vier unterschiedliche Bodenartenklassen erkennbar: schwach

¹ Adsorptionswasser, das die feste Oberfläche der Teilchen umhüllt. Van der Waalsche Kräfte sorgen für eine starke H-Bindungen der Sauerstoffatome der festen Oberfläche mit denen des Wassers.

² Die zugrundegelegten Parameter der Polynominalfunktion beziehen sich auf eine Frequenz von 6 GHz, die mit der des ERS-1/-2 vergleichbar ist.

humose Sande, schwach humose Lehme, stark humose Lehme und Schotterböden mit hohem Kies- bzw. Steingehalt. Die Unterschiede zwischen den Bodenartenklassen sind allerdings nicht sehr stark ausgeprägt und erst bei höheren Bodenfeuchten zu beobachten. Der Einfluß der Bodenart auf die Radarrückstreuung wird in Kapitel 9.3.4 näher untersucht.

Der Temperatureinfluß auf die Dielektrizitätskonstante ist nur dann signifikant, wenn die Bodentemperatur unter den Gefrierpunkt sinkt (ULABY et al. 1996) und muß daher nicht weiter berücksichtigt werden.

9.3.2 Bodenfeuchtemessung im Gelände mit *Time Domain Reflectometry*

Die Messungen zur Bodenfeuchte wurde mit TDR-Stabsonden (*Time Domain Reflectometry*) des Typs *Trime*[®] durchgeführt¹. TDR zählt zu den schnellsten und genauesten indirekten Methoden zur Messung des volumetrischen Wassergehaltes eines Bodens. Aus Messung der Dielektrizitätszahl und Temperatur sowie Schätzung der Porosität und Dielektrizitätszahl der Bodenmatrix wird der Wassergehalt berechnet. Der absolute volumetrische Wassergehalt kann unabhängig von der Bodenart mit einer Genauigkeit von etwa 0,012 Vol.-% gemessen werden (ROTH et al. 1989). Die Messung der volumetrischen statt gravimetrischen Bodenfeuchte wird bevorzugt, da die Dielektrizitätskonstante feuchter Böden unmittelbar proportional zur Anzahl der Wasserdipole pro Volumeneinheit ist (DOBSON & ULABY 1986). Pro Meßfeld und Termin wurden insgesamt 24 Messungen durchgeführt (sechs Wiederholungen an vier repräsentativen Standorten innerhalb des Schlages). Die Meßwerte beziehen sich auf ein 5 cm-Profil. Die mittlere Bodenfeuchte eines Meßschlages resultiert aus Mittelung der sechs Wiederholungsmessungen pro Standort und anschließender Mittelung der vier Standorte pro Meßschlag. Um die oben genannte theoretische Meßgenauigkeit mit TDR zu relativieren, sei erwähnt, daß die Standardabweichung der sechs Wiederholungsmessungen innerhalb eines Quadratmeters im Mittel pro Termin zwischen 2,5 und 3 Vol.-% betrug. Die Gesamtstreuung innerhalb eines Meßschlages betrug im Mittel zwischen 3 und 3,5 Vol.-%. Da einige Meßschläge durch unterschiedliche Bodeneinheiten und damit unterschiedliche Bodenwasserhaushaltskennwerte geprägt sind, ergaben sich maximale Bodenfeuchteunterschiede bis zu 11,6 Vol.-% innerhalb einzelner Schläge.

Abb. 9-3 zeigt den Verlauf der mittleren Bodenfeuchte und der Standardabweichung der Meßschläge 1998 im Zusammenhang mit den mittleren Tagesniederschlagssummen der 46 DWD-Stationen des Untersuchungsgebietes.

Die Mächtigkeit des betrachteten Bodenvolumens, auf das sich die Bodenfeuchtemessung beziehen sollte, hängt sowohl von der Frequenz des Radarsystems als auch von der Bodenfeuchte und der Bodenart ab. Die Problematik bei der Festlegung der Meßtiefe besteht darin, daß einerseits bei trockenen Böden die Eindringtiefe der Radarstrahlen die gewählte Meßtiefe übersteigen kann, andererseits bei feuchten Böden die gewählte Meßtiefe meist

¹ Die TRIME-FM-Handmeßgeräte für den mobilen Feldeinsatz wurden mit Sonden des Typs P2-D mit einer Länge von 50 mm bestückt.

zu groß ist. Im letzteren Fall kann dies zu erheblichen Fehlern führen, wenn steile Wasserpotentialgradienten innerhalb der obersten Bodenschicht existieren (z.B. bei Wiederbefeuchtung nach langer Trockenheit). Je steiler der Wasserpotentialgradient der obersten Bodenschicht ist, desto schwieriger gestaltet sich eine physikalisch begründete Abschätzung der effektiven Eindringtiefe. Für Bodenfeuchteuntersuchungen mit dem C-Band wird üblicherweise ein Meßprofil von 5 cm zugrundegelegt (BRUCKLER et al. 1988, ULABY et al. 1986a).

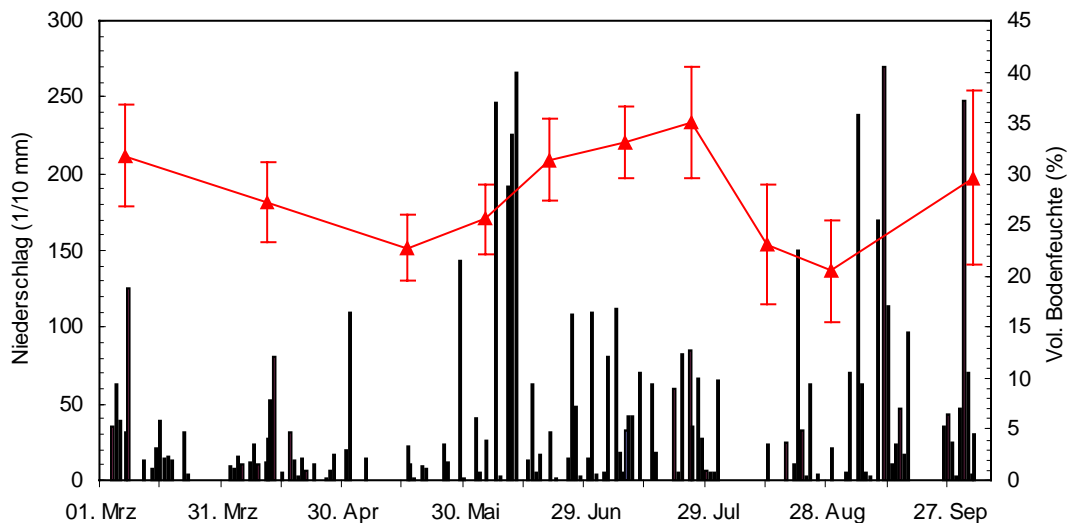


Abb. 9-3: Tagesniederschläge und mittlere Bodenfeuchte der Meßschläge 1998 als Funktion der Zeit

9.3.3 Datenauswahl und Definition des Gültigkeitsbereichs

Zur Vereinfachung der Problematik werden zunächst nur vegetationsfreie Böden bzw. Flächen mit geringer Pflanzenbedeckung betrachtet. Nach ULABY et al. (1996) kann der Pflanzeneinfluß auf die Radarrückstreuung im C-Band als vernachlässigbar gering eingestuft werden, wenn folgende Kriterien erfüllt sind:

1. Biomasse $\leq 0,5 \text{ kg/m}^2$ und
2. Wuchshöhe $\leq 10 \text{ cm}$.

Ein weiteres Auswahlkriterium war eine Mindestgröße der Schläge von 2 ha bzw. 100 SAR-Pixel. Um Vergleichsuntersuchungen in Abhängigkeit des Einfallswinkels zu vermeiden, wurden nur Schläge berücksichtigt, deren mittlerer Einfallswinkel zwischen 23° und 28° betrug. Innerhalb dieser Spannweite sind die winkelabhängigen Variationen des Rückstreuquerschnittes vernachlässigbar gering, was im nachfolgenden Kapitel gezeigt wird.

Ferner wurden Schläge ausgeschlossen, die durch größere Mengen an Ernterückstände geprägt waren, die entweder gar nicht oder nur teilweise in den Boden eingearbeitet wurden.

Unter Einbeziehung der Untersuchungsjahre 1997 und 1998 standen abschließend 178 Fälle zur Verfügung, die sich auf 60 verschiedene Schläge und 13 ERS-2 Überfliegungs-termine beziehen. Meßwerte aus 1996 wurden verworfen, da einerseits nur gravimetrische Bodenfeuchtemessungen durchgeführt wurden und eine Umrechnung in volumetrische Feuchte aufgrund fehlender exakter Daten zur Lagerungsdichte nicht möglich war. Darüber hinaus muß für 1996 die Kalibrierengenauigkeit der ermittelten Rückstreuoeffizienten in Zweifel gezogen werden.

9.3.4 Einfluß der Bodenart des Oberbodens

Wie bereits gezeigt werden konnte, ist der Einfluß der Bodenart auf die Dielektrizitätskonstante nicht sehr groß (s. Kap. 9.3.1). Dennoch bleibt auf Grundlage der experimentellen Daten zu überprüfen, ob von Bodeneigenschaften allgemein ein Einfluß auf die Beziehung zwischen Radarrückstreuung und Bodenfeuchte ausgeht. Diese Frage ist deshalb von Interesse, da das Untersuchungsgebiet durch eine sehr heterogene Bodenlandschaft geprägt ist.

Zur Vorgehensweise: Die insgesamt 67 im Untersuchungsgebiet vorkommenden Bodeneinheiten wurden entsprechend ihrer Bodenart (unter besonderer Berücksichtigung des Steingehaltes) und ihres Gehaltes an organischem Material in vier möglichst homogene Gruppen zusammengefaßt. Die Gruppierung erfolgte mit Hilfe einer K-Means-Clusteranalyse¹ anhand des Ton-, Schluff-, Sand- und Bodenskelettanteils, basierend auf den Daten des A_h- bzw. A_p-Horizontes. Als Datengrundlage dienten die Ausführungen von WITTMANN et al. (1981), FETZER et al. (1986) und SCHMIDT et al. (1992) zur digitalen Konzeptbodenkarte 1 : 50 000. Die vier Bodenartengruppen und ihre repräsentativen Bodeneinheiten sind in Tab. 9-1 zusammengestellt. Die Angaben zum Humusgehalt wurden den Kennzeichnungen der Bodeneinheiten (FETZER et al. 1986) entnommen.

Tab. 9-1: Bodenartengruppen und repräsentative Bodentypen nach Clusteranalyse

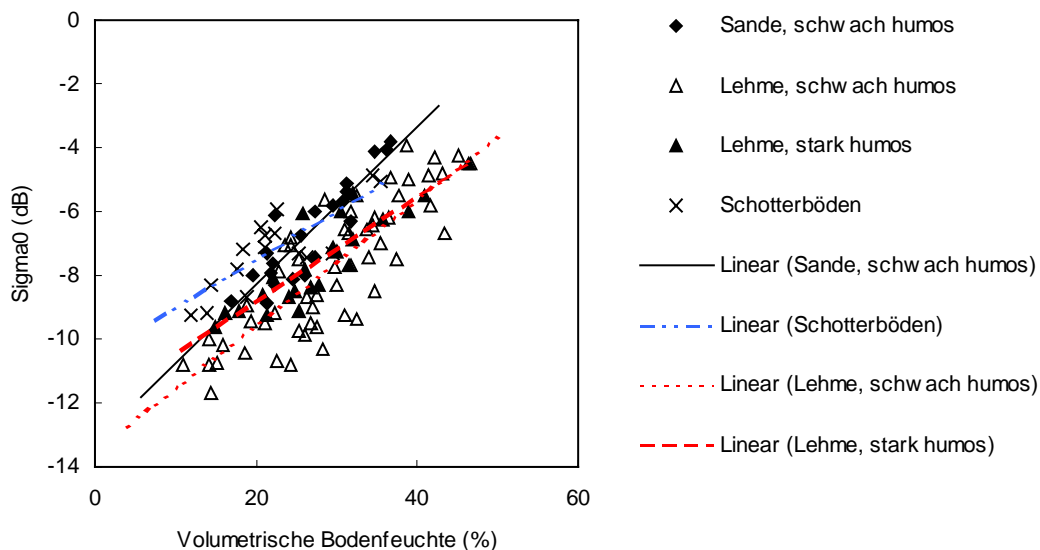
Bodenartengruppe	Korngrößenverteilung in Gew. %			Boden-Skelett in Gew. %	Kurz-zeich. (KA4 ²)	Repräsentativer Bodentyp
	T	U	S			
Sande, nicht bis schwach humos	8,7	29,1	62,2	3-6	SI3	Braunerde aus sandigem Molassematerial
Lehme, nicht bis schwach humos	18,7	55,4	25,9	0-6	Lu	Parabraunerden aus Molassematerial
Lehme, stark bis sehr stark humos	14,4	55,4	30,2	1-9	Uls	Braunerden und Parabraunerden aus Lößlehm
Schotterböden, sehr skelettreich, zum Teil humos bis sehr stark humos	20,2	30,5	49,3	28	Ls3	Para- und Ackerpararendzinen aus holozänen und jungpleistozänen Schottern

¹ K-Means Cluster führt eine Cluster-Analyse mit einem Algorithmus durch, der vom Benutzer die Angabe der Clusteranzahl verlangt.

² Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage (AG BODEN 1994).

Für jede der vier Bodenarten wurde mit Hilfe einer linearen Regression der Rückstreuquerschnitt als Funktion der volumetrischen Bodenfeuchte dargestellt. Um den Rauigkeitseffekt zu minimieren, wurden nur Schläge mit annähernd gleicher Bodenrauigkeit berücksichtigt. Ferner wurden Schläge von der Untersuchung ausgeschlossen, die nicht eindeutig durch eine homogene Bodeneinheit gemäß der Konzeptbodenkarte gekennzeichnet waren.

Die Regressionsgeraden der linearen Beziehungen sind in Abb. 9-4 zusammengefaßt:



Bodenartenklasse	Regressionsgerade	R ²
Sande, schwach humos	$\sigma^0 = 0,26 \text{ mv} - 13,6$	0,80
Lehme, schwach humos	$\sigma^0 = 0,19 \text{ mv} - 13,6$	0,69
Lehme, stark humos	$\sigma^0 = 0,16 \text{ mv} - 12,1$	0,78
Schotterböden	$\sigma^0 = 0,15 \text{ mv} - 10,6$	0,68

Abb. 9-4: Regressionsgeraden der linearen Beziehungen zwischen Radarrückstreuung und Bodenfeuchte (m_v) für vier verschiedene Bodenarten

Vergleicht man die Gradienten der Ausgleichsgeraden, zeigt der Rückstreuquerschnitt sandiger Böden eine höhere Sensitivität gegenüber der Bodenfeuchte als dies für lehmige oder schotterreiche Böden der Fall ist. Für Lehme ist der Anstieg der Rückstreuung pro 10% Bodenfeuchte hingegen geringer als 2 dB. Ein höherer Anteil an organischem Material scheint sich gleichermaßen in einer abnehmenden Sensitivität ($d\sigma^0/dm_v$) niederzuschlagen.

Ein weiterer Effekt sind die tendenziell höheren σ^0 -Werte mit zunehmendem Sandgehalt bei gleicher Bodenfeuchte. Physikalische Ursache dafür ist der geringere Anteil an Adsorptionswasser bei zunehmender Korngröße und damit abnehmender spezifischer Oberfläche der festen Teilchen (SCHACHTSCHABEL et al. 1992). Auch Schotterböden, deren Bodenoberfläche oft über 50% mit Kiesen und Steinen bedeckt war, zeichnen sich durch insgesamt höhere Rückstreuoeffizienten und eine geringe Feuchtesensitivität aus.

Wie in Kapitel 9.3.4 gezeigt wird, ist im Vergleich zu anderen Störeffekten der Einfluß der Bodenart des Oberbodens auf die Beziehung zwischen Radarrückstreuung und volumetri-

scher Bodenfeuchte von untergeordneter Bedeutung. Auf eine Korrektur dieses Einflusses bezüglich der Ableitung der Bodenfeuchte aus den Rückstreukoeffizienten wird daher verzichtet.

Es sei in diesem Zusammenhang erwähnt, daß die Bodenart neben der Lagerungsdichte maßgeblich den Wasserhaushalt bzw. die Speicherkapazität eines Bodens regelt und damit einen unmittelbaren Einfluß auf den aktuellen Feuchtezustand eines Standortes ausübt. So wurde besonders während niederschlagsarmer Perioden eine stark positive Korrelation zwischen gemessener Bodenfeuchte und nutzbarer Feldkapazität festgestellt. Die räumliche Verteilung der Bodenfeuchte spiegelt somit auch die der Substratverteilung wider.

9.3.5 Einfluß der kleinskaligen Bodenrauigkeit

Die kleinskalige, isotrope Rauigkeit von Bodenoberflächen wird durch das Bodengefüge¹ bestimmt. Diese, als *random roughness* bezeichnete Rauigkeit, leitet sich u.a. aus der Größe der Bodenaggregate (Bröckel und Klumpen) ab, die vom Grundgefüge (Einzelkorn-, Kitt- oder Kohärentgefüge), der Bodenbearbeitung und dem Verwitterungszustand abhängig ist. Eine isotrope Verteilung der Bröckel bzw. Klumpen kann beispielsweise durch homogenisierende Bodenbearbeitungsmaßnahmen wie Eggen, Striegeln oder Grubbern erzeugt werden. Die für diese Skala typischen Rauigkeitsunterschiede bewegen sich in einer Größenordnung von einigen Millimetern bis wenigen Zentimetern.

Um den Einfluß der kleinskaligen, isotropen Bodenrauigkeit auf die σ^0 -Bodenfeuchte-Beziehung zu berücksichtigen, wurde eine Stratifizierung des Datensatzes in fünf Bodenrauigkeitsklassen vorgenommen (Abb. 9-5). Für jede Rauigkeitsklasse wurden die Parameter C und D der Gl. 9-1 (S. 138) separat bestimmt. Die Zuordnung der Rauigkeitsklasse fand anhand der relativen lokalen Höhenunterschiede (Δh) statt, die aus einer Kombination der Bodenbearbeitung, der Bodenart, des Bodengefüges, der Aggregatgröße und des Erosions- bzw. Verschlammungszustandes resultierten. So kann die gleiche Bodenbearbeitung wie beispielsweise das Eggen auf sandigen Böden aufgrund von Einzelkorngefüge zur Rauigkeitsklasse II führen, wohingegen auf lehmigen Böden aufgrund von Kohärentgefüge größere Bodenaggregate und damit eine rauhere Oberfläche entsteht. Auch die stark zersetzten, humusreichen Böden mit Krümelgefüge zeigten selbst nach Pflugbearbeitung eine relativ ebene, homogene Oberfläche.

Schläge mit periodischen Bodenbearbeitungsstrukturen blieben aufgrund ihrer Reihenrichtungsabhängigkeit für diese Untersuchung unberücksichtigt. Dieser Sonderfall wird an späterer Stelle detaillierter untersucht (s. Kap. 9.3.6).

Abb. 9-5 zeigt typische Beispiele der fünf Bodenrauigkeitsklassen.

¹ Unter Bodengefüge wird die räumliche Anordnung der festen Bodenbestandteile verstanden (AG Boden 1994, S. 116ff).

		
Klasse I: $\Delta h < 3$ cm; meist gewalzt od. geeegt und Einzelkorngefüge	Klasse II: $\Delta h = 3 - 5$ cm; meist geeegt; Saatbeetvorbereitung	Klasse III: $\Delta h = 6 - 10$ cm; meist gegrubbert
		
Klasse IV: $\Delta h = 11 - 20$ cm; meist gepflügt u. Pflugschollen zerfallen	Klasse V: $\Delta h > 20$ cm; gepflügt	Nicht berücksichtigte Sonderfälle: Dammstrukturen, etc.

Abb. 9-5: Definierte Bodenrauigkeitsklassen

9.3.6 Einfluß der Reihenrichtung

Die durch Bodenbearbeitungsmaßnahmen in der Landwirtschaft hervorgerufene strukturelle Ausprägung des Oberbodens kann als übergeordnete Skala im Sinne einer mehrskaligen Bodenrauigkeitsdefinition verstanden werden (BEAUDOIN et al. 1990). Wird die kleinskalige Bodenrauigkeit zusätzlich durch periodisch angeordnete Furchen und linienhafte Erhöhungen überlagert (mesoskalige Rauigkeit), können richtungsabhängige Modulationen der Radarrückstreuung beobachtet werden, die einen Variationsbereich von mehreren Dezibel umfassen (WHITT & ULABY 1994). Besonders ausgeprägte Reihenrichtungseffekte ergeben sich bei Kulturen wie Kartoffel oder Spargel.

Bereits im Rahmen der Zeitreihenanalyse konnte festgestellt werden, daß die Zwischenschlagvarianz der Radarrückstreuoeffizienten bis zum Zeitpunkt des Reihenschlusses sehr groß war. Erst als die Pflanzen benachbarter Reihen den Boden vollständig bedeckten und die Pflanzendecke sich als relativ homogene, isotrope Schicht darstellte, glichen sich die mittleren Rückstreuquerschnitte verschiedener Schläge an (Abb. 9-6).

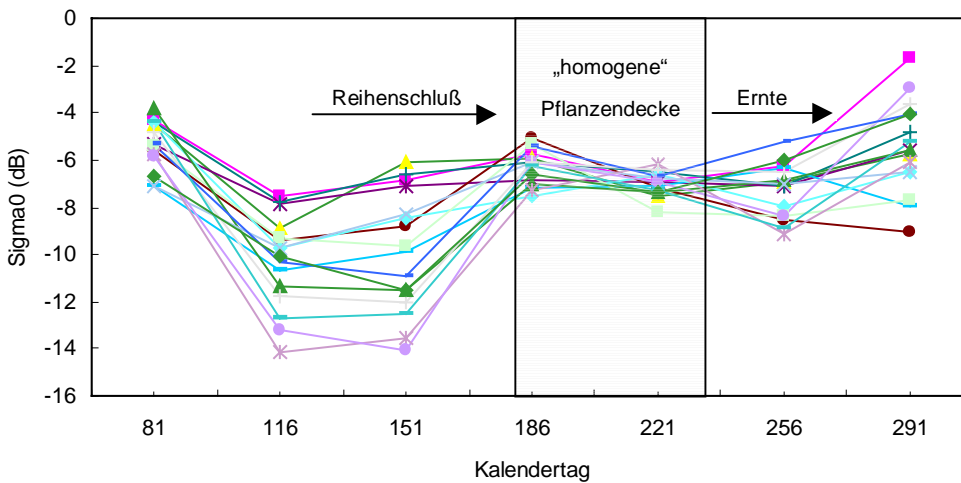


Abb. 9-6: Zeitreihenprofile der Radarrückstreuung von Kartoffelschlägen 1997

In abgeschwächter Weise konnte die Reihenrichtungsabhängigkeit der Rückstreuung auch bei Mais- und Zuckerrübenschlägen festgestellt werden. Sie resultiert bei Mais und Zuckerrübe aus der Periodizität zwischen den Pflanzenreihen und vegetationsfreiem Boden, wohingegen bei Kartoffeln die Orientierung und Geometrie der Dämme ausschlaggebend ist.

Um den Effekt der Reihenrichtung auf die Radarrückstreuung möglichst isoliert von anderen Boden- und Vegetationsparametern betrachten zu können, wurden nur Datensätze eines ERS-Überfluges selektiert, die folgende Kriterien erfüllten:

Tab. 9-2: Datenauswahlkriterien zur Beschreibung des Reihenrichtungseffektes bei Kartoffel und Mais

Auswahlkriterium	Kartoffel	Mais
Bodentyp	Pararendzina, Ackerrendzina	Braunerde
Volumetrische Bodenfeuchte	14-20%	18-25%
Bodenbearbeitungszustand	Kartoffeldämme	Saatbeet
Reihenabstand	75-80 cm	75 cm
Dammhöhe	23-30 cm	-
Pflanzenentwicklungsstadium	vegetationsfrei	EC 31-32
Wuchshöhe	-	78-105 cm
ERS-Aufnahmedatum	26.04.1997	20.06.1998
Anzahl ausgewählter Schläge	22	26

Ein Einfluß des Makroreliefs (Hangneigung, Exposition) kann bei obiger Auswahl ausgeschlossen werden, da es sich ausschließlich um Schläge in der Münchener Schotterebene handelt.

Der Winkel zwischen der Reihenrichtung und der Aufnahme­richtung (= Range-Richtung) wird nachfolgend als β bezeichnet. Ein β von 90° bedeutet demnach, daß die Orientierung der Reihen parallel zur Flugrichtung des ERS und damit ca. 11° gegen geographisch Nord ausgerichtet ist. Die Situation der ausgewählten Schläge und die geometrische Konfiguration ist in Abb. 9-7 exemplarisch dargestellt.

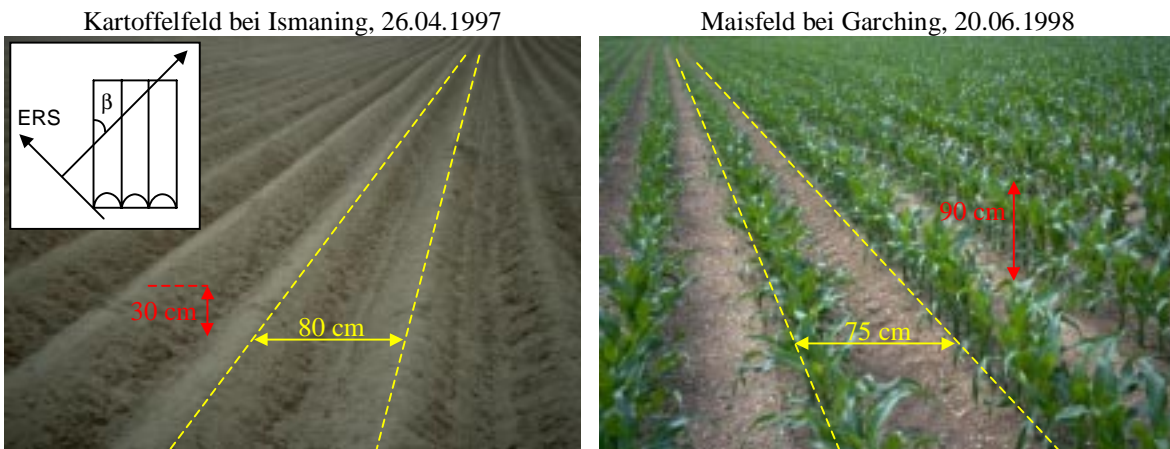


Abb. 9-7: Situation ausgewählter Schläge zur Untersuchung des Reihenrichtungseffektes

Abb. 9-8 verdeutlicht, daß beide Reihenkulturen tendenziell höhere Rückstreukoeffizienten aufweisen, wenn die Reihen senkrecht zur Aufnahme- bzw. parallel zur ERS-Flugrichtung orientiert sind. Für Kartoffel läßt sich der Zusammenhang am besten durch eine polynomiale Ausgleichskurve zweiten Grades beschreiben ($R^2=0,72$), wohingegen der Zusammenhang bei Mais einer linearen Funktion folgt und insgesamt etwas schwächer ausgeprägt ist ($R^2=0,67$).

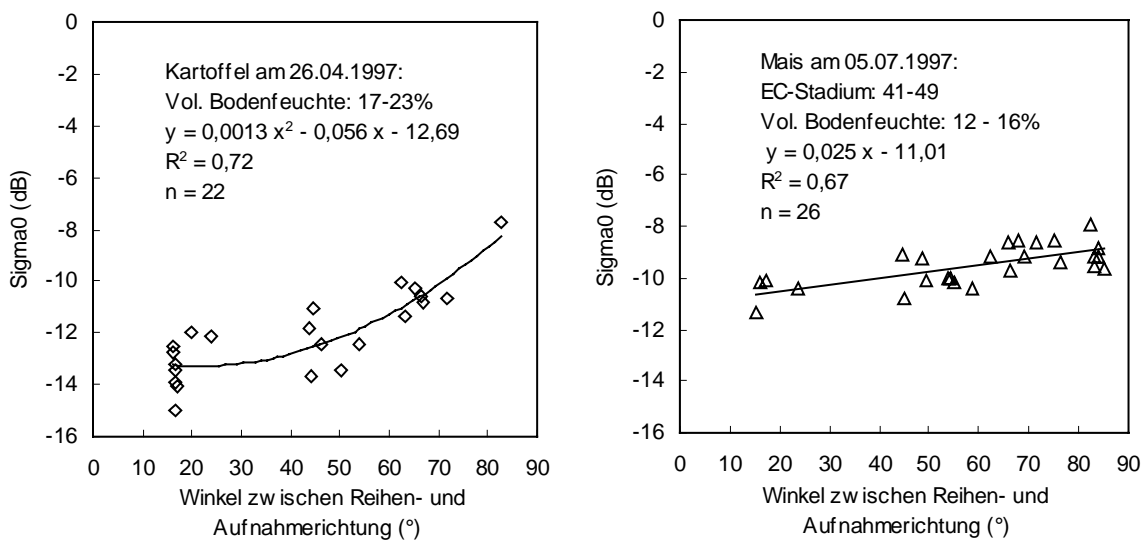


Abb. 9-8: Rückstreukoeffizienten von Mais und Kartoffel in Abhängigkeit der Reihenrichtung

Auffallend ist, daß bei Kartoffel bis zu einem Winkel von $\beta \leq 50^\circ$ der Rückstreukoeffizient nur geringfügig um ca. 1-2 dB zunimmt. Erst wenn der Radarstrahl mehr oder weniger senkrecht auf die Kartoffeldämme auftrifft, erhöht sich die Rückstreuung signifikant. Dieses Ergebnis wird durch DOBSON & ULABY (1986) bestätigt, die einen deutlichen Einfluß der Reihenrichtung auf den Rückstreuquerschnitt nur in einem Winkelbereich von $\pm 15^\circ$ um eine orthogonale Blickrichtung auf die Reihen feststellten. Die nicht erklärte Streuung um die Ausgleichskurve ist vermutlich durch unterschiedliche Höhen der Kartoffel-

feldämme (Variationsbereich = 7 cm) bzw. Furchen zu erklären. Bei $\beta \geq 75^\circ$ ist die Höhe der Dämme der sensitivste Parameter bezüglich der Radarrückstreuung (DOBSON & ULABY 1986).

Grundsätzlich ergaben sich auch für die anderen ERS-Termine vergleichbare Zusammenhänge, solange der Pflanzenbestand nicht geschlossen und ein periodisches Muster durch Bodenbearbeitungsmaßnahmen oder der Vegetation erkennbar war.

Unter Berücksichtigung der Arbeiten von ULABY et al. (1982b), DOBSON & ULABY (1986) sowie BEAUDOIN et al. (1990) kann für den Einfluß periodischer Reihemuster auf die Radarrückstreuung folgendes festgehalten werden:

1. Maximale Reihenrichtungseffekte sind zu beobachten, wenn der Radarstrahl senkrecht bzw. in einem Bereich von $\pm 15^\circ$ um die Orthogonale auf die Reihen auftrifft.
2. Die Radarrückstreuung wird dann zusätzlich erhöht, wenn die Neigung der Flanken der Erddämme dem lokalen Einfallswinkel entspricht (ca. 23° beim ERS). Ein solcher Winkel ist für Kartoffeldämme typisch.
3. Mit zunehmend paralleler Blickrichtung in die Reihen nimmt der Reihenrichtungseinfluß überproportional ab.
4. Der Reihenrichtungseffekt ist besonders stark, wenn die sogenannte *random roughness* gering ist. Bei zunehmend kleinskaliger Bodenrauhigkeit nimmt der Einfluß periodischer Muster auf die Radarrückstreuung ab.

Die Ergebnisse verdeutlichen, daß der Reihenrichtungseffekt eine weitere Störgröße sowohl im Hinblick auf eine Landnutzungsklassifizierung als auch auf die Ableitung der Bodenfeuchte darstellt. Im Rahmen einer multitemporalen ERS SAR-Klassifizierung tragen somit Aufnahmetermine der frühen Vegetationsperiode nicht zu einer erfolgreichen Trennung der Klassen bei, da die bodenbedingte Varianz der Rückstreukoeffizienten innerhalb der Klassen zu groß ist. Ohne umfassende Ground Truth-Informationen über den Reihenabstand, die relativen Höhenunterschiede zwischen Furchen und Dämmen und die Reihenrichtung selbst, wird es allerdings nicht gelingen, diesen Störeffekt zu eliminieren.

9.3.7 Einfluß des lokalen Einfallswinkels

Neben den Einflüssen der kleinskaligen Bodenrauhigkeit und der Reihenrichtung stellt der lokale Einfallswinkel θ einen dritten, skalenmäßig übergeordneten Parameter dar, der die Rückstreueigenschaften einer vegetationsfreien Bodenoberfläche beeinflussen kann. Der lokale Einfallswinkel von Radarwellen wird gegen die Flächennormale gemessen. Bei einem ebenen Gelände entspricht θ somit dem sensorspezifischen Abstrahlwinkel (23° beim ERS) zuzüglich eines kleinen Terms, der aus der Erdkrümmung resultiert. Bezogen auf eine ERS-Vollszene, mit einer *Swath*-Breite von 100 km, variiert θ in Abhängigkeit von der *Range*-Distanz zwischen 19° im *Near Range*- bis 26° im *Far Range*-Bereich.

Eine entscheidende Modifikation erfährt der lokale Einfallswinkel durch das Relief. Zum Sensor geneigte Flächen erscheinen dabei hell, da bei kleinem Einfallswinkel viel Energie

zum Sensor zurückgestreut wird und umgekehrt. Auch im Untersuchungsgebiet ist dieses für Radaraufnahmen typische Phänomen bei einigen tiefer eingeschnittenen Tälern zu beobachten, obwohl das Gelände insgesamt nur schwach reliefiert ist. Da insgesamt keine Hangneigungen größer als 25° auftreten¹ und keines der untersuchten Meß- bzw. Boniturfelder steiler als $9,7^\circ$ geneigt ist, variiert der lokale Einfallswinkel² aller untersuchten Flächen lediglich zwischen $19,2^\circ$ und $32,1^\circ$ (Abb. 9-9). Die dargestellte Häufigkeitsverteilung bezieht sich auf 418 Boniturschläge, die bezüglich ihrer Reliefposition als repräsentativ für das gesamte Untersuchungsgebiet betrachtet werden können. Die positive Schiefe der Verteilung spiegelt die für das Untersuchungsgebiet typische Talasymmetrie wider, die durch relativ große, flachgeneigte und zum Sensor exponierte Südosthänge, sowie einige steilere, dem Sensor abgewandte Nordwesthänge charakterisiert ist.

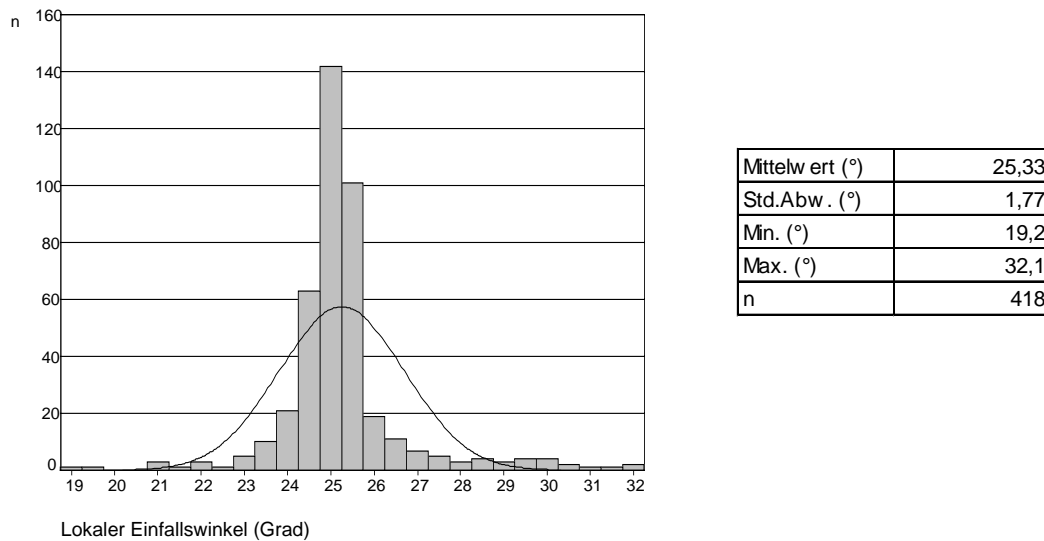


Abb. 9-9: Häufigkeitsverteilung des lokalen Einfallswinkels, basierend auf den Boniturfächen 1998

Der funktionale Zusammenhang zwischen dem Rückstreuquerschnitt und dem lokalen Einfallswinkel ist für verschieden raue Oberflächen in Abb. 9-10 zusammengefaßt.

Demnach reagiert eine glatte Oberfläche (RMS-Rauhigkeit = 1,8), die hauptsächlich gerichtet reflektiert, wesentlich sensibler auf Veränderungen von θ , als eine raue Oberfläche (RMS-Rauhigkeit = 4,1). Bei sehr rauhen Oberflächen (RMS-Rauhigkeit > 4; entspricht

¹ Die Berechnung der Hangneigung basiert auf dem 50 m-aufgelösten DHM des BayLVA und wurde mit Hilfe des TIN-Verfahrens in ArcInfo durchgeführt.

² Der lokale Einfallswinkel bezieht sich auf den Normalenvektor einer Ausgleichsebene, die der mittleren Raumposition eines Polygons bzw. Schläges entspricht und für alle untersuchten Schläge berechnet wurde. Als Datengrundlage diente ebenfalls das 50 m-DHM vom BayLVA (mündl. Mitteil. GÜNZL 1997).

etwa einem frisch gepflügten Acker) wird die Rückstreuung annähernd unabhängig vom Einfallswinkel, da die Strahlung vollständig ungerichtet reflektiert wird¹.

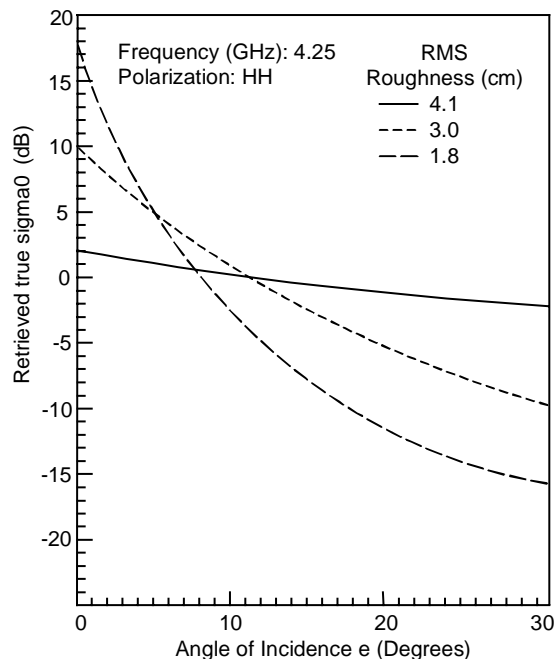


Abb. 9-10: Rückstreuung als Funktion des Einfallswinkels für drei verschieden raue Oberflächen (nach DOBSON & ULABY 1986)

Da 95% der untersuchten Flächen einen lokalen Einfallswinkel zwischen 23,6° und 27,9° aufweisen, kann eine winkelabhängige Modifikation der Rückstreuung bei rauen Oberflächen von maximal 0,5 dB (0,12 dB pro 1° Neigung) bzw. 1,5 dB (0,4 dB pro 1° Neigung) bei glatten Oberflächen erwartet werden. Damit ist der Einfluß des lokalen Einfallswinkels insgesamt zwar gering, sollte aber dennoch nicht vernachlässigt werden.

Ein einfaches Modell zur Korrektur dieses Störeffektes wird von CHAMPION (1996) vorgestellt. Zielvorgabe bleibt die Modellierung der Rückstreuung vegetationsfreier Böden in Abhängigkeit der Bodenfeuchte unter der vereinfachten Annahme einer linearen Beziehung (Gl. 9-1, S. 138). Die Integration der winkelabhängigen Korrektur in Gl. 9-2 erfolgt durch Ersetzen des Terms C durch eine Cosinusfunktion:

$$\sigma^0 (dB) = C_1 + C_2 \cdot \cos(\theta)^{C_3} + D \cdot m_v \quad \text{Gl. 9-2}$$

OH et al. (1992) konnten nachweisen, daß innerhalb des für Ackerflächen typischen Rauigkeitsspektrums die winkelabhängige Abnahme des Rückstreuquerschnitts näherungsweise einer Funktion $\cos(\theta)^n$ folgt, wobei n einen Wert von ca. 3 annimmt. Die Korrektur

¹ Nach OH et al. (1992) und ULABY et al. (1986) bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen HH- und VV-polarisierten Daten bezüglich der Winkelabhängigkeit der Rückstreuung. Damit sind die in Abb. 9-10 dargestellten Zusammenhänge auf die Konfiguration des ERS übertragbar.

bezüglich des lokalen Einfallswinkels hat demzufolge keinen Einfluß auf die Sensitivität des Rückstreuquerschnittes gegenüber der volumetrischen Bodenfeuchte, was von DOBSON & ULABY (1986) bestätigt wurde.

Die Anpassung der Parameter C_1 bis C_3 erfolgt iterativ mit Hilfe einer nichtlinearen Regression durch Minimieren der Summe der quadratischen Residuen.

9.3.8 Ergebnisse der Bodenfeuchtemodellierung

Tab. 9-3 zeigt zunächst die Ergebnisse ohne Korrektur des lokalen Einfallswinkels bezogen auf Gl. 9-1. Die Ergebnisse nach der Korrektur des Einfallswinkels, die sich auf Gl. 9-2 beziehen, sind in Tab. 9-4 zusammengefaßt:

Tab. 9-3: Beziehung zwischen Radarrückstreuquerschnitt und volumetrischer Bodenfeuchte in Abhängigkeit von der Bodenrauhigkeitsklasse (BRK) ohne Korrektur des Einfallswinkels

Szenario	D	C	95%-Konfidenzintervall von D		Fallzahl	R^2	S (dB)
Alle Rauigkeitsklassen	0,21	-12,59	0,174	0,222	178	0,460	1,63
Nur BRK I ($\Delta h < 3$ cm)	0,25	-16,09	0,198	0,309	35	0,723	1,09
Nur BRK II ($\Delta h = 3-5$ cm)	0,26	-14,62	0,217	0,305	77	0,650	1,27
Nur BRK II, ohne Schotterböden	0,30	-15,86	0,251	0,351	63	0,703	1,02
Nur BRK III ($\Delta h = 6-10$ cm)	0,23	-12,99	0,194	0,268	38	0,815	0,85
Nur BRK III, ohne Schotterböden	0,24	-13,20	0,198	0,271	33	0,847	0,51
Nur BRK IV + V ($\Delta h > 10$ cm)	0,23	-11,47	0,186	0,279	27	0,809	0,64

Tab. 9-4: Beziehung zwischen Radarrückstreuquerschnitt und volumetrischer Bodenfeuchte in Abhängigkeit von der Bodenrauhigkeitsklasse (BRK) nach Korrektur des Einfallswinkels

Szenario	D	C_1	C_2	C_3	Fallzahl	R^2	S (dB)
Alle Rauigkeitsklassen	0,20	-6,59	-7,47	2,45	178	0,473	1,58
Nur BRK I ($\Delta h < 3$ cm)	0,22	-10,14	-6,91	3,98	35	0,784	0,97
Nur BRK II ($\Delta h = 3-5$ cm)	0,26	-13,60	-3,47	2,32	77	0,702	1,03
Nur BRK III ($\Delta h = 6-10$ cm)	0,23	-17,08	-5,09	2,13	38	0,818	0,84
Nur BRK IV + V ($\Delta h > 10$ cm)	0,25	-8,58	-4,40	2,01	27	0,826	0,61

Durch die Korrektur des Winkel- bzw. Topographieinflusses werden die Ergebnisse nur minimal verbessert. Erwartungsgemäß ist die Verbesserung bei Böden der Rauigkeitsklasse I und II etwas deutlicher als bei den rauen Bodenoberflächen. Ursache dafür ist der insgesamt sehr enge Variationsbereich des lokalen Einfallswinkels. Beide Modellvarianten führen zu sehr robusten Ergebnissen bezüglich des Gradienten D .

Der Einfluß der volumetrischen Bodenfeuchte auf den Rückstreuquerschnitt ist für alle in Tab. 9-3 und Tab. 9-4 aufgeführten Beziehungen auf einem Signifikanzniveau von mindestens 95% anzunehmen. R^2 gibt das korrigierte Bestimmtheitsmaß an; S ist die Standardabweichung der Residuen in dB (Gl. 9-8, S. 164). Auf eine Differenzierung der Rauigkeitsklasse IV (rauh) und V (sehr rauh) wird aufgrund der geringen Fallzahl verzichtet.

Abb. 9-11 verdeutlicht, daß ohne Differenzierung nach Bodenrauigkeitsklassen nur ein mäßiger Zusammenhang zwischen volumetrischer Bodenfeuchte und Rückstreukoeffizient existiert. Innerhalb einzelner Bodenrauigkeitsklassen sind engere Zusammenhänge feststellbar. Dabei fällt auf, daß mit zunehmender Rauigkeit die Rückstreuung insgesamt höher ist. Die annähernd parallel verlaufenden Ausgleichsgeraden unterstreichen den geringen Einfluß der Bodenrauigkeit auf die Sensitivität von σ^0 gegenüber Veränderungen der Bodenfeuchte. Nur bei sehr rauhen Bodenoberflächen kann eine geringfügige Abschwächung des Gradienten beobachtet werden.

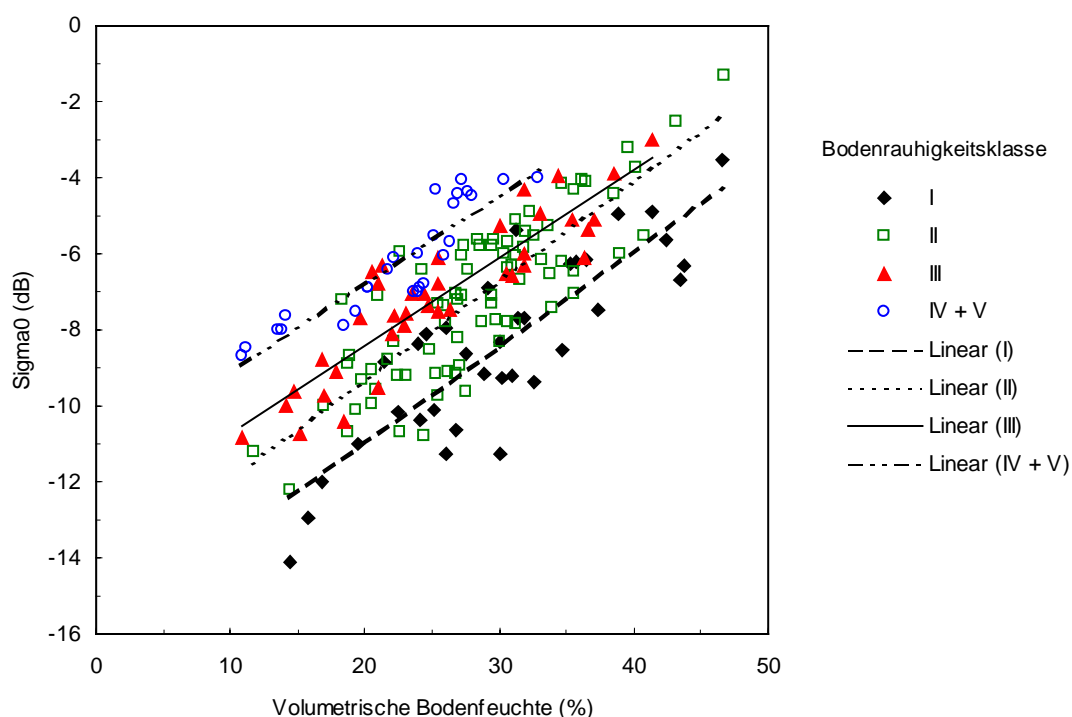


Abb. 9-11: Beziehungen zwischen volumetrischer Bodenfeuchte und Radarrückstreukoeffizient, differenziert nach Bodenrauigkeitsklassen

Der Einfluß der Bodenart erweist sich insgesamt als gering und ist für praktische Anwendungen vernachlässigbar. Betrachtet man die Datenpunkte einzelner Bodenrauigkeitsklassen in Abb. 9-12, ist nur bei relativ glatten Oberflächen ein Einfluß der Bodenart erkennbar. Sande weisen bei gleicher Bodenfeuchte tendenziell höhere Rückstreukoeffizienten auf. Je rauher die Bodenoberfläche ist, desto schwächer wird der Einfluß der Bodenart auf den Rückstreuquerschnitt σ^0 .

Die Ergebnisse zeigen, daß Böden mit hohem Skelettgehalt durch eine geringfügig höhere Rückstreuung charakterisiert sind. Die von DEROIN et al. (1997) festgestellte nichtlineare Zunahme der Rückstreuung mit steigendem Skelettgehalt kann allerdings nicht bestätigt werden. Ein Einfluß von organischem Material im Oberboden auf die Rückstreuung kann ebenfalls nicht nachgewiesen werden.

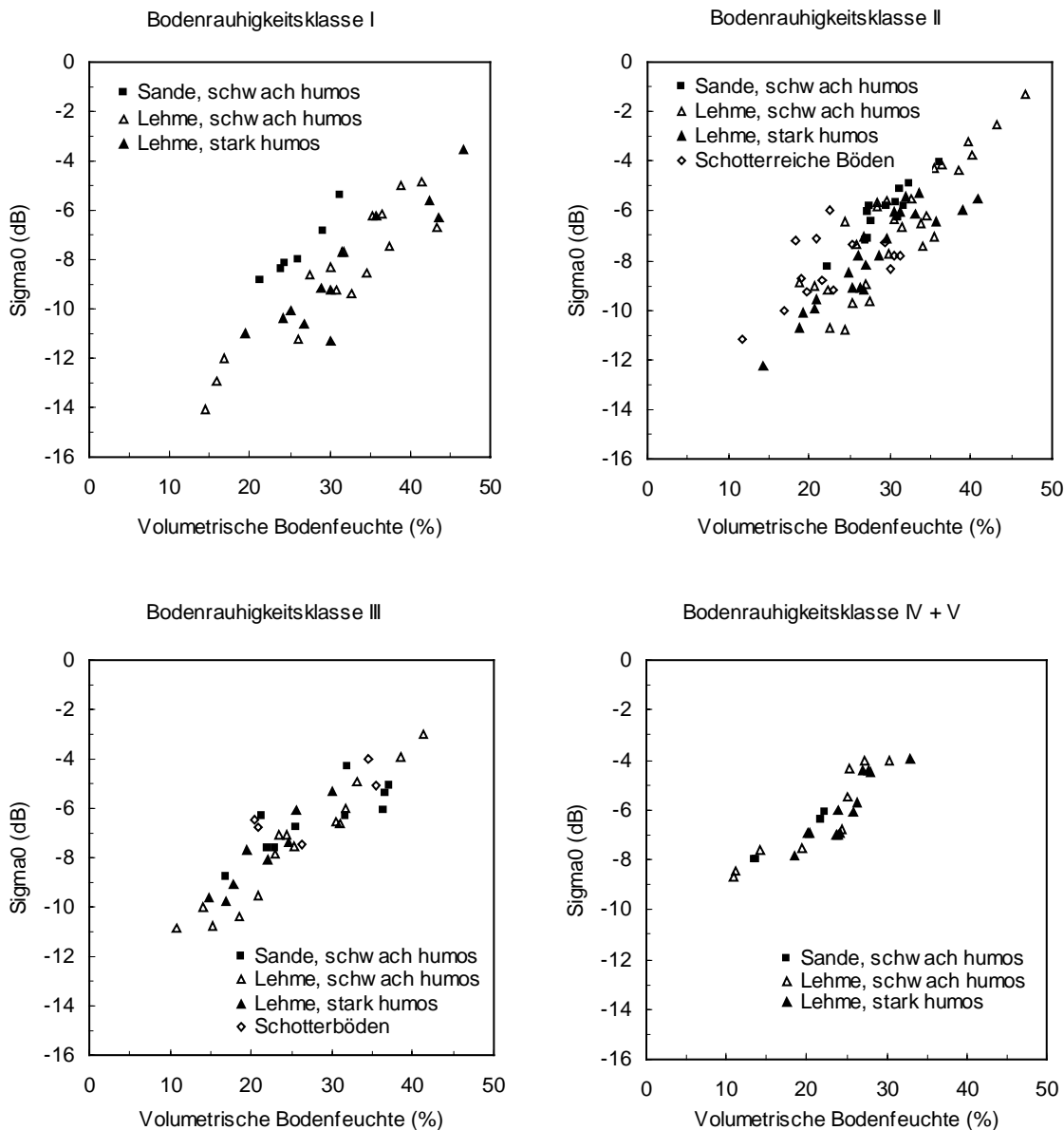


Abb. 9-12: Beziehungen zwischen volumetrischer Bodenfeuchte und Radarrückstreukoeffizient einzelner Bodenrauigkeitsklassen, differenziert nach Bodenarten

Feuchteverteilung des Oberbodens (Bodenfeuchtekarten)

Unter Berücksichtigung der Modellbedingungen ist es durch Invertierung der Regressionsfunktionen gemäß Tab. 9-4 möglich, den mittleren Feuchtezustand des Oberboden vegetationsfreier Schläge abzuleiten.

Abb. 9-13 zeigt am Beispiel des Teilgebietes Garching die schlagbezogene räumliche Verteilung der oberflächennahen Bodenfeuchte im Maßstab 1 : 50 000, abgeleitet aus den mittleren Rückstreukoeffizienten des ERS-2 Überfluges vom 07.03.1998. Grundsätzlich ist die Erstellung von Bodenfeuchtekarten nur dann sinnvoll, wenn möglichst viele Schläge

die Modellbedingungen erfüllen, d.h. vegetationsfrei sind oder eine nur spärliche Vegetationsbedeckung aufweisen.

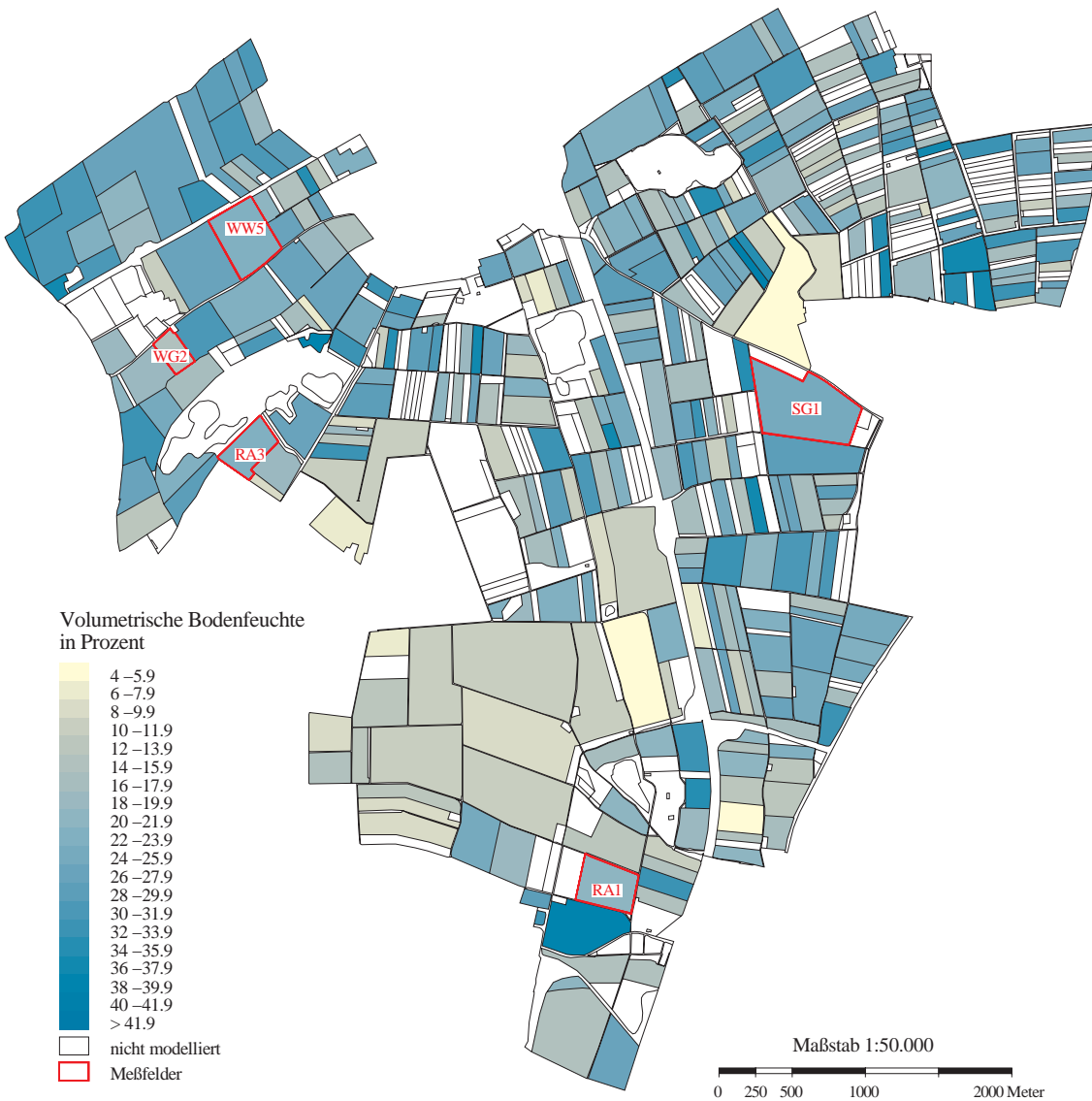


Abb. 9-13: Mittlere Bodenfeuchte vegetationsfreier Schläge des Teilgebietes Garching, abgeleitet aus ERS-2 SAR-Daten vom 07.03.1998

Zum Zeitpunkt des ERS-Überfluges am 07.03.1998 um 10:04 UTC war es niederschlagsfrei. Die mittleren kumulativen Niederschlagssummen betragen: 2-3 mm (07.03.), 4-6 mm (07.03. + 1 Vortag), 10-17 mm (07.03. + 4 Vortage) und 20-28 mm (07.03. + 9 Vortage).

Nicht modellierte Flächen resultieren überwiegend aus zu kleinen Schlaggrößen, von denen kein mittlerer Rückstreukoeffizient berechnet werden konnte.

Da außerhalb der Meß- und Boniturschläge keine Informationen zur Bodenrauigkeit verfügbar waren, konnte die volumetrische Bodenfeuchte nur ohne Berücksichtigung der Bodenrauigkeitsklassen geschätzt werden. Der daraus resultierende Standardfehler nach Gl. 9-8 beträgt 5,5 Vol.-% Bodenfeuchte. Damit ist die Genauigkeitsanforderung für die mei-

sten in der Zielsetzung erwähnten Anwendungsgebiete nicht erfüllt. Wären zusätzliche Informationen zur Bodenrauigkeit verfügbar, könnte der Standardfehler auf < 4 Vol.-% reduziert werden.

Vergleicht man die aus den SAR-Daten abgeleiteten Bodenfeuchten mit unabhängigen Meßwerten, die in den Schlägen WW5, WG2, SG1, RA1 und RA3 am 03.07.1998 erhoben wurden (rot umrandete Polygone in Abb. 9-13), so ergeben sich für das zu diesem Zeitpunkt noch völlig vegetationsfreie Sommergerstefeld SG1 und das spärlich bedeckte Winterweizenfeld WW5 sehr gute Übereinstimmungen (Abweichung < 2 Vol.-%). Auf den bereits stärker mit Vegetation überdeckten Winterrapsfeldern RA1 und RA3, sowie dem Wintergerstefeld WG2 wird die gemessene Bodenfeuchte hingegen um 8-9 Vol.-% unterschätzt. Die Wuchshöhe des Winterraps betrug zu diesem Zeitpunkt 9-10 cm, bei einer Frischmasse von 5-7 t/ha. Die Wintergerste war im Durchschnitt 6-7 cm hoch und hatte eine Frischmasse von weniger als 3 t/ha. Daraus kann gefolgert werden, daß die Modellbedingungen bezüglich der Definition vegetationsfreier bzw. vegetationsarmer Flächen weiter eingengt werden müssen, da das vorhandene Vegetationsvolumen bereits zu einer Dämpfung der Rückstreuung führt.

Trotz des hohen absoluten Standardfehlers ist eine räumliche Korrelation zwischen der schlagbezogenen Bodenfeuchte und dem Substrat der Oberböden bzw. ihrer bodenphysikalischen Kennwerte erkennbar. So werden relative Feuchteunterschiede, die auf kürzester Distanz bis zu 20 Vol.-% betragen können, sehr gut abgebildet und zeichnen das Verteilungsmuster der Böden und ihrer hydrologischen Eigenschaften nach. Ein Beispiel hierfür sind die relativ trockenen Standorte der Garchinger und Echinger Heide (große Flächen im zentralen südlichen Bereich des Kartenausschnittes), die sich in Abb. 9-13 durch die geringsten Bodenfeuchten auszeichnen. Diese spärlich bewachsenen Heideflächen befinden sich ausschließlich auf einer flachgründigen, kiesreichen Rendzina mit hoher Durchlässigkeit, die auch nach Starkregen und Dauerniederschlägen schnell abtrocknet. Die dort gemessenen volumetrischen Bodenfeuchten betragen meistens weniger als 10 Vol.-%, was durch die niedrigen Rückstreuoeffizienten bestätigt wird. Im Nordwesten des Beispielgebietes ist hingegen eine humusreiche Pararendzina und ein kalkhaltiger Anmoorgley anzutreffen. Beide Böden sind bezüglich ihrer ökologischen Feuchtestufe als frisch (V) bis sehr frisch (Vf) zu bezeichnen. Die dort gemessenen Bodenfeuchten betragen in der Regel über 30 Vol.-%, was allgemein zu einer hohen Radarrückstreuung führte und durch die Bodenfeuchtemodellierung gut erfaßt wurde.

9.3.9 Bodenfeuchtemonitoring mit Hilfe von SAR-Zeitreihen

Die bisherigen Ausführungen verdeutlichten, daß es ohne exakte Kenntnis der Bodenrauigkeit nicht möglich ist, die oberflächennahe Feuchte vegetationsfreier bzw. vegetationsarmer Böden aus ERS SAR-Daten abzuleiten. Weitere Störgrößen, die eine hinreichend genaue Bodenfeuchteableitung erschweren, waren die Bodenart, der lokale Einfallswinkel und Reihenrichtungsstrukturen.

Eine hilfreiche Vereinfachung der Problematik würde darin bestehen, mit Hilfe von SAR-Zeitreihen nur noch relative Veränderungen der Bodenfeuchte als Funktion der Zeit zu erfassen. Damit könnten alle oben genannten Störgrößen, einschließlich der Bodenrauigkeit, als konstant betrachtet werden. Differenzen der Rückstreukoeffizienten einer Fläche zwischen zwei ERS-Aufnahmetermenen würden somit ausschließlich aus einer veränderten Bodenfeuchtesituation resultieren. Die Annahme konstanter Bodenrauigkeit wäre lediglich dann nicht erfüllt, wenn zwischen den Aufnahmetermenen eine Bodenbearbeitung stattfinden würde. Solche Maßnahmen wären durch extreme Rückstreudifferenzen charakterisiert und könnten als solche identifiziert und ausgeschlossen werden.

Die Gültigkeit der vereinfachten Modellannahme (konstante Bodenrauigkeit) ist vom Zeitintervall zwischen den SAR-Aufnahmen abhängig. Die regelmäßigen Schlagbonituren der drei Untersuchungsjahre haben gezeigt, daß die 35-tägige Wiederholungsrate des ERS für diese Annahme zu groß ist. Besonders im Frühjahr unterliegen die noch vegetationsfreien Ackerflächen häufig Bodenbearbeitungsmaßnahmen im Rahmen der Saatbeetvorbereitung. Würden die Zeitintervalle nur 2 bis ca. 3 Tage betragen, wäre ein kontinuierliches Bodenfeuchtemonitoring vegetationsfreier Flächen grundsätzlich möglich.

Eine weitere Voraussetzung für die Erfassung zeitlicher Bodenfeuchteänderungen wäre die Vergleichbarkeit der abgeleiteten mittleren Rückstreukoeffizienten. In diesem Zusammenhang sei auf die bereits erläuterten orbitalen Störeinflüsse verwiesen sowie auf mögliche Fehlerquellen bezüglich der Ableitung kalibrierter Rückstreuwerte aus SAR-Daten.

Beide Bedingungen waren während der ERS-Missions-Phasen B (12/91 bis 04/92) und D (12/93 bis 04/94) erfüllt, als die Wiederholungsrate des ERS nur drei Tage betrug. Auf Grundlage dieser interferometrischen Daten konnte WEGMÜLLER (1997) mit Hilfe linearer Regressionsmodelle geringfügige Feuchtedifferenzen bis zu 2 Vol.-% detektieren. Limitierender Faktor war hierbei die Kalibriergenauigkeit der σ^0 -Werte, die mit 0,5 dB angenommen wurde.

Daß die Differenzen der σ^0 -Werte einer betrachteten vegetationsfreien Fläche im Rahmen einer Zeitreihenuntersuchung mit kurzen Zeitintervallen unmittelbar mit Änderungen der Bodenfeuchte in Zusammenhang gebracht werden können, kann auch durch die vorliegenden Daten der interferometrischen Tandempaare untermauert werden: Am Beispiel des Bildpaares vom 01.03./02.03.1996 wurden die mittleren Rückstreukoeffizienten von 10 vegetationsfreien Meßschlägen gegenübergestellt. Innerhalb von 24 Stunden zwischen beiden Aufnahmen nahmen die σ^0 -Werte im Mittel um 3,6 dB ab. Zieht man die Niederschlagsdaten der nahegelegenen DWD-Station Oberschleißheim heran, betrug die Tagesniederschläge am 01. März 7,4 mm und 0,1 mm am 02. März. Die deutlich höheren Rückstreuwerte vom 01. März können mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die feuchteren Bodenverhältnisse aufgrund der ergiebigen Niederschläge zurückgeführt werden. Legt man einen mittleren Gradienten von 0,27 dB/Vol.-% zugrunde, wäre die Abnahme der Rückstreuung einem Rückgang der Bodenfeuchte von ca. 13 Vol.-% gleichzusetzen. Da für diese Arbeit insgesamt nur vier ERS-Tandem-Bildpaare verfügbar waren und das Zeitintervall zwi-

schen den Bildpaaren nach wie vor 35 Tage betrug, konnte eine zeitliche Modellierung der relativen Bodenfeuchteänderungen nicht durchgeführt werden.

9.3.10 Zusammenfassung zur σ^0 -Bodenfeuchte-Beziehung vegetationsfreier Böden

Auf einer breiten Datengrundlage von 178 Datenpaaren bzw. Schlägen konnte ein signifikant positiver, linearer Zusammenhang zwischen gemessener volumetrischer Bodenfeuchte und dem Radarrückstreuoeffizienten σ^0 des ERS-2 festgestellt werden. Voraussetzung dafür war allerdings die Kenntnis der Bodenrauhigkeit, die eine Stratifizierung des Datensatzes in vier verschiedene Bodenrauhigkeitsklassen ermöglichte. Die Zuordnung der Rauigkeitsklasse erfolgte durch eine visuelle Schlagbonitur der Referenzschläge. Die Beziehungen zwischen der Bodenfeuchte und der Radarrückstreuung ergaben, daß σ^0 pro Prozentpunkt volumetrischer Feuchte um 0,23 bis 0,30 dB zunimmt. Die Sensitivität von σ^0 gegenüber Feuchteänderungen war dabei unabhängig von der Bodenrauhigkeit, d.h. alle Regressionsgeraden hatten annähernd eine gleiche Steigung. Nur für sehr raue Bodenoberflächen war eine geringfügige Abnahme der Sensitivität von σ^0 gegenüber der Bodenfeuchte festzustellen, da die Strahlung größtenteils ungerichtet reflektiert wurde und der Rauigkeitseinfluß den Feuchteeinfluß überprägte. Die Y-Achsenabschnitte, die die Rückstreuung eines völlig trockenen Bodens repräsentieren, variierten zwischen -11,5 dB und -16,1 dB und nahmen mit zunehmender Bodenrauhigkeit zu. Differenziert nach Bodenrauhigkeitsklassen kann die Güte der Anpassung des linearen Modells als gut bezeichnet werden. 65 bis 85% der Gesamtstreuung von σ^0 konnte durch Veränderungen der Bodenfeuchte des Oberbodens erklärt werden. Die Linearität der Regressionsmodelle war für den gemessenen Wertebereich von 10% und 45% volumetrischer Feuchte gegeben. Ein Sättigungseffekt von σ^0 bei $m_v > 30\%$, wie er von CHAMPION (1996) beobachtet wurde, konnte nicht bestätigt werden.

Der dominante Einfluß der Bodenrauhigkeit auf die Radarrückstreuung wurde dadurch deutlich, daß ohne Differenzierung der Regressionsmodelle anhand der Bodenrauhigkeit der Zusammenhang zwischen σ^0 und Bodenfeuchte nur noch schwach ausgeprägt war ($R^2 = 0,46$). Erwartungsgemäß nahm die Rückstreuung mit zunehmender Bodenrauhigkeit zu.

Der Einfluß des lokalen Einfallswinkels konnte durch eine Erweiterung des empirischen Regressionsmodells in Form einer Cosinusfunktion berücksichtigt werden. Bezogen auf das relativ schwach reliefierte Untersuchungsgebiet war der Winkeleinfluß allerdings vernachlässigbar gering.

Der Einfluß der Bodenart erwies sich ebenso als vernachlässigbar gering. Auf eine Korrektur, die durch Umrechnung der Feuchte- in ϵ' -Werte in Abhängigkeit des Sand- und Tongehaltes, basierend auf den Ausführungen von HALLIKAINEN et al. (1985), möglich gewesen wäre, konnte daher verzichtet werden.

Sonderfälle stellten Flächen mit stark strukturierten Ausprägungen des Oberbodens dar. Am Beispiel von Kartoffeldämmen konnte gezeigt werden, daß besonders in einem Winkelbereich von $\pm 15^\circ$ zur senkrechten Blickrichtung die Rückstreuung zunahm. Ohne Zu-

satzinformationen über die Lokation solcher Schläge, den Reihenabstand und die Dammhöhe stellt die Reihenrichtungsabhängigkeit einen nicht modellierbaren Störeffekt dar.

Die positive, lineare Beziehung zwischen σ^0 und der volumetrischen Bodenfeuchte wird auch von zahlreichen anderen Autoren bestätigt, die gleichermaßen ein lineares Regressionsmodell zugrundelegten (Tab. 9-5). Bemerkenswert erscheint dabei, daß sich trotz der unterschiedlichen Radarsysteme und Verschiedenheit der Untersuchungsgebiete relativ große Übereinstimmungen bezüglich des empirisch ermittelten Y-Achsenabschnittes ergaben, wohingegen der Gradient etwas unterschiedlicher eingeschätzt wird.

Tab. 9-5: Volumetrische Bodenfeuchte und Radarrückstreubeziehungen für C-Band Konfiguration (nach SHOSHANY et al. 2000)

Autor	Aufnahmeplattform	Polarisation	Einfallswinkel	Meßtiefe (cm)	Y-Achsenabschnitt	Gradient	R ²
MO et al. (1984)	Flugzeug	HH	20°	0-2,5	-14,60	0,24	
BRUCKLER et al. (1989)	Feldmessung	HH	15°	0-5	-12,96	0,34	0,92
PREVOT et al. (1993)	Flugzeug	HH	20°	0-5	-13,40	0,30	0,82
WOODING et al. (1992)	Satellit (ERS)	VV	23°	0-5	-14,53	0,26	
SHOSHANY et al. (1998)	Satellit (ERS)	VV	23°	0-5	-14,33	0,34	0,92

Obwohl die gefundenen Zusammenhänge aufgrund einer breiten Datenbasis statistisch gut abgesichert sind und darüber hinaus mit den Ergebnissen zahlreicher anderer Untersuchungen korrespondieren, sollten die Ergebnisse empirischer Modelle stets kritisch beurteilt und ihre räumliche Übertragbarkeit grundsätzlich in Frage gestellt werden.

9.4 Pflanzenparameter

9.4.1 Einflußfaktoren

Durch eine Vegetationsüberdeckung wird die Komplexität der Rückstreu- und Emissionsprozesse erhöht. Die Gesamtrückstreuung setzt sich dabei aus vier Rückstreuanteilen zusammen (Abb. 9-14).

Der Reflexionsterm (Abb. 9-14c) kann für einen entwickelten Bestand vernachlässigt werden (CHAUHAN 1995). Die vereinfachte Gleichung kann dann wie folgt formuliert werden (ULABY et al. 1996):

$$\sigma^0 = \tau^2 \cdot \sigma_s^0 + \sigma_{dv}^0 + \sigma_{int}^0, \quad \text{Gl. 9-3}$$

wobei σ_s^0 den Bodenterm darstellt, der durch den Dämpfungsfaktor τ^2 abgeschwächt wird. σ_{dv}^0 bezeichnet den Vegetationsterm bzw. den Volumenstreuungseffekt und σ_{int}^0 faßt die Interaktionen zwischen Pflanze und Boden bzw. umgekehrt zusammen. Damit wird deutlich, daß die Vegetation sowohl eine abschwächende als auch verstärkende Wirkung auf die Gesamtrückstreuung ausüben kann (ULABY & WILSON 1985).

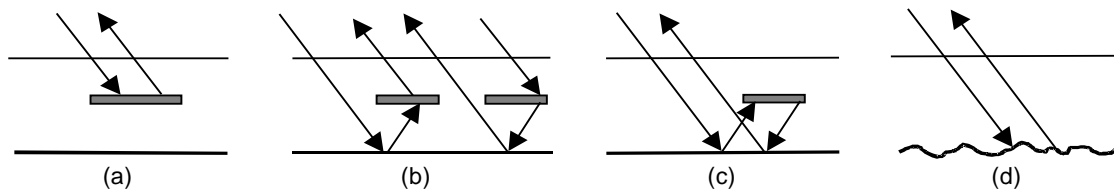


Abb. 9-14: Rückstreumechanismen einer vegetationsbedeckten, rauhen Bodenoberfläche (nach SCHOUPS et al. 1998)

Sowohl der Dämpfungsfaktor τ^2 als auch der Vegetationsterm σ_{dv}^0 werden von den biophysikalischen Eigenschaften des Pflanzenbestandes bestimmt. Dominante Effekte sind der Wassergehalt der Pflanzen und ihre Morphologie. Bezüglich des Wassergehaltes gelten die gleichen physikalischen Zusammenhänge mit der Dielektrizitätskonstante wie beim Boden. Die Morphologie eines Bestandes kann durch die Parameter Wuchshöhe, Pflanzendichte, Blattform, Blatorientierung, Ährenlänge oder Ährenneigung beschrieben werden. Der Einfluß der Morphologieparameter wird stark von der Frequenz, dem Einfallswinkel und besonders der Polarisierung modifiziert (DOBSON & ULABY 1986).

Um die vorherrschenden Streumechanismen bestimmen zu können, wurden im Rahmen von EMAP Mikrowellenabsorptionsmessungen am Beispiel von Winterweizen durchgeführt (KÜHBAUCH et al. 1998). Dazu wurde der Bestand zum Zeitpunkt des Ährenschiebens (27.05.1998) aus ca. 3 m Höhe mit einem Mikrowellenhorn im C_{vv} -Band unter einem Einfallswinkel von 23° bestrahlt und mit einer Empfangsantenne die in verschiedenen Höhen im Bestand ankommende Intensität gemessen. Aus dem Vergleich mit Referenzmessungen über dem Bestand, Messungen über Mikrowellenabsorbern ohne Bestand, sowie über vegetationsfreiem Boden konnte die Dämpfung durch die Vegetation errechnet werden. Dabei zeigte sich, daß die Intensität des empfangenen Signals in dB relativ linear mit der Eindringtiefe in den Bestand abnimmt. Daraus konnte gefolgert werden, daß es zu diesem Zeitpunkt keine einzelne, das Rückstreuverhalten dominierende Komponente gab, sondern daß es sich um einen homogenen Volumenstreuer handelte. Die Dämpfung des Signals betrug bei einer Pflanzenhöhe von 69 cm 9 dB. Da ein vom ERS empfangenes Signal den Bestand zweimal durchdringt, beträgt die Dämpfung 18 dB, was etwa einem Hundertstel des Bodensignals entspricht. Ein nennenswerter Einfluß des Bodens kann zu diesem Entwicklungsstadium somit ausgeschlossen werden. Bezieht man die Dämpfung auf die gemessene Biomasse, so ergab sich eine Schwächung des Signals von 3 dB pro 1 kg/m^2 Biomasse.

9.4.2 Zeitliche Entwicklung wichtiger Pflanzenparameter

Die Meßverfahren zur Ermittlung der Pflanzenparameter sind in Kap. 6.1.2 erläutert. Der mittlere zeitliche Verlauf ausgewählter Pflanzenparameter ist am Beispiel von Winterweizen für die Jahre 1997 ($n = 5$) und 1998 ($n = 8$) dargestellt (Abb. 9-15 und Abb. 9-16).

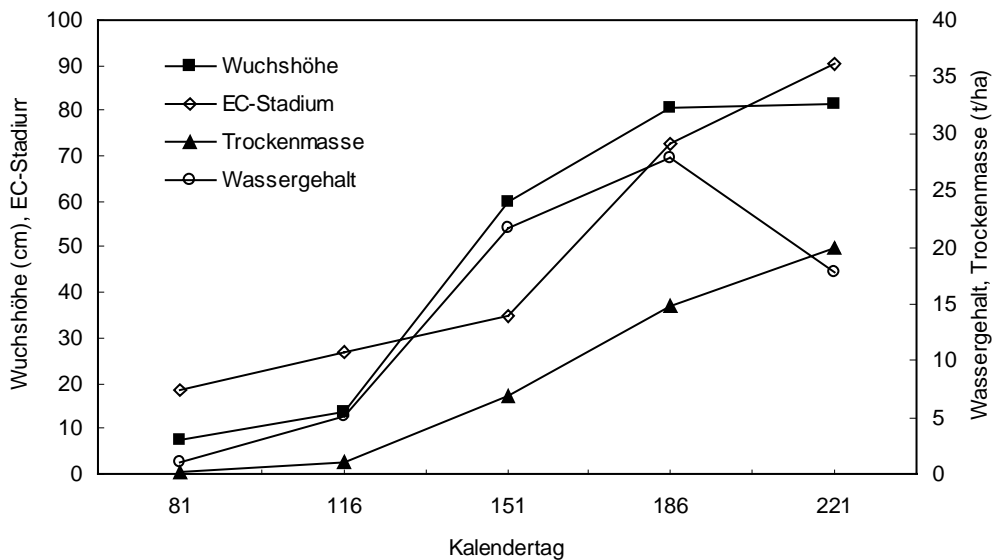


Abb. 9-15: Zeitliche Entwicklung wichtiger Pflanzenparameter 1997 für Winterweizen

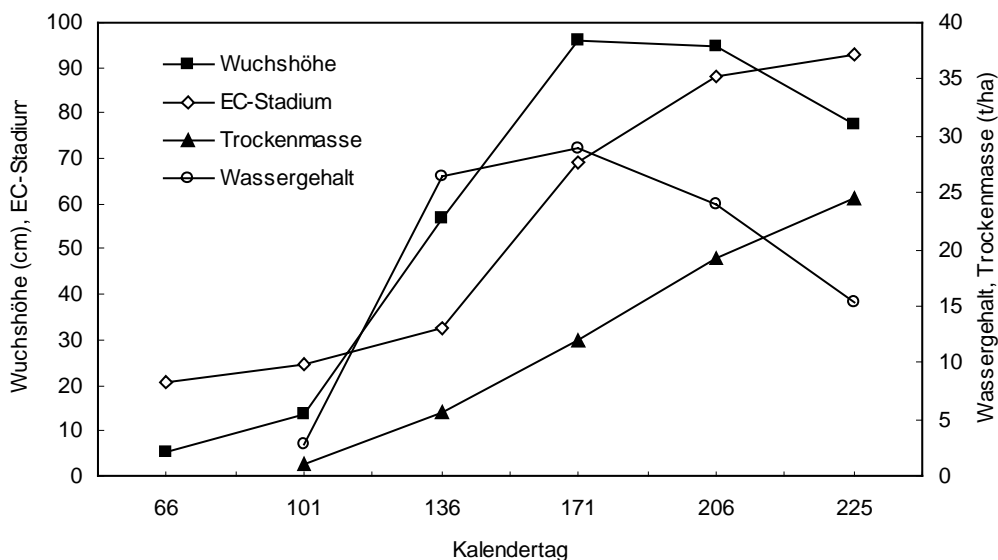


Abb. 9-16: Zeitliche Entwicklung wichtiger Pflanzenparameter 1998 für Winterweizen

Im Gegensatz zur Bodenfeuchte ist die Streuung der Pflanzenparameter innerhalb der Schläge vernachlässigbar gering und deutlich niedriger als zwischen den Schlägen. Lediglich bei der Wuchshöhe konnten vereinzelt größere schlaginterne Inhomogenitäten festgestellt werden.

9.4.3 Angewandte Modelle

Grundlage zur Untersuchung möglicher Beziehungen zwischen der Radarrückstreuung und ausgewählten Pflanzenparametern sind einfache Regressionsmodelle. Da für verschiedene Vegetationsarten und -zustände von unterschiedlichen Zusammenhängen auszugehen ist (ULABY et al. 1996), werden die Untersuchungen in Abhängigkeit der Kulturart und für

verschiedene Zeitintervalle (Zeitfenster) durchgeführt. Ziel ist dabei, die Radarrückstreuung möglichst mit *einem* repräsentativen Pflanzenparameter zu erklären. Da die Reproduzierbarkeit und Robustheit multipler Regressionsmodelle mit zunehmender Parameterzahl abnimmt, werden multiple Regressionsanalysen erst nachgeordnet angewandt.

In einem zweiten Ansatz, auf den hier zuerst eingegangen werden soll, wird eine Modellierung der Rückstreuung mit Hilfe des *Water-Cloud* Modells (ATTEMA & ULABY 1978; PREVOT et al. 1993) vorgenommen. Durch die Aufteilung der Gesamtrückstreuung in eine Vegetations- und Bodenkomponente, sowie die Behandlung der Vegetation als Volumestreuer weist dieses Modell Ähnlichkeit mit dem *Radiative Transfer* Modell erster Ordnung auf. Die wichtigsten Modellannahmen können wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Die Vegetation wird als homogene *Wolke* von räumlich gleichverteilten, identischen, sphärischen Wassertropfen betrachtet (Annahme einer Poisson-Verteilung).
2. Nur Einfachstreuung wird berücksichtigt.
3. Signifikante Variablen sind die Wuchshöhe und der absolute Wassergehalt der Pflanzen, aus denen sich eine sogenannte Wolkendichte ergibt.

Unter Berücksichtigung dieser Annahmen kann die Gesamtrückstreuung σ^0 (in dB) als inkohärente Summe einer Vegetationskomponente σ_{veg}^0 und einer Bodenkomponente σ_{bod}^0 ausgedrückt werden, wobei letztere durch die Vegetationsschicht gedämpft wird. Für einen gegebenen Einfallswinkel θ ergibt sich:

$$\text{gesamter Bestand:} \quad \sigma^0 = \sigma_{veg}^0 + \tau^2 \sigma_{bod}^0 \quad \text{Gl. 9-4}$$

$$\text{Vegetation:} \quad \sigma_{veg}^0 = A \cos \theta (1 - \tau^2) \quad \text{Gl. 9-5}$$

$$\tau^2 = \exp(-2 B m_p / \cos \theta), \quad \text{Gl. 9-6}$$

wobei τ^2 die Dämpfung der Strahlung beim Durchdringen der Vegetation auf dem Hin- und Rückweg darstellt. Der Wassergehalt der Pflanzen in kg/m^2 (entspricht dem volumetrischen Wassergehalt dividiert durch die Wuchshöhe) wird als m_p bezeichnet.

Die Bodenkomponente kann in Abhängigkeit der Radarkonfiguration üblicherweise als lineare Funktion der volumetrischen Bodenfeuchte des Oberbodens m_v (cm^3/cm^3) betrachtet werden (ULABY et al. 1978; BRUCKLER et al. 1988):

$$\sigma_{bod}^0 = C + D m_v \quad \text{Gl. 9-7}$$

Die Anpassung des Modells für einzelne Szenarien (Fruchtarten, Zeitfenster, Zustandsklassen, Bildkonfigurationen, etc.) erfolgt anhand der vier Parameter A , B , C und D . A entspricht der Albedo der Vegetation (Verstärkung des Signals durch Emission), B dem Extinktions- bzw. Dämpfungsfaktor. Die Bodenparameter C und D entsprechen in ihrer Bedeutung der Modellierung für vegetationsfreie Böden (s. Kap. 9.2.2, Gl. 9-1).

9.4.4 Ergebnisse des *Water-Cloud* Modells

Die Anpassung der Parameter *A* bis *D* erfolgte iterativ mit Hilfe einer nichtlinearen Regression durch Minimieren der Summe der quadratischen Residuen. Als erste Approximation der Bodenparameter *C* und *D* wurden die Werte aus Tab. 9-3 übernommen. Die Modellanpassung erfolgte für fünf Hauptkulturarten (Tab. 9-6). Um den potentiellen Einfluß der Bodenrauhigkeit zu minimieren, wurden nur Schläge der Rauigkeitsstufe II und III berücksichtigt. Als Datengrundlage dienten die aus den ERS-2 Szenen ermittelten schlagbezogenen Rückstreuquerschnitte und die simultan dazu erhobenen Ground Truth-Daten der Meßkampagne 1997 und 1998.

Tab. 9-6: Angepaßte Parameter für das *Water-Cloud* Modell in Abhängigkeit der Hauptkulturarten

Kultur	Zeitspanne	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>S</i> (dB)	Iterat.	<i>n</i>	<i>r</i>
WW	11.04.-09.08.	-0,11	0,68	-13,53	0,27	0,71	33	53	0,92
WG	22.03.-05.07.	-0,13	0,71	-18,38	0,31	0,78	44	34	0,93
SG	16.05.-25.07.	-0,09	0,64	-16,46	0,19	1,18	19	24	0,72
MA	31.05.-18.10.	-0,26	0,79	-14,37	0,17	1,35	28	54	0,34
RA	22.03.-05.07.	-0,19	0,89	-12,05	0,18	1,22	18	28	0,75

In Tab. 9-6 bezeichnet *r* den linearen Korrelationskoeffizienten zwischen den Rückstreuquerschnitten, die vom ERS gemessen (σ_{beob}^0) und vom Modell vorhergesagt (σ_{mod}^0) wurden. Die Fallzahl *n* resultiert aus der Anzahl der Schläge und der jeweiligen Termine. Der Standardfehler *S* (in dB) ergibt sich aus:

$$S (dB) = \left(\frac{\sum [\sigma_{beob}^0 - \sigma_{mod}^0]^2}{n - 1} \right)^{1/2} \quad \text{Gl. 9-8}$$

Mit Ausnahme von Mais können durch Anpassung der Modellparameter *A* bis *D* die beobachteten Rückstreuoeffizienten mit Standardfehlern zwischen 0,71 und 1,22 dB geschätzt werden. Konvergenz stellte sich nach 18 bis 44 Iterationen ein. Aus Tab. 9-6 geht ferner hervor, daß dem Dämpfungseffekt durch die Vegetation (Parameter *B*) eine weitaus größere Bedeutung beigemessen werden muß als dem Albedo-Effekt, der durch den Parameter *A* repräsentiert wird. Das negative Vorzeichen des Parameters *A* bewirkt eine Zunahme der Gesamtrückstreuung durch die Pflanzen. Die Sensitivität gegenüber der Bodenfeuchte (*D*) nimmt unter Pflanzenbewuchs nicht so stark ab, wie zunächst vermutet werden könnte. Das kann dadurch begründet werden, daß in den betrachteten Zeitspannen auch die frühen Entwicklungsstadien mit einbezogen wurden, bei denen das Bodensignal kaum von der Vegetation beeinflusst wird. Ferner kann mit zunehmender Abreife und Austrocknung der Biomasse von einem Wiederanstieg des Bodenanteils an der Gesamtrückstreuung ausgegangen werden.

Die Zusammenhänge zwischen beobachteter und modellierter Rückstreuung der fünf Kulturarten sind in Abb. 9-17 zusammengefaßt:

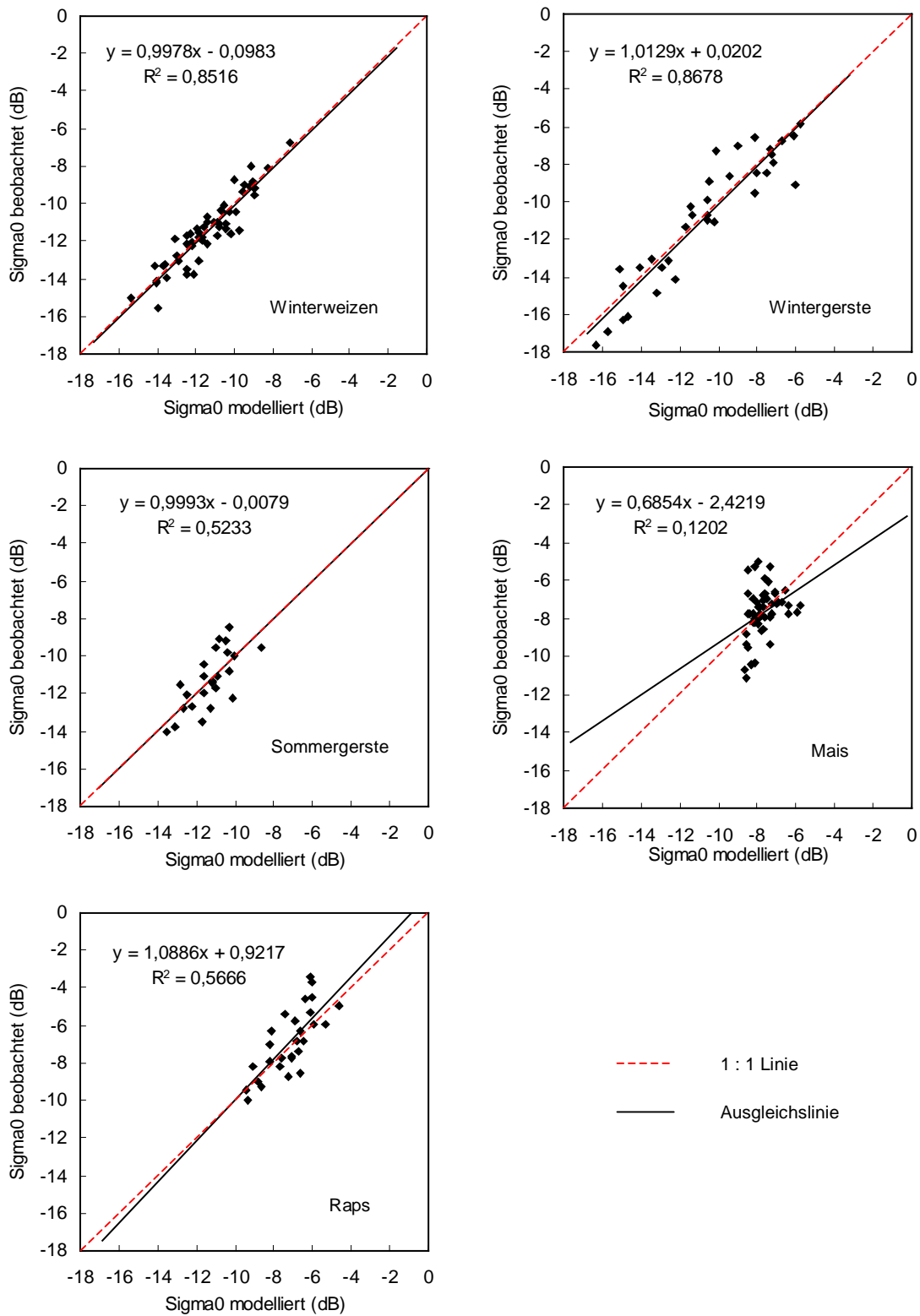


Abb. 9-17: Radarrückstreuung gegenüber modellierter Rückstreuung für WW, WG, SG, MA und RA

Für alle betrachteten Getreidearten und Raps kann mit Hilfe des *Water-Cloud* Modells die Radarrückstreuung innerhalb ihres gesamten Dynamikbereiches in guter bis befriedigender Weise vorhergesagt werden. Die Ausgleichsgeraden dieser Kulturarten zeigen kaum Abweichungen von der 1 : 1 Linie. Die Streuungen um die Ausgleichsgeraden können als relativ gering bezeichnet werden, insbesondere unter Berücksichtigung der Tatsache, daß sich der Datensatz aus verschiedenen Feldern und ERS-Terminen zusammensetzt. Für Mais scheitert das Modell, da aufgrund der Transparenz von Mais das Rückstreusignal während der gesamten Anbauphase stark von den Bodeneigenschaften und damit auch dem Reihenrichtungseffekt beeinflusst wird (AUQUIERE & DEFOURNY 1997). Damit scheint die Modellannahme der Einfachstreuung innerhalb des Bestandes zu stark vereinfachend. Darüber hinaus finden bei Reihenkulturen besonders im frühen Wachstumsstadium verstärkt Interaktionen zwischen Boden und Pflanze statt (siehe Abb. 9-6c), die im Modell nicht berücksichtigt wurden.

Da das *Water-Cloud* Modell nur auf den beiden Variablen Bodenfeuchte und Wassergehalt der Pflanzen basiert, kann es leicht analytisch invertiert werden (PREVOT et al. 1993). Soll die Ableitung einer der beiden Variablen aus den gemessenen Radardaten erfolgen, muß die andere Variable bekannt sein, sofern nur eine einfache Radarkonfiguration - wie beim ERS - vorliegt. Sobald zwei Radarmessungen durch einen Überflug vorliegen (optional durch zwei Polarisierungen, Einfallswinkel oder Frequenzen zu realisieren), kann die Bodenfeuchte unabhängig vom Wassergehalt der Pflanzen bestimmt werden.

9.4.5 Ergebnisse der einfachen Regressionsanalysen mit Pflanzenparametern

Die Beziehungen zur Radarrückstreuung wurden für die Parameter Wuchshöhe (WH), Blattflächenindex (LAI) (m^2/m^2), Frischmasse (FM) (kg/m^2), Trockenmasse (TM) (kg/m^2) und Wassermenge (WM) (kg/m^2) anhand der Berechnung des Korrelationskoeffizienten untersucht. Grundlage der Berechnung sind die Probennahmen zu den jeweiligen ERS-2 Aufnahmen der Jahre 1997 und 1998.

Da sich die Morphologie (Makrostruktur) von Getreide, Raps und Mais mit Erscheinen der Blütenanlage (Ähren- bzw. Rispschieben) drastisch ändert (= EC 50), wurde der Datensatz in zwei Zeitfenster unterteilt: Bis zum Erreichen des EC-Stadiums 50 und ab EC-Stadium 50 bis zur Ernte. Für Kartoffel tritt die markanteste morphologische Veränderung mit dem Schließen des Bestandes ein (EC 39), wenn über 90% der Pflanzen benachbarter Reihen sich berühren. Darüber hinaus wurden die separat für die Fruchtstände (FrSt) gemessenen Parameter der Frischmasse (FM), Trockenmasse (TM) sowie der Wassermenge (WM) in Beziehung zur Rückstreuung gesetzt.

In Tab. 9-7 bis Tab. 9-9 sind die Ergebnisse der einfachen Regressionsanalyse zusammengefaßt. Die Anzahl der Stichproben variiert aufgrund unterschiedlich langer Anbaudauer der Kulturen (minimal für SG mit ca. drei ERS-Terminen pro Anbaujahr und bis zu maximal acht ERS-Terminen pro Anbaujahr für Mais), unterschiedlicher Beprobungsdauer und Anzahl der Beprobungsflächen.

Tab. 9-7: Korrelationskoeffizienten (r) zwischen ERS-Rückstreuung und einzelnen Bestandesparametern aller beprobten Kulturarten der Meßkampagne 1997-1998; gesamte Vegetationsperiode

Parameter	Kultur / Korrelationskoeffizient											
	WW		WG		SG		MA		RA		KA	
	R	n	r	n	R	n	R	n	r	n	r	n
FM gesamte Pflanze	-0,26	63	-0,25	46	-0,29	37	0,08	55	-0,08	36	0,79	18
TM gesamte Pflanze	-0,28	63	-0,34	46	-0,38	37	0,05	55	-0,14	36	0,78	18
WM gesamte Pflanze	-0,45	63	-0,19	46	-0,31	37	0,09	55	-0,11	36	0,77	18
Wuchshöhe	-0,51	78	-0,38	50	-0,43	39	0,24	62	0,16	45	0,75	18
Blattflächenindex	-0,14	46	-0,17	34	-0,35	18	-0,42	42	-	-	0,28	16

Tab. 9-8: Korrelationskoeffizienten (r) zwischen ERS-Rückstreuung und einzelnen Bestandesparametern aller beprobten Kulturarten der Meßkampagne 1997-1998; bis einschließlich der Entwicklung vegetativer Pflanzenteile (EC 49) bzw. Reihenschluß (EC 39)

Parameter	Kultur / Korrelationskoeffizient											
	WW		WG		SG		MA		RA		KA	
	r	n	r	n	r	n	R	n	r	n	r	n
FM gesamte Pflanze	-0,90	26	-0,79	26	-0,73	17	0,21	14	-0,76	12	0,69	8
TM gesamte Pflanze	-0,91	26	-0,81	26	-0,78	17	0,29	14	-0,74	12	0,46	8
WM gesamte Pflanze	-0,89	26	-0,84	26	-0,65	17	0,29	14	-0,77	12	0,71	8
Wuchshöhe	-0,92	32	-0,78	26	-0,71	17	0,28	14	-0,30	12	0,78	8
Blattflächenindex	-0,39	12	-0,34	12	-0,37	10	0,12	11	-0,19	8	0,21	8

Tab. 9-9: Korrelationskoeffizienten (r) zwischen ERS-Rückstreuung und einzelnen Bestandesparametern aller beprobten Kulturarten der Meßkampagne 1997-1998; ab Erscheinen der Blütenanlage (EC 50) bzw. nach Reihenschluß (EC 40)

Parameter	Kultur / Korrelationskoeffizient											
	WW		WG		SG		MA		RA		KA	
	r	n	r	n	r	N	R	n	R	N	r	n
FM gesamte Pflanze	-0,15	37	-0,32	20	0,18	20	-0,14	41	0,10	24	0,38	10
TM gesamte Pflanze	0,29	37	0,36	20	0,59	20	0,07	41	0,41	24	0,26	10
WM gesamte Pflanze	-0,46	37	-0,52	20	-0,30	20	-0,15	41	-0,02	24	0,38	10
Wuchshöhe	-0,20	48	-0,24	24	-0,81	22	-0,18	48	-0,07	33	0,16	10
Blattflächenindex	-0,25	34	-0,28	22	-0,36	8	-0,09	31	-	-	0,19	8
FM Fruchtstand	0,62	36	0,56	23	0,70	14	-	-	-	-	-	-
TM Fruchtstand	0,74	36	0,69	23	0,73	14	-	-	-	-	-	-
WM Fruchtstand	0,43	36	0,62	23	0,70	14	-	-	-	-	-	-

Betrachtet man die gesamte Zeitreihe (Tab. 9-7), weist keiner der untersuchten Bestandesparameter einen engeren Zusammenhang zur Radarrückstreuung auf. Selbst die Richtung der Zusammenhänge ändert sich in Abhängigkeit der Kulturart: Die zu erwartende Abnahme der Rückstreuung mit zunehmender Biomasse bzw. Wassermenge kehrt sich bei Kartoffel und Raps um. Für Mais ist überhaupt kein Zusammenhang feststellbar. Letztere Kulturarten scheinen aufgrund ihrer unterschiedlichen Pflanzenmorphologie im Vergleich zu WW, WG und SG durch andere Rückstreumechanismen charakterisiert zu sein.

Wird das Zeitfenster bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens eingengt (Tab. 9-8), verbessert sich die Stärke der Zusammenhänge zwischen den Bestandesparametern und dem Rückstreukoeffizienten für WW, WG, SG und Raps. Für Mais und KA kann dies jedoch

nicht bestätigt werden. Durch welche physikalische Eigenschaft (Pflanzengeometrie, Verteilung des Wassers in der Pflanze, Bodeneinflüsse) die Rückstreuung tatsächlich verursacht wird, läßt sich damit allerdings nicht klären, da außerdem die vier Pflanzenparameter in diesem Zeitabschnitt untereinander hoch korreliert sind. Die relativ hohen Korrelationskoeffizienten für WW, WG und SG bekräftigen jedoch, daß es anhand der Radarrückstreuung bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens möglich ist, für diese Kulturarten die vier Pflanzenparameter gut zu bestimmen.

In Abb. 9-18 sind die Beziehungen am Beispiel von WW dargestellt:

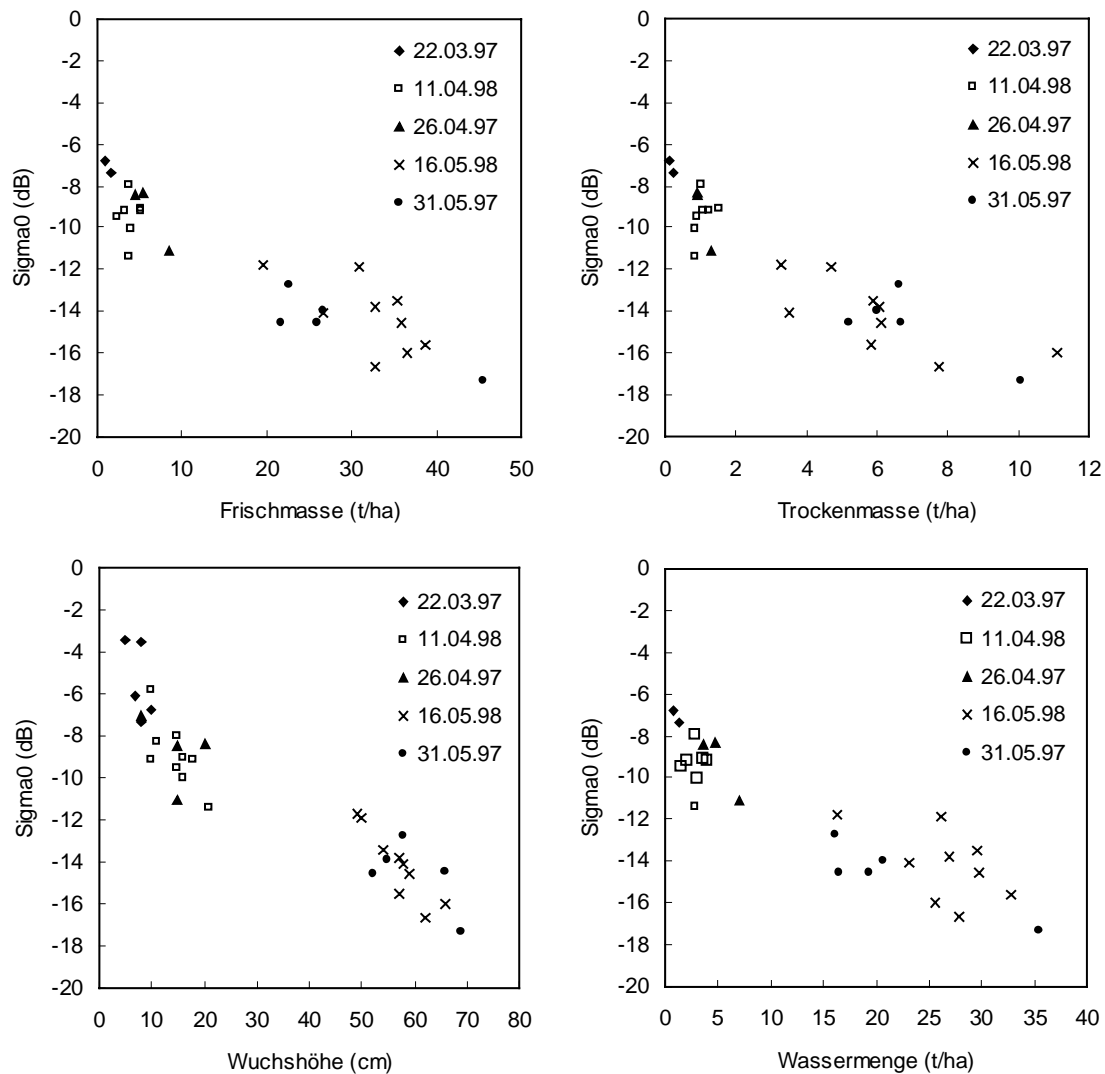


Abb. 9-18: Beziehungen zwischen Radarrückstreuung und Pflanzenparametern von Winterweizen der Meßjahre 1997 und 1998

Für WG und SG stellten sich die Ergebnisse ähnlich, wenn auch nicht ganz so deutlich dar. Da die Biomasse von SG insgesamt geringer ist als bei den beiden Wintergetreiden, können verstärkte Bodeneinflüsse die Beziehungen zu den Pflanzenparametern schwächen. Allgemein weisen Schläge mit geringerer Biomasse zu Beginn der Vegetationsperiode höhere Streuungen um die Ausgleichsgerade auf, was auf stärkere Bodeneinflüsse zurück-

geführt werden kann. Ab einer Biomasse von etwa 5 t/ha treten die Bodeneinflüsse in den Hintergrund. Die Rückstreuung wird nun in erster Linie durch die Stengel und nachgeordnet durch die Blätter bestimmt, wobei die Dämpfungskomponente durch die Stengel eindeutig dominiert (COOKMARTIN et al. 1998).

Für die Zeitspanne nach dem Ährenschieben sind die Zusammenhänge zwischen Rückstreuung und Pflanzenparameter insgesamt schwächer, wenn die gesamte oberirdische Biomasse betrachtet wird. Positive Zusammenhänge ergeben sich jedoch für WW, WG und SG zwischen Rückstreuquerschnitt und den Feuchteigenschaften der Fruchtstände. Daß die Radarrückstreuung bei VV-polarisierten Daten nach dem Ährenschieben hauptsächlich von den Eigenschaften der Ähren bestimmt wird, bestätigen die Untersuchungen von COOKMARTIN et al. (1998) an WW und WG. Neben den Feuchteigenschaften der Ähren attestieren die Autoren eine hohe Sensitivität der Rückstreuung gegenüber ihrer Raumorientierung (Neigung der Ähren gegen die Vertikale). Die in den Zeitreihenanalysen bereits diskutierte markante Abnahme der Rückstreuung bei WG könnte somit auch durch das Abknicken der Ähren in eine horizontale Position erklärt werden. Dieser ausgeprägte Trog im Zeitprofil kann bei WW nicht beobachtet werden, da die Ähren bis zur Ernte eine nahezu erektophile Orientierung beibehalten.

Obige Ergebnisse konnten innerhalb des EMAP-Projektes für alle vier verschiedenen Anbauregionen Deutschlands bestätigt werden.

9.4.6 Ableitung von Pflanzenparametern

Für die Fruchtarten WW, WG, SG und RA konnten durch Invertierung der einfachen Regressionen folgende Pflanzenparameter abgeleitet werden:

Tab. 9-10: Invertierung der Regressionsmodelle zur Ableitung der Frischmasse (FM), Trockenmasse (TM) und absoluten Wassermenge (WM) der Kulturarten WW, WG, SG und RA

Kulturart	Parameter	Regressionsmodell	R ²	S (t/ha)	Berücksichtigte ERS-2 Termine
WW	FM	$= -4,09 * \sigma^0 - 29,77$	0,81	6,6	22. März, 26. April, 31. Mai 1997
	TM	$= -0,82 * \sigma^0 - 5,95$	0,83	1,3	07. März, 11. April, 16. Mai 1998
	WM	$= -3,27 * \sigma^0 - 23,85$	0,79	5,2	
WG	FM	$= -4,56 * \sigma^0 - 34,44$	0,62	7,7	22. März, 26. April 1997
	TM	$= -1,11 * \sigma^0 - 8,63$	0,66	1,8	07. März, 11. April 1998
	WM	$= -3,44 * \sigma^0 - 25,85$	0,71	6,0	
SG	FM	$= -4,21 * \sigma^0 - 34,45$	0,53	8,7	26. April, 31. Mai 1997
	TM	$= -0,84 * \sigma^0 - 7,52$	0,61	0,8	11. April, 16. Mai 1998
	WM	$= -3,36 * \sigma^0 - 26,85$	0,42	7,6	
RA	FM	$= -5,68 * \sigma^0 + 2,03$	0,58	13,2	22. März, 26. April 1997
	TM	$= -1,12 * \sigma^0 - 1,42$	0,55	2,7	07. März, 11. April 1998
	WM	$= -4,56 * \sigma^0 + 3,48$	0,59	10,1	

Die Ergebnisse beruhen auf den linearen Zusammenhängen zwischen Radarrückstreuung und Pflanzenparametern, bezogen auf einen Zeitraum bis zur Entwicklung der vegetativen Pflanzenteile (EC 49). Die große Unsicherheit, die mit der Schätzung der Biomasse ver-

bunden ist, wird durch den absoluten Standardfehler (S) zum Ausdruck gebracht. Dieser bewegt sich bei den Getreidearten zwischen 6,6 und 8,7 t Frischmasse pro ha. Für Winterrapss beträgt der absolute Standardfehler sogar 13,2 t/ha. Große relative Abweichungen wurden bei Schlägen mit geringer Biomasse festgestellt, da hier von einem signifikanten Einfluß des Bodens auf das Rückstreusignal ausgegangen werden kann. Dies betrifft im vorliegenden Fall Winterweizen- und Wintergersteseschläge während der März-Termine, sowie Sommergersteseschläge während der April-Termine. In diesen Fällen, in denen die Modellbedingungen für vegetationsfreie Böden erfüllt sind, sollten die Ergebnisse der Biomasseschätzung besonders kritisch beurteilt werden.

Biomassekarten

Unter Berücksichtigung des oben quantifizierten Schätzfehlers kann mit Einschränkungen für Getreidebestände eine großflächige Abschätzung der Biomasse mit ERS SAR-Daten bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens durchgeführt werden. Aufgrund des räumlichen Auflösungsvermögens des ERS mit 5 m x 25 m beschränkt sich die Zustandserfassung jedoch auf Schläge mit einer Mindestgröße von etwa 2 ha bzw. ca. 100 SAR-Pixel.

Abb. 9-19 zeigt beispielhaft die mittlere Bio- bzw. Frischmasse der Winterweizen-, Wintergerste-, Sommergerste-, Triticale-, Winterroggen- und Winterrapsschläge des Teilgebietes Garching, abgeleitet aus den ERS SAR-Daten vom 11.04.1998. Für Triticale und Winterroggen konnten ähnlich gute Zusammenhänge zwischen dem Radarrückstreukoeffizienten und den Parametern Frisch- und Trockenmasse bis zum Ährenschieben wie bei den anderen Getreidearten festgestellt werden, so daß für beide Kulturarten eine Schätzung der Biomasse möglich war¹.

In der Biomassekarte vom 11.04.1998 (Abb. 9-19) sind die Rapsschläge mit den maximalen Biomassewerten aller landwirtschaftlichen Kulturen deutlich hervorgehoben. Die durchschnittliche Wuchshöhe betrug zu diesem Zeitpunkt bereits 30 cm. Im Gegensatz dazu sind die geringsten Biomassewerte auf den Sommergersteseschlägen zu finden, die Mitte April mit einer durchschnittlichen Wuchshöhe von 5 cm den Boden nur spärlich bedeckten. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, daß die relativ hohen Rückstreusignale dieser Flächen aus direkter Bodenreflexion resultieren und maßgeblich durch die Bodenparameter Rauigkeit und Feuchte bestimmt wurden. Ebenfalls hohe Biomassewerte von > 10 t/ha konnten für Wintergerste und Winterroggen festgestellt werden, die am 11. April den Boden zu 100% bedeckten und eine durchschnittliche Wuchshöhe von 20 cm aufwiesen. Eine erwartungsgemäß geringere Vegetationsmasse zeigten Winterweizen und Triticale, mit mittleren Wuchshöhen zwischen 10 und 15 cm.

Vergleicht man die aus den ERS-Daten abgeleiteten Biomassewerte mit einem unabhängigen Validierungsdatensatz von fünf Meßfeldern (rot umrandete Polygone), so zeigt sich ei-

¹ Da Triticale und Winterroggen nur einen geringen Flächenanteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche einnehmen, wurde auf die Darstellung der Regressionsgleichungen verzichtet.

ne allgemeine Überschätzung der modellierten Biomassewerte. Besonders starke Abweichungen waren beim Meßfeld WW5 (+ 238%) und SG1 (+ 112%) zu beobachten.



Abb. 9-19: Mittlere Frischmasse in t/ha von Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Winterroggen, Triticale und Wintereraps, abgeleitet aus ERS SAR-Daten vom 11.04.1998 am Beispiel des Teilgebietes Garching

Obwohl die Ableitung absoluter Biomassewerte aus ERS SAR-Daten mit großen Schätzfehlern behaftet ist, bilden die relativen Rückstreudifferenzen die unterschiedlichen Entwicklungsstadien der betrachteten Getreidearten plausibel ab. Biomassekarten vermitteln daher einen guten räumlichen Eindruck von den relativen Unterschieden bezüglich der Frisch- bzw. Trockenmasse.

Darauf aufbauend besteht die Möglichkeit, die zeitliche Entwicklung der untersuchten Pflanzenparameter räumlich zu visualisieren. Dies ist am Beispiel der Frischmasseent-

wicklung oben genannter Kulturarten im Frühjahr 1997 dargestellt (Abb. 9-20). Datengrundlage sind die ERS-2 Aufnahmen vom 22.03., 26.04. und 31.05.1997.

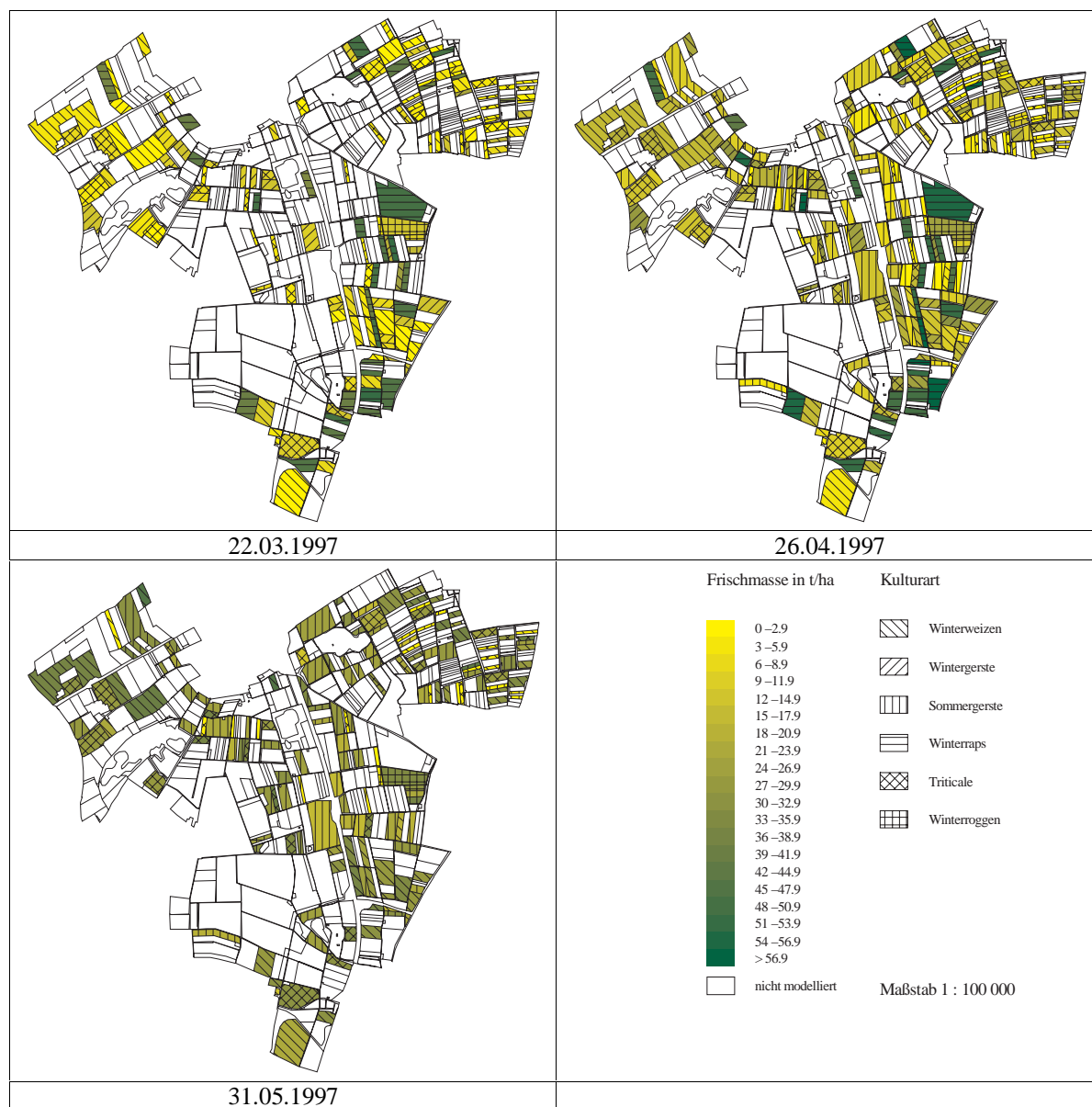


Abb. 9-20: Zeitliche Entwicklung der Frischmasse von Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Triticale und Winterraps, abgeleitet aus ERS SAR-Daten vom 22.03., 26.04. und 31.05.1997 am Beispiel des Teilgebietes Garching

Der höhere Anteil nicht modellierter Flächen während des März-Termins resultiert aus der noch nicht vorhandenen Sommergerste; während des Mai-Termins war das kritische EC-Stadium von 49 für Wintergerste und Winterraps bereits überschritten. Die dunkelgrünen Flächen während der beiden ersten Termine stellen wiederum Winterraps dar, dessen Frischmasse sich innerhalb von 35 Tagen etwa verdoppelt hat. Eine Vervielfachung der Frischmasse zwischen den beiden ERS-Terminen ist hingegen bei Winterweizen und

Wintergerste zu beobachten. Zwischen dem 26. April und 31. Mai nimmt die Frischmasse von Sommergerste (von < 2 t/ha auf 27 t/ha) und Winterweizen (von 8 t/ha auf 30 t/ha) am stärksten zu.

9.4.7 Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse

Da für die Periode nach dem Ährenschieben kein Einzelparameter die Rückstreuung hinreichend genau erklären kann, wurden mehrere Pflanzenparameter für die Fruchtarten WW, WG und SG mit Hilfe von multiplen Regressionsanalysen der Radarrückstreuung gegenübergestellt. Dabei wurde eine Methode gewählt, bei der die Aufnahme der unabhängigen Variablen in das Regressionsmodell schrittweise erfolgt, wobei diejenige Variable ausgewählt wird, die ein bestimmtes Gütekriterium (F-Wert¹) maximiert (BACKHAUS et al. 1994; HUSSEY et al. 1989). Der iterative Prozeß wird solange fortgesetzt, bis ein Modell erreicht ist, das keine Veränderungen der Variablenzusammensetzung mehr zuläßt.

Als Eingangsparameter dienten die gemessenen Parameter Wuchshöhe, Blattflächenindex, Wassermenge, Frisch- und Trockenmasse der gesamten Pflanzen bzw. der Ähren und volumetrische Bodenfeuchte. Zur besseren Interpretierbarkeit der Ergebnisse sollten möglichst wenig Parameter ins Modell aufgenommen werden.

Die Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse stellen sich wie folgt dar:

Tab. 9-11: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse zwischen der Radarrückstreuung und den gemessenen Pflanzenparametern für Getreide ab dem Zeitpunkt des Ährenschiebens

Fruchtart	Funktion	Mult. R ²
WW	$\sigma^0 = 0,328 * \text{Ährentrockenmasse} - 0,110 * \text{Pflanzenfrischmasse} - 8,12$	0,69
WG	$\sigma^0 = 0,822 * \text{Ährentrockenmasse} - 0,326 * \text{Wuchshöhe} + 14,60$	0,63
SG	$\sigma^0 = 0,313 * \text{Ährentrockenmasse} - 0,160 * \text{Wuchshöhe} + 1,91$	0,78

Die Ergebnisse veranschaulichen den signifikanten Einfluß der Ähre auf die Radarrückstreuung. In allen drei Regressionsmodellen hat dabei die Trockenmasse der Ähre den höchsten Erklärungsbeitrag. Neben der Ährentrockenmasse wurde von den insgesamt neun Eingangsparametern jeweils nur ein weiterer Pflanzenparameter in die Regressionsgleichung aufgenommen. Die Bestimmtheitsmaße von 0,63 bis 0,78 zeigen, daß der Rückstreuungskoeffizient von Getreidebeständen damit auch nach dem Ährenschieben relativ gut beschrieben werden kann.

Dennoch dürfen die Ergebnisse der multiplen Regression nicht überinterpretiert werden, da die gefundenen Zusammenhänge sowohl orts- als auch zeitabhängig sind.

¹ Eine Variable wird aufgenommen, falls das Signifikanzniveau ihres F-Wertes unter dem Aufnahmewert von 0,05 liegt, und wird ausgeschlossen, falls das Signifikanzniveau den Ausschlußwert von 0,10 übersteigt.

9.5 Diskussion zur Ableitung bio- und bodenphysikalischer Parameter

Die Untersuchungen zur Bodenfeuchte zeigten, daß ERS-Daten grundsätzlich das Potential zur Abschätzung der Feuchte des Oberbodens besitzen, wenn zusätzliche Informationen über die Beschaffenheit der Bodenoberfläche verfügbar sind. Diese Zusatzinformationen umfassen Angaben zur Bodenrauigkeit, zur Art und Ausprägung der Vegetationsbedeckung, zum lokalen Einfallswinkel, zur Bodenart und - im Falle von Reihenkulturen - Angaben zur Reihengeometrie. Ein Teil der Zusatzdaten kann in der Regel aus allgemein verfügbaren Geodatensätzen extrahiert werden: Der lokale Einfallswinkel ergibt sich aus einem DGM in Kombination mit den SAR-Daten selbst; Informationen zur Bodenart können aus mittelmaßstäbigen digitalen Bodenkarten entnommen werden; Informationen über Art und Ausprägung der Vegetationsbedeckung geben idealerweise die Ergebnisse einer Landnutzungsklassifizierung und Zustandserfassung. Allgemein nicht verfügbar sind hingegen flächendeckende Informationen zur Bodenrauigkeit und zur Geometrie von Reihensstrukturen. Da eine unabhängige Schätzung von Bodenfeuchte und Bodenrauigkeit mit einkanaligen und einfach-polarisierten SAR-Daten nicht möglich ist, können die Rückstreuoeffizienten von ERS SAR-Aufnahmen nicht ohne Zusatzinformationen in Bodenfeuchtwerte konvertiert werden. Dies trifft auch auf die beiden anderen zur Zeit verfügbaren, satellitengestützten Radarsysteme wie JERS-1 und RADARSAT zu. Eine Trennung des Bodenfeuchte- und Bodenrauigkeitseinflusses auf das Rückstreusignal kann nach Einschätzung von ULABY (1998) und JACKSON et al. (1997) idealerweise durch multipolarisierte und multifrequente Radardaten erzielt werden. Da durch die ERS-Nachfolge-mission ENVISAT-1 wahlweise und alternierend zwei Polarisierungen (VV und HH) realisiert werden sollen, können Fortschritte bezüglich der Bodenfeuchteerfassung mit SAR-Daten erwartet werden.

Ein zeitlich kontinuierliches Bodenfeuchtemonitoring (Quantifizierung relativer raumzeitlicher Bodenfeuchteunterschiede), das beispielweise für hydrologische Modellierungen wertvolle Informationen bereitstellen könnte, ließe sich grundsätzlich auch mit ERS-Zeitreihen realisieren. Unter der Annahme, daß sich Oberflächen hinsichtlich ihrer Rauigkeit zwischen zwei Aufnahmeterminen wenig ändern, können Änderungen der Rückstreuung überwiegend auf Bodenfeuchtigkeitsänderungen zurückgeführt werden. Voraussetzung dafür wäre allerdings eine deutliche Verkürzung der Zeitintervalle zwischen den Aufnahmen.

Die im zweiten Teil dieses Kapitels erarbeiteten Ergebnisse zur Beziehung von Pflanzenparametern und Radarrückstreuung zeigten nur in Einzelfällen gute Zusammenhänge. Diese beschränken sich auf die Parameter Frischmasse, Trockenmasse und den absoluten Wassergehalt der Pflanzen. Die Gültigkeit der Zusammenhänge ist jedoch ausschließlich für ein Zeitintervall zwischen Blattentwicklung und Entwicklung vegetativer Pflanzenteile (entspricht dem Ährenschieben bei Getreide) gegeben, in dem befriedigende bis gute Zusammenhänge für alle untersuchten Getreidearten (WW, WG, SG) und Winterraps gefunden wurden. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen kann mit Hilfe eines seg-

mentbezogenen Ansatzes näherungsweise eine Abschätzung der Biomasse auf Schlagbasis durchgeführt werden.

Im Rahmen von EMAP konnte ferner gezeigt werden, daß die aus SAR-Daten abgeleitete Biomasse für frühe Wachstumsstadien zur Verbesserung von Wachstumsmodellen beitragen und somit die Genauigkeit von Ertragsschätzungen steigern kann (KÜHBAUCH et al. 1999).

Für die verbleibende Phase bis zur Ernte ergaben sich zwischen Radarrückstreuung und einzelnen Pflanzenparametern keine signifikanten Zusammenhänge. Auch unter Berücksichtigung mehrerer Pflanzenparameter zur Erklärung des Rückstreusignals mit Hilfe multipler Regressionsmodelle konnten keine grundlegenden Ergebnisverbesserungen erzielt werden. Ferner zeichneten sich die multiplen Regressionsmodelle durch eine geringe Robustheit aus, was dadurch zum Ausdruck kam, daß kleinste Veränderungen des Eingangsdatensatzes (z.B. Hinzunahme oder Weglassen einzelner ERS-Termine oder Bestandesparameter) zu völlig neuen Zusammensetzungen und Wichtungen der Parameter im Gleichungssystem führten.

Die Anwendung des semi-empirischen *Water-Cloud* Modells ergab eine befriedigende bis gute Vorhersagegenauigkeit der Radarrückstreuung in Abhängigkeit einer der beiden Variablen Bodenfeuchte oder absoluter Wassergehalt der Pflanzen. Dies bestätigt, daß auch mit einem relativ einfachen Modell die komplexe Problematik der Rückstreuung von vegetationsbedeckten Böden erfaßt werden kann. Um sowohl die Bodenfeuchte als auch den Wassergehalt des Pflanzenbestandes unabhängig aus Radardaten ableiten zu können, sind jedoch multifrequente und/oder multipolarisierte Radarkonfigurationen bzw. Konfigurationen mit zwei Einfallswinkeln unabdingbar.

Insgesamt scheint für eine Erfassung der Zusammenhänge zwischen Radarrückstreuung und Bestandesparametern eine physikalische Modellierung (Backscatter-Modellierung) notwendig zu sein. Existierende Backscattermodelle zeichnen sich im allgemeinen jedoch durch eine hohe Komplexität aus und sind wenig auf Parameter angepaßt, die für landwirtschaftliche Fragestellungen von Interesse sind (ULABY et al. 1990; BOUMAN 1992; TOURE et al. 1994). Neueste Entwicklungen auf diesem Gebiet versuchen anhand von Wachstumsmodellen die Zahl der zur Beschreibung der Radarrückstreuung erforderlichen Parameter zu reduzieren und an landwirtschaftliche Bestandesparameter anzupassen (SVENDSEN & SARABANDI 1998).

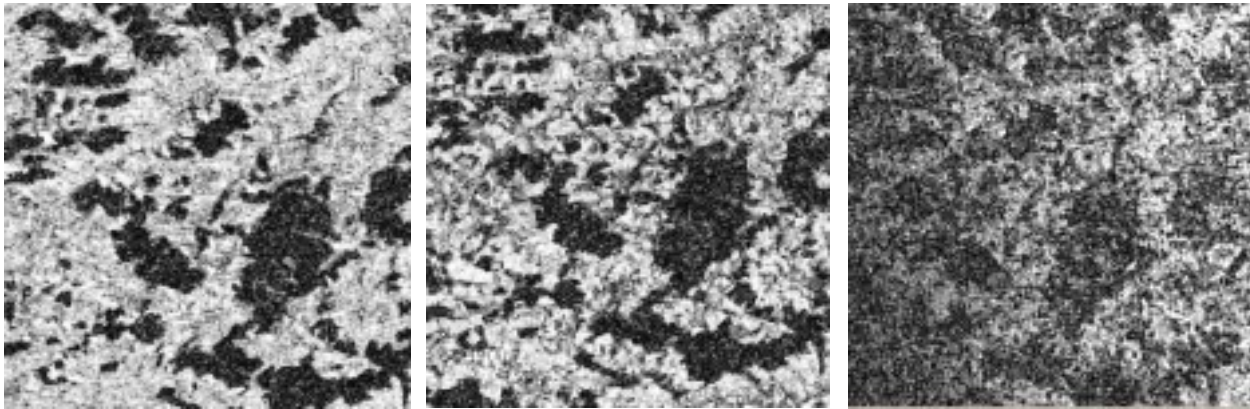
10 ERS-1/-2 Tandem interferometrische Kohärenz zur Bestimmung von Pflanzenwuchshöhen

10.1 Einführung

Für den vorliegenden Fall der *Repeat-Pass*-Interferometrie mit zwei zeitlich voneinander getrennten SAR-Aufnahmen desselben Gebietes, sind zeitliche Dekorrelationseffekte zu beobachten (BÖRNER 1998). Solche Effekte treten immer dann auf, wenn sich die Targeteigenschaften zwischen beiden Aufnahmeterminen verändern. Gründe dafür können diverse komplexe Mechanismen wie Wind, Niederschlag, Temperatur und Feuchte sein (HOBBS et al. 1998). Jeder dieser Mechanismen beeinflusst wiederum ganz bestimmte Parameter des Targets. Bei relativ kurzen Basislinien, wie sie bei den ERS-1/-2 Tandem-Bildpaaren vorliegen, sind es in erster Linie Veränderungen der Geometrie der Zielobjekte, die zu einer Abnahme der interferometrischen Korrelation (Szenendekorrelation) führen. Derartige bewegungsbedingte Geometrieänderungen sind typisch für Volumenstreuer und resultieren in zufälligen Änderungen der Raumposition (Höhendifferenz, Horizontalverschiebung und Orientierung) von Pflanzenteilen einer dichten und hohen Vegetationsschicht. Insbesondere Änderungen der Höhe der Streuzentren, die beispielsweise durch Wind verursacht werden, führen zu signifikanten Kohärenzverlusten, da Höhendifferenzen unmittelbar die interferometrische Phase beeinflussen. BÖRNER (1998) konnte nachweisen, daß die rasche Abnahme der Kohärenz mit zunehmender Höhendifferenz einer linearen Beziehung folgt und von der jeweiligen Polarisation unabhängig ist. Änderungen der Orientierung, die ebenfalls durch Wind verursacht werden, beeinflussen jedoch die polarimetrischen Eigenschaften des Targets und können zu erheblichen Dekorrelationen führen (BÖRNER 1998). Mit der SAR-Interferometrie ist somit ein empfindliches Instrument zur Messung derartiger Parameter gegeben (SCHWÄBISCH 1995).

Daß die Kohärenz sehr stark durch die Vegetationsschicht beeinflusst wird, zeigen Waldgebiete, die durch besonders niedrige Kohärenzwerte gekennzeichnet sind und sich damit in den Kohärenzbildern deutlicher als in SAR-Intensitätsbildern von den übrigen Flächen abgrenzen lassen (dunkle Bereiche in Abb. 10-1).

Aber auch innerhalb der landwirtschaftlich genutzten Flächen ergeben sich je nach Höhe bzw. Dichte der Vegetationsschicht deutliche Unterschiede im Kohärenzwert. Es soll daher überprüft werden, ob Beziehungen zwischen Pflanzenhöhe und interferometrischer Kohärenz einzelner landwirtschaftlicher Kulturarten existieren.



Kohärenz 01.03.96/02.03.96

Kohärenz 10.05.96/11.05.96

Kohärenz 14.06.96/15.06.96

Abb. 10-1: Gegenüberstellung von Kohärenzbildern zu unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten für den Gebietsausschnitt Scheyern (Bildausschnitt ca. 5 x 5 km²)

10.2 Methode

Basierend auf den mittleren schlagbezogenen Kohärenzwerten wurden Kohärenzsignaturen für die Fruchtarten Winterweizen, Wintergerste, Zuckerrübe, Mais und Kartoffel aus den drei verfügbaren Tandem-Bildpaaren ermittelt. Als Datengrundlage dienten die 30 Testfelder der Ground Truth-Meßkampagne 1996. Für diese Schläge mit einer mittleren Größe von ca. 12 ha (ca. 1100 SAR-Bildelemente) lagen exakte Wuchshöhenmeßwerte vor, die den Kohärenzwerten gegenübergestellt wurden. Die Vertraulichkeit der fruchtartenspezifischen Kohärenzsignaturen konnte durch die große Anzahl von weiteren 274 landnutzungskartierten Schlägen in 1996 statistisch abgesichert sowie für eine Vielzahl zusätzlicher Fruchtarten ermittelt werden. Für die Korrelations- und Regressionsrechnung konnten diese Schläge jedoch nicht herangezogen werden, da von ihnen keine Wuchshöhenangaben vorlagen.

Von der Untersuchung wurden solche Fälle ausgeschlossen, die durch sehr niedrige Kohärenzwerte bzw. starke Dekorrelationen während der ersten beiden Tandem-Termine auffielen. Auf diesen Flächen fanden Bodenbearbeitungsmaßnahmen innerhalb des 24 stündigen Zeitintervalls statt. Dies betraf jeweils ein Mais- bzw. ein Zuckerrübenfeld.

10.3 Zeitreihenbetrachtung von Kohärenz und Wuchshöhe

Nachfolgende Diagramme zeigen die zeitlichen Verläufe der mittleren Kohärenz und der mittleren Wuchshöhe der ausgewählten Fruchtarten. Die einfachen Standardabweichungen sind durch senkrechte Linien dargestellt:

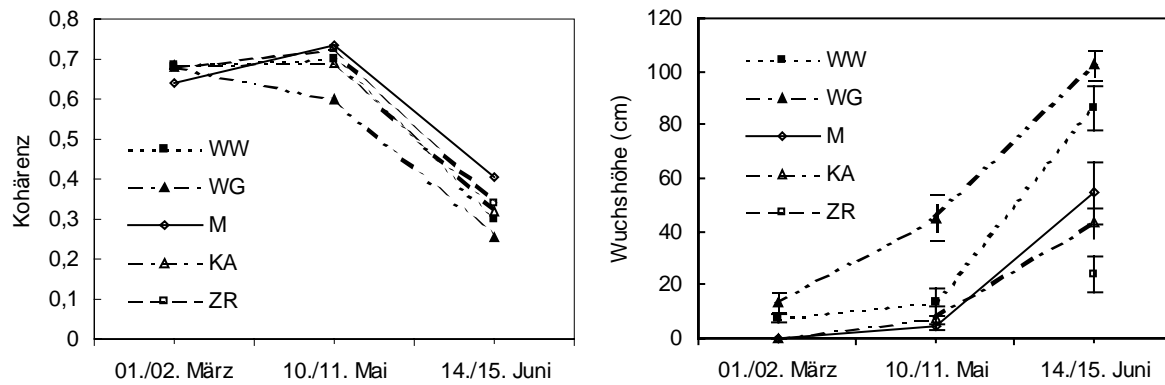


Abb. 10-2: Kohärenzsignaturen und Wuchshöhenverläufe der 5 Hauptfruchtarten 1996

In Tab. 10-1 sind die bereinigten Kohärenzsignaturen weiterer Kulturarten zusammengefaßt:

Tab. 10-1: Kohärenzsignaturen weiterer landwirtschaftlicher Kulturarten

Fruchtart	01./02. März		10./11. Mai		14./15. Juni		Anzahl der Schläge
	Mittel	Std.Abw.	Mittel	Std.Abw.	Mittel	Std.Abw.	
Dinkel	0,74	0,01	0,64	0,05	0,38	0,06	12
Triticale	0,67	0,04	0,52	0,11	0,30	0,08	24
Roggen	0,73	0,05	0,56	0,09	0,36	0,11	18
Sommergerste	0,69	0,05	0,66	0,06	0,39	0,10	18
Hafer	0,70	0,06	0,66	0,09	0,33	0,09	60
Raps	0,71	0,06	0,44	0,10	0,41	0,10	24
Kleegras	0,72	0,03	0,72	0,06	0,33	0,10	17
Dauergrünland	0,66	0,05	0,48	0,12	0,40	0,10	101

Die zunehmende Wuchshöhe und Dichte der Vegetationsschicht führt allgemein zur Abnahme der Kohärenzwerte. Die Entwicklung der Vegetationsschicht verursacht eine zunehmende Dekorrelation entsprechend einer Zunahme der Volumenstreuung und den daraus resultierenden zeitlichen Veränderungen durch Windeffekte und Wachstum. Am Beispiel von Wintergerste kann der zeitliche Abstand der Pflanzenentwicklung im Vergleich zu den übrigen, sich erst später entwickelnden Kulturarten deutlich beobachtet werden (Abb. 10-2).

Ein markanter frühzeitiger Rückgang der Kohärenz kann auch bei Winterraps festgestellt werden (Tab. 10-1), der ähnlich wie die Wintergerste aufgrund des fortgeschrittenen Pflanzenentwicklungsstadiums bereits im Mai größere Wuchshöhen erreichte. Im Gegensatz dazu findet der Rückgang der Kohärenz bei Sommerungen wie Sommergerste, Hafer und Kleegras erst zwischen Mitte Mai und Mitte Juni statt. Die geringsten zeitlichen Veränderungen sind bei Dauergrünland zu beobachten (Tab. 10-1).

Ferner kann eine allgemeine Abnahme der Standardabweichungen zwischen den Schlägen im Verlauf der Pflanzenentwicklung festgestellt werden. Diese kann dadurch erklärt werden, daß zu Beginn der Vegetationsperiode - insbesondere bei den Sommerungen - noch

keine Keimung stattgefunden hat bzw. überwiegend vegetationsfreie Bodenverhältnisse vorherrschten. Im weiteren zeitlichen Verlauf treten dann unterschiedliche Entwicklungsstadien einzelner Fruchtarten auf, die sich demzufolge auch in höheren Streuungen der Kohärenz niederschlagen.

10.4 Zusammenhang zwischen Wuchshöhe und Kohärenz

Lineare Beziehungen können für Winterweizen ($n = 14$, aus 3 Tandem-Bildpaaren), Wintergerste ($n = 15$, aus 3 Tandem-Bildpaaren), Mais ($n = 10$, aus 2 Tandem-Bildpaaren) und Kartoffel ($n = 10$, aus 2 Tandem-Bildpaaren) ermittelt werden (Abb. 10-3):

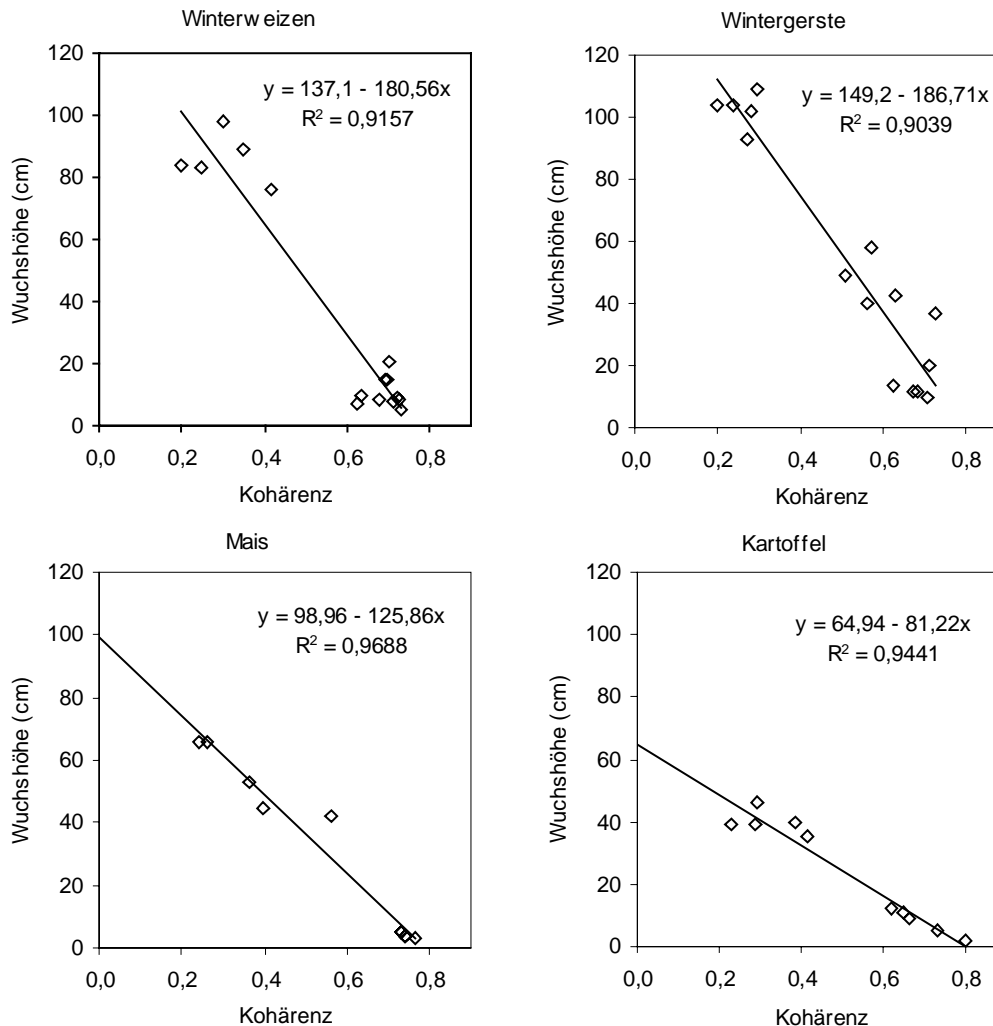


Abb. 10-3: Linearer Zusammenhang zwischen Kohärenz und Wuchshöhe landwirtschaftlicher Kulturarten während der frühen Vegetationsperiode

Die Gültigkeit obiger Beziehungen beschränkt sich auf die betrachtete Zeitspanne vom 01.03. bis 15.06.1996.

Tab. 10-2) faßt die gefundenen linearen Regressionen zwischen der Wuchshöhe (h) und der interferometrischen Kohärenz (γ) zusammen:

Tab. 10-2: Lineare Beziehungen zwischen der Wuchshöhe (h) und der interferometrischen Kohärenz (γ)

Fruchtart	Regressionsgleichung	R ²	Anzahl der Schläge	Anzahl der Tandem-Paare
Winterweizen	$h(\text{cm}) = 137,1 - 180,56 * \gamma$	R ² = 0,91	14	3
Wintergerste	$h(\text{cm}) = 149,2 - 186,71 * \gamma$	R ² = 0,90	15	3
Mais	$h(\text{cm}) = 98,9 - 125,86 * \gamma$	R ² = 0,96	10	2
Kartoffel	$h(\text{cm}) = 64,8 - 81,22 * \gamma$	R ² = 0,94	10	2

Die ermittelten linearen Beziehungen zwischen Kohärenz und der Pflanzenwuchshöhe weisen für die beide Getreidearten Winterweizen und Wintergerste hohe Bestimmtheitsmaße von R² = 0,90 bis 0,91 auf. Noch engere Zusammenhänge ergaben sich für die Sommerungen Mais und Kartoffel mit Bestimmtheitsmaßen von R² = 0,96 bzw. 0,94, was vermutlich auf die geringere Anzahl der verfügbaren Wertepaare zurückzuführen ist. Damit zeigt die Studie, daß die Pflanzenwuchshöhe der betrachteten landwirtschaftlichen Kulturarten mit der aus den ERS-1/-2 Tandem-Bildpaaren berechneten interferometrischen Kohärenz in enger Beziehung steht.

Zu vergleichbaren Ergebnissen kommen Untersuchungen von WEGMÜLLER et al. (1997) sowie ENGDAHL & BORGEAUD (1998). Der enge Zusammenhang zwischen beiden Größen kann genutzt werden, die Wuchshöhe von landwirtschaftlichen Kulturen bereits aus einem Tandem-Bildpaar während der frühen Vegetationsperiode abzuleiten. Diese Informationen können eine wertvolle Verbesserung für die Kalibrierung von Pflanzenwuchsmodellen darstellen. In Anbetracht der erzielten Ergebnisse erscheinen weitere Untersuchungen mit anderen Fruchtarten äußerst vielversprechend.

11 Zusammenfassung und Diskussion

Die Radarfernerkundung generell und ERS-1/-2 Sensoren im Speziellen bieten die Möglichkeit, große Gebiete der Erde zeitgleich, weitgehend wetterunabhängig und in kontinuierlichen Zeitintervallen mit konstanter Qualität abzubilden. Dies ist eine entscheidende Voraussetzung für den operationellen Einsatz von Fernerkundung in der Landwirtschaft. Zentrale Aufgabe dieser Arbeit war, den Informationsgehalt und das Nutzungspotential von ERS-1/-2 zur Erfassung der Arteninventare und des Zustandes landwirtschaftlich genutzter Vegetationsbestände und Böden zu evaluieren.

Für die Untersuchung, welche in verschiedenen Agrarregionen Bayerns von 1996-1998 durchgeführt wurde, stand eine Zeitreihe von bis zu 10 ERS SAR SLC-Szenen pro Jahr sowie Satellitendaten optischer Sensoren (Landsat TM, SPOT PAN und IRS-1C PAN) zur Verfügung. Die *Synthetic Aperture Radar* (SAR) Daten des ERS-1 und ERS-2 wurden im *Single-Look-Complex* (SLC) Format ausgewertet. Das SLC-Produkt enthält in komplexer Form Phasen- und Amplitudeninformation, die bei der Erzeugung der Bilder nicht verändert werden, so daß den Auswertungen nahezu unverfälschte Bildinformationen zugrunde lagen. Dies ermöglichte ferner eine interferometrische Auswertung der Daten und somit die Nutzung der Kohärenz als eine von der Intensität unabhängigen Zusatzinformation im Rahmen der Fruchtartenklassifizierung. Zur Auswertung wurden die Fernerkundungsdaten mit diversen Fachdaten zu den Geofaktoren Boden, Relief und Klima in ein Geoinformationssystem integriert.

Die Modellierung bio- und bodenphysikalischer Zustände landwirtschaftlich genutzter Böden und Kulturpflanzenbestände setzte den Aufbau einer umfangreichen Ground Truth Datenbasis voraus, um statistisch abgesicherte Zusammenhänge zwischen den in situ Messungen der Boden- und Pflanzenparameter und dem Radarrückstreukoeffizienten nachweisen zu können.

Um interferenzbedingte Fehlinterpretationen einzelner Pixel zu vermeiden, wurde grundsätzlich ein objekt- bzw. schlagbezogener Klassifizierungsansatz verfolgt. Auch die Zustandsbeschreibungen der Böden und Vegetationsbestände beschränken sich grundsätzlich auf schlagbezogene Eigenschaften, da das Verhältnis zwischen dem geometrischen Auflösungsvermögen des Sensors (ca. 25 x 25 m) und der durchschnittlichen Größe der Landnutzungseinheiten (ca. 4 ha) keine detaillierteren Aussagen erlaubt.

Voraussetzung für eine objekt- bzw. schlagbezogene Auswertung von Fernerkundungsdaten ist die geometrische Erfassung der Schlaggrenzen, die anhand hochauflösender Satellitenbilder optischer Systeme und großmaßstäbiger digitaler Flurkarten erfolgte.

Kernpunkt der **Klassifizierung landwirtschaftlicher Kulturpflanzenbestände** mit ERS-Daten ist ein multitemporaler Ansatz. Durch die regelmäßige, monatliche Abbildung der Bestände mit ERS-Daten ist es möglich, den zeitlichen Verlauf des Wachstums als Infor-

mation zu nutzen, um auf Grundlage dieser charakteristischen Rückstreuprofile eine Klassentrennung herbeizuführen. Die Ergebnisse zeigen, daß mit diesem Verfahren eine Klassifizierung wichtiger Kulturarten wie Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Mais, Raps und Kartoffel grundsätzlich möglich ist. Da die artenspezifischen Rückstreuprofile ein hohes Maß an interannueller Stabilität aufweisen, ergeben sich im Untersuchungszeitraum von 1996-1998 sehr konstante Ergebnisse. Als problematisch sind hingegen die räumlichen Rückstreuvvariabilitäten zwischen den Schlägen einzelner Kulturarten zu beurteilen. Diese resultieren überwiegend aus schwer modellierbaren, kurzzeitigen Störeffekten wie lokale Wind- oder Niederschlagsereignisse während der Bildaufnahme.

Um den Informationsgehalt der ERS-Daten vollständiger auszuschöpfen, wurden neben dem Mittelwert der Rückstreuung weitere statistische Kennwerte (Variations- und Verteilungsmaße) aus der Pixelmenge einzelner Schläge berechnet. Die hohe Dimensionalität des Merkmalsraums, die aus diesen schlagbezogenen Parametern und den multitemporalen SAR-Datensätzen resultierte, wurde anhand einer Diskriminanzanalyse reduziert. Durch die Dimensionsreduktion wurde gleichzeitig eine Konzentration des zeitlich stark schwankenden Informationsgehalts auf wenige klassentrennende Merkmale herbeigeführt. Dabei zeigte sich, daß die Bedeutung der schlagbezogenen Variationsmaße (Variationskoeffizient, Varianz der logarithmierten Amplitude) als klassentrennende Merkmale im Vergleich zu den mittleren Rückstreukoeffizienten zu gering war, als daß diese *Textur*-Kanäle zu einer Verbesserung der Klassifizierungsergebnisse hätten beitragen können. Ferner konnte aus der Merkmalsauswahl die Bedeutung einzelner Aufnahmetermine für die Klassifizierung beurteilt werden.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Merkmalsextraktion erfolgte die überwachte Klassifizierung mit Hilfe der *Maximum-Likelihood* Entscheidungsregel und eines *Backpropagation* Netzes. Die ergebnisbasierte Beurteilung führte jedoch zu keiner besonderen Überlegenheit eines der beiden überwachten Verfahren. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, daß auch mit Hilfe eines hierarchischen Ansatzes auf Basis der Zeitreihenprofile der mittleren Rückstreuung gute Trennbarkeiten zwischen sechs Hauptfruchtarten erzielt werden können.

Betrachtet man die erzielten Klassifizierungsergebnisse, so ergaben sich in Abhängigkeit von der Klassenanzahl (Varianten mit 6 bzw. 11 Hauptfruchtarten) und der zugrundeliegenden Kanäle Gesamtgenauigkeiten zwischen 75 und 85%. Dazu mußten allerdings besondere Verfahren entwickelt werden, die neben der schlagbezogenen Datenverarbeitung auch zusätzliche Daten aus existierenden Geoinformationssystemen integrierten. Mit Hilfe von Daten zu den Geofaktoren Relief, Boden und Klima war es möglich, im Vorfeld der Klassifizierung eine Grobsegmentierung des Untersuchungsgebietes in naturräumlich homogene Einheiten vorzunehmen. Dadurch konnten die oben erwähnten räumlichen Rückstreuvvarianzen innerhalb einer Klasse, die durch unterschiedliche Pflanzenentwicklung, Biomasse, Wuchshöhe, Bedeckungsgrad, etc. bedingt sind, deutlich reduziert werden. Insgesamt zeigte sich, daß durch die Berücksichtigung regionaler Aspekte im Rahmen der

Klassifizierung der Informationsgehalt der ERS SAR-Daten vollständiger erschlossen werden konnte.

Die Integration der Kohärenz - als eine von der Intensität unabhängige Zusatzinformation - konnte die Gesamtgenauigkeiten der Klassifizierung um ca. 3% steigern.

Im Vergleich zu den mit optischen Satellitendaten erzielten Genauigkeiten kann festgehalten werden, daß mit ERS SAR-Daten auch in witterungsbedingt ungünstigen Jahren Landnutzungsklassifizierungen mit konstant guten Ergebnissen möglich sind, während optische Aufnahmesysteme unter Umständen gar keine Auswertungsmöglichkeit bieten.

Stehen optisch-infrarote Fernerkundungsdaten zur Verfügung, kann durch eine Kombination mit ERS-Daten die Klassifizierungsgenauigkeit um weitere ca. 4% gegenüber der reinen Radarklassifizierung gesteigert werden.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse der Klassifizierung, daß trotz der monofrequenten und einfachpolarisierten Instrumentencharakteristik des ERS-1/-2 eine Arteninventarisierung landwirtschaftlich genutzter Vegetation möglich ist, wenn ein schlagbezogenes, multitemporales Klassifizierungsverfahren unter Einbeziehung zusätzlicher Geoinformationen angewandt wird.

Untersuchungen zur frühzeitigen Erkennung der Fruchtarten ergaben, daß für eine Klassifizierung von Getreide vier ERS-Szenen (April-Juli) nötig sind, wohingegen zur Identifizierung von Hackfrüchten und Mais ERS-Szenen von August und September relevant sind. Unter dem Aspekt der Gesamtgenauigkeit können bereits mit drei ERS-Szenen gute Resultate (> 80%) erzielt werden, wobei der größte Informationsgehalt in ERS-Bildern enthalten ist, die in einem Zeitraum zwischen April und Juni aufgenommen werden.

Für die Fruchtartenklassifizierung ergibt sich die Perspektive, daß zukünftige verbesserte Radarsysteme mit zwei Frequenz-Bändern (z.B. C- und L-Band) eine wesentlich genauere (> 90%) und frühzeitigere Klassifizierung der Feldfrüchte und ihrer Anbaufläche erlauben. Erst dann können die Ergebnisse ein wertvolles Hilfsmittel für die Agrarstatistik sein und gleichzeitig eine Grundlage für eine effiziente Umsetzung der Überwachungsaufgaben innerhalb der EU darstellen.

Die **Erfassung der oberflächennahen Bodenfeuchte** vegetationsfreier/-armer Oberflächen ist mit Radardaten prinzipiell möglich, da im Mikrowellenbereich die Rückstreuung maßgeblich von den physikalischen Eigenschaften der Dielektrizitätskonstante und der Rauigkeit der Oberflächen beeinflusst wird. Soll die Bodenfeuchte aus SAR Daten abgeleitet werden, muß zunächst auf einige grundsätzliche Voraussetzungen hingewiesen werden, die insbesondere das Nutzungspotential der monofrequenten, einfachpolarisierten ERS-1/-2 Daten limitieren:

Die Untersuchungen zur Bodenfeuchtebestimmung aus SAR-Daten beziehen sich auf vegetationsfreie/-arme Oberflächen, da komplexe Streu- und Dämpfungseffekte innerhalb der Vegetationsschicht bzw. zwischen Boden und Vegetationsschicht zu einer fast vollständi-

gen Maskierung des Bodenfeuchtesignals führen, wenn der Pflanzenbestand eine bestimmte Dichte erreicht hat (WOODING et al. 1995).

Eine weitere Einschränkung der Feuchtemodellierung resultiert aus dem starken Einfluß der Bodenrauigkeit auf das Rückstreusignal (ULABY 1999; SU et al. 1997; ALTESE et al. 1996). Um eine Trennung von Bodenfeuchte- und Rauigkeitssignal zu ermöglichen, sind letztendlich zwei unabhängige SAR-Beobachtungen notwendig, welche durch die monofrequente, einfachpolarisierte Instrumentencharakteristik des ERS nicht gegeben sind. Zwei unabhängige SAR-Beobachtungen anhand multitemporaler ERS-Bilder bereitzustellen, würde die zeitliche Unabhängigkeit einer der beiden Variablen (z.B. die Bodenrauigkeit) voraussetzen. Diese ist bei einer 35-tägigen Wiederholungsrate in der Regel nicht gegeben. Damit ist eine einfache Invertierung der ERS-Rückstreuung in einen Bodenfeuchtwert nicht ohne Informationen zur Bodenrauigkeit möglich.

Vor diesem Hintergrund wurde ein empirischer Ansatz verfolgt, der auf einer nach Rauigkeitsklassen differenzierten Bodenfeuchtemodellierung auf Basis einfacher Regressionsmodelle beruht. Die Definition der vier Rauigkeitsklassen, die den Untersuchungen zugrundelagen, ergab sich aus einer visuellen Bonitur der Schläge. Im Hinblick auf eine praktische Anwendung, müßten diese Informationen aus der jeweiligen Bodenbearbeitung und dem Substrat abgeleitet werden, die vom Landwirt selbst und von Bodenkarten bereitzustellen sind.

Die Ergebnisse zeigen, daß ohne eine Differenzierung nach Rauigkeitsklassen nur schwache Zusammenhänge zwischen der Bodenfeuchte der obersten Bodenschicht von 5 cm und dem Rückstreukoeffizienten existieren ($R^2 = 0,46$). Differenziert nach Rauigkeitsklassen können hingegen signifikant positive, lineare Zusammenhänge ($0,65 < R^2 < 0,85$) festgestellt werden. Im Widerspruch zu Untersuchungen von BEAUDOIN et al. (1989 und 1990) zeigte sich allerdings, daß die Sensitivität der Radarrückstreuung gegenüber Bodenfeuchteänderungen für alle vier Rauigkeitsklassen nahezu identisch war. Die Zunahme der Rückstreuung betrug für alle vier Regressionsmodelle zwischen 0,23 bis 0,30 dB/Vol.-% und war in einem Wertebereich von 10 bis 45% volumetrischer Feuchte gültig. Dabei lag der Standardfehler bei der Bestimmung der Bodenfeuchte bei ca. 5,5 Vol.-%.

Da das gemessene Signal über die Bodenfeuchte hinaus von weiteren Faktoren, wie der Ausrichtung periodischer Anbaureihen gegenüber dem Sensor, dem Relief bzw. lokalen Einfallswinkel und der Bodenart abhängt, wurden entsprechende Korrekturen durchgeführt bzw. Randbedingungen definiert. Der Reliefeinfluß konnte durch eine Erweiterung des Regressionsmodells in Form einer Cosinusfunktion kompensiert werden. Als unproblematisch erwies sich auch der allgemein geringe Einfluß der Bodenart auf das Rückstreusignal. Der Effekt der Reihenrichtung wirkt sich hingegen deutlich auf das Rückstreusignal aus. Insbesondere bei Kartoffelschlägen erhöht sich die Rückstreuung überproportional, wenn der Radarstrahl zwischen 50 und 90° auf die Dämme trifft. Da die Information über die bevorzugte Anbaurichtung nur vage aus der Schlaggeometrie abgeleitet werden kann, stellt die Abhängigkeit der Rückstreuung von der Reihenrichtung einen schwer zu modellierenden Störeffekt im Rahmen der radargestützten Bodenfeuchterfassung dar.

Die gefundenen Beziehungen zwischen Bodenfeuchte und Radarrückstreuung für unterschiedliche Oberflächen lassen sich - unter Berücksichtigung der oben genannten Einschränkungen - dazu benutzen, räumliche Bodenfeuchteverteilungen zu bestimmen und der Verteilung der Bodeneinheiten bzw. der Substrate gegenüberzustellen. Am Beispiel der Bodenfeuchteverteilung vom 07.03.1998 bildete sich die Inhomogenität der schlagbezogenen Bodenfeuchte auf kleinstem Raum deutlich ab und korrespondierte eng mit dem Verteilungsmuster der Bodensubstrate und ihrer hydrologischen Eigenschaften.

Die zeitlich und räumlich sehr variable (oberflächennahe) Bodenfeuchte, die als Steuerungsgröße zahlreicher Interaktionen zwischen Atmosphäre und Geosphäre von großer Bedeutung ist, kann mit konventionellen Methoden, auch mit sehr hohem Meßaufwand, nur ungenügend erfaßt werden. Dies trifft auch auf die Methoden der Radarfernerkundung zu, sofern zur Bodenfeuchteerfassung die zur Zeit verfügbaren operationellen Radarsatelliten (ERS-2, RADARSAT und JERS-1) eingesetzt werden. Zukünftige Forschungsaktivitäten, gekoppelt an eine technische Weiterentwicklung von mehrkanaligen Radarsystemen, sollten darauf ausgerichtet sein, auf Basis multifrequenter und/oder multipolarisierter SAR-Daten robuste Algorithmen zur Bodenfeuchteerfassung zu entwickeln. Mit der Einführung des multipolarisierten ASAR an Bord des geplanten ENVISAT-1 werden sich daher in Zukunft die Beziehungen zwischen Signal und Bodenfeuchte in hohem Maß stabilisieren. Insbesondere mit Hilfe von Phasenverhältnissen zwischen HH- und VV-Kanälen wird eine unabhängige Erfassung von Bodenfeuchte und -rauigkeit möglich sein (DUBOIS et al. 1995; ULABY 1998).

Die Realisierung eines effektiven Bodenfeuchtemonitorings, auch auf Basis monofrequenter, einfachpolarisierter SAR-Beobachtungen, würde eine deutliche Verkürzung der Repetitionsrate auf 2 bis 3 Tage voraussetzen. Eine solche zeitliche Auflösung entspräche auch den typischen natürlichen Zyklen signifikanter Bodenfeuchteänderungen in Mitteleuropa und würde darüber hinaus Anwendungspotentiale im Bereich der Bewässerungsplanung, der Hochwasservorhersage, der Grundwasserneubildung und der Modellierung des Pflanzenwachstums erschließen, für die nahezu tägliche Bodenfeuchteinformationen benötigt werden.

Bei der **Ableitung biophysikalischer Parameter** aus ERS SAR-Daten standen die ertragsindikativen Parameter Frisch- (bzw. Bio-) und Trockenmasse sowie die absolute Wassermenge pro m² von Kulturpflanzenbeständen im Mittelpunkt des Interesses. Analog zur Bodenfeuchte erfolgte auch die Ableitung der biophysikalischen Zielparameter durch die Invertierung einfacher Regressionsmodelle auf der Basis einer breiten Ground Truth Datengrundlage. Multiple Regressionsmodelle erwiesen sich aufgrund mangelnder Robustheit bezüglich ihrer Parameterzusammensetzung als weniger geeignet.

Die Ergebnisse der einfachen Regressionsanalysen ergaben signifikante Zusammenhänge mit Korrelationskoeffizienten von 0,75 bis 0,90 zwischen den oben genannten Pflanzenparametern und der Radarrückstreuung für die Fruchtarten Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste und Raps, sofern nur Wertepaare berücksichtigt wurden, die sich auf ein Zeitintervall zwischen der Blattentwicklung und der Entwicklung vegetativer Pflanzenteile

(Ährenschieben bei Getreide) bezogen. Eine mögliche Ursache dafür ist die starke Sensitivität der Rückstreuung im C_{vv} -Band gegenüber der Orientierung und Geometrie der Ähren (SAICH et al. 1998). Daß sich die Pflanzen- und Biomasseentwicklung von Hackfrüchten - mit überwiegend planophiler Blatorientierung - nicht so deutlich im Radarsignal niederschlägt wie bei Getreide, kann auf den starken Einfluß der Blätter bzw. die geringe die Eindringtiefe vertikal polarisierter Radarstrahlung in den Bestand zurückgeführt werden.

Eine Sonderstellung im Rahmen der Zustandsbeschreibung von Vegetationsbeständen nehmen die Ergebnisse zur Wuchshöhenbestimmung mit Hilfe der interferometrischen Kohärenz ein, da sie regelmäßig verfügbare interferometrische Bildpaare mit kurzem zeitlichen Abständen zwischen den Aufnahmen voraussetzen, die zur Zeit kein operationelles Radarsystem ermöglicht. Anhand einer drei Bildpaare umfassenden Zeitreihe von März bis Juni 1996 konnte beispielhaft gezeigt werden, daß mit zunehmender Pflanzenwuchshöhe der oben erwähnten Hauptfruchtarten die aus den ERS-1/-2 Tandem-Bildpaaren berechnete interferometrische Kohärenz abnimmt. Die Bestimmtheitsmaße dieser Zusammenhänge bewegen sich dabei zwischen 0,90 und 0,96.

Die unter oben genannten Einschränkungen mögliche Abschätzung der Biomasse aus dem Radarsignal kann zur Verbesserung von Pflanzenwachstumsmodellen genutzt werden und somit die Genauigkeit von Ernteertragsschätzung für die genannten Getreide steigern. Eine direkte, ausschließlich auf ERS-Daten basierende Ertragsabschätzung ist nicht möglich, da nach dem Ährenschieben keine eindeutige Beziehung zwischen ertragsindikativen Bestandesparametern und der Radarrückstreuung nachweisbar ist. Für die anderen untersuchten Fruchtarten wie Mais, Kartoffel und Zuckerrübe ist mit ERS-Daten keine Zustandsbeschreibung möglich. Hier versprechen zukünftige Systeme unter Verwendung eines zusätzlichen L-Bandes bessere Resultate, was u.a. mit SIR-C/X SAR Daten bereits demonstriert wurde (SAICH et al.1995).

Die in dieser Arbeit dargestellten, nicht immer positiven Ergebnisse zum Nutzungspotential von ERS-1/-2 SAR-Daten für landwirtschaftliche Anwendungen sind in erster Linie auf die Einschränkung auf eine Wellenlänge, eine Polarisationsart und eine feste Aufnahmegeometrie zurückzuführen. Daß das Potential der Radarfernerkundung damit bei weitem nicht ausgeschöpft ist, zeigen Untersuchungen mit multifrequenten und/oder multipolarisierten Experimentaldaten. Erst durch den Einsatz solcher Radarsysteme wird die zuverlässigere Erfassung von Parametern wie Biomasse, Bodenfeuchte und eine differenziertere, genauere Fruchtartenklassifizierung möglich sein. Darüber hinaus würde eine substantielle zeitliche Verdichtung der Aufnahmetermine das Anwendungspotential für eine aktuelle Zustandserfassung von Beständen und Bodeneigenschaften im Rahmen eines kontinuierlichen Agrarmonitorings deutlich erhöhen.

Um die Vorzüge der Radarfernerkundung, nämlich ihre weitgehende Wetterunabhängigkeit, auch für die teilschlagspezifische, GPS-gestützte Bewirtschaftung (*precision farming*) nutzbar zu machen, bedarf es neben einer verbesserten Sensorkonfiguration zukünftiger Systeme auch einer deutlichen Verbesserung der geometrischen Auflösung.

12 Literatur

- AG BODEN (1994): *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 4. Auflage, 1994, Hannover.
- ALTESE, E., BOLOGNANI, O., MANCINI M. & P. A. TROCH (1996): Retrieving soil moisture over bare soil from ERS-1 synthetic aperture radar data: Sensitivity analysis based on a theoretical surface scattering model and field data, *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 3, pp. 653-661, 1996.
- ANG, W. & S. HOBBS (1997): Weather Effects on Radar Backscatter from Crops, *Proceedings of the 3rd ERS Symposium on Space at Service of our Environment*. ESA SP-414, pp. 311-315, Florence, March 1997.
- ATKINSON, P. (1985): Preliminary Results of the Effect of Resampling on Thematic Mapper Imagery, *ACSM-ASPRS Fall Convention Technical Papers*, pp. 929-936, 1985.
- ATTEMA, E. & F. T. ULABY (1978): Vegetation modeled as a water cloud, *Radio Science*, Vol. 13, No. 7, pp. 357-364, March 1978.
- ATTEMA, E., KOOPMAN, R. M. & G. LEVRINI (1999): The Envisat Geophysical Validation Programme, *Proceedings IGARSS'99 Remote Sensing of the Earth – A Challenge for the 21st Century*, Hamburg, 28.06.-02.07.1999.
- AUQUIERE, E. & P. DEFOUNY (1997): ERS SAR Time Series for Maize Monitoring using Experimental and Modeling Approaches, *Proceedings of the 3rd ERS Symposium on Space at Service of our Environment*, ESA SP-414, pp. 147-152, Florence, March 1997.
- AUQUIERE, E., BLAES, X. & P. DEFOUNY (1998): Crop Growth Monitoring by SAR Time Series: Canopy Closing Date Detection for Maize and Sugar Beet, *Proceedings of the 2nd Intern. Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*, ESA/ESTEC, pp. 169-173, Noordwijk, Oct. 1998.
- AURICH, V. & J. WEULE (1995): Non-Linear Gaussian Filters Performing Edge Preserving Diffusion, *17. DAGM-Symposium - Mustererkennung*, G. SAGERER, S. POSCH, & F. KUMMERT (eds.), pp. 538-545, Springer Verlag, Berlin 1995.
- BAATZ, M. (1999): Object Oriented and Multi Scale Image Analysis in Semantic Networks, Delphi2 Creative Technologies™, Unveröff. Manuskript.
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W. & R. WEIBER (1994): *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*, 7. Auflage, Springer Verlag, 1994.
- BÄHR, H.-P. & T. VÖGTLE (1998): *Digitale Bildverarbeitung. Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung*, 3. Aufl., Wichmann, 1998.
- BAEUMER, K. (1994): Möglichkeiten und Grenzen der Gestaltung von Bodennutzungssystemen im Hinblick auf die vermehrte Nutzung von Selbstregulationsmechanismen im Agrarökosystem. *Berichte über Landwirtschaft*, Neue Folge, Band 7, 209. Sonderheft, pp. 102-122.

- BAN, Y. & P. J. HOWARTH (1997): Orbital effects on ERS-1 SAR temporal backscatter profiles of agricultural crop, *Proceedings of the 3rd ERS Symposium on Space at Service of our Environment*, ESA SP-414, Florence, March 1997.
- BAN, Y. & P. J. HOWARTH (1999): Multitemporal ERS-1 SAR Data for Crop Classification: A Sequential-Masking Approach, Review-Manuskript zur geplanten Veröffentlichung im *Canadian Journal of Remote Sensing*.
- Bayerischer Klimaforschungsverbund (1996): *Klimaatlas von Bayern*, 1996, München.
- BEAUDOIN, A., GWYN, Q. & T. LE TOAN (1989): C-Band Backscatter Sensitivity to Multi-Scale Geometry and Soil Moisture Variability of Agricultural Surfaces, *Proceedings IGARSS '89 -- Quantitative Remote Sensing: An Economic Tool for the Nineties*, G. TOMLINS (eds.), Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE No. 89CH2768-0, pp. 2116-2121, Juli 1989.
- BEAUDOIN, A., LE TOAN, T. & Q. GWYN (1990): SAR Observations and Modeling of the C-Band Backscatter Variability Due to Multiscale Geometry and Soil Moisture, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, No. 5, pp. 886-895, Sept. 1990.
- BENALLEGUE, M., TACONET, O., VIDAL-MADJAR, D. & M. NORMAND (1995): The Use of Radar Backscattering Signals for Measuring Soil Moisture and Surface Roughness, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 53, pp. 61-68, 1995.
- BENEDIKTSSON, J. A., SWAIN, P. H. & O. K. ERSOY (1990): Neuronal network approaches versus statistical methods in classification of multisource remote sensing data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, pp. 540-551.
- BÖRNER, T. (1998): Coherent Modeling of Vegetation for Polarimetric SAR Interferometry Applications, *Proceedings of the 2nd Intern. Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*. ESA/ESTEC, pp. 93-98, Oct. 1998, Noordwijk.
- BORGEAUD, M., ATTEMA, E., SALGADO-GISPERT, G., BELLINI, A. & J. NOLL (1995): Analysis of bare soil surface roughness parameters with ERS-1 SAR data, *Symposium on the extraction of bio- and geophysical parameters from SAR data for land applications*, pp. 307-316, Toulouse, Oct. 1995.
- BORGEAUD, M. & A. BELLINI (1998): A Database for Electromagnetic Scattering Studies of Bare Soil Surfaces, *Proceedings IGARSS '98 -- Sensing and Managing the Environment*, Vol. 3, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., pp. 1197-1199, Juli 1998.
- BORGEAUD, M. & P. SAICH (1999): Status of the Retrieval of Bio- and Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications, *Proceedings IGARSS'99 Remote Sensing of the Earth – A Challenge for the 21st Century*, Vol. IV, Hamburg, 28.06.-02.07.1999.

- BOUMAN, B. (1992): Growth models to simulate crop growth, optical reflectance and radar backscatter of sugar beet and winter wheat, calibrated for Flevoland, CABO-DLO, Report 163, Wageningen, The Netherlands, 1992.
- BRISCO, B. & R. J. BROWN (1995): Multidate SAR/TM synergism for crop classification in western Canada, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 61, No. 8, pp.1009-1014.
- BROWN, R. J., BEDARD, BRISCO, B. & NAUNHEIMER (1993): Crop discrimination using multi-temporal ERS-1 SAR data, *Proceedings of the 2nd ERS-1 Symposium*. ESA SP361, pp. 57-62, 1993.
- BRUCKLER, L., WITONO, H. & P. STENDEL (1988): Near Surface Soil Moisture Estimation from Microwave Measurements, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 26, pp. 101-121, 1988.
- BRUCKLER, L. & H. WITONO (1989): Use of Remotely Sensed Soil Moisture Content as Boundary Conditions in Soil-Atmosphere Water Transport Modeling 2. Estimating Soil Water Balance, *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 12, pp. 2437-2447, Dec. 1989.
- BURROUGH, P. A. & R. A. MCDONNELL (1998): Principles of Geographical Information Systems, Spatial Information Systems and Geostatistics, Oxford University Press, New York, 1998.
- CARL, S. (1996): Klassifikation landwirtschaftlicher Kulturen aus ERS-1 SAR Satellitendaten mit Hilfe Neuronaler Netze, *Dissertation TU München-Weihenstephan*, 1996.
- CHAMPION, I. (1996): Simple modelling of radar backscattering coefficient over a bare soil: variation with incidence angle, frequency and polarization, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 17, No. 4, pp. 783-800, 1996.
- CHAUHAN, N. S. & R. H. LANG (1989): Polarisation Utilisation in the Microwave Inversion of Leaf Angle Distribution, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 27, pp. 395-402, 1989.
- CHAUHAN, N. S. (1995): Microwave inversion of root mean square height from vegetated fields: a dual frequency technique, *Int. J. of Remote Sensing*, Vol. 16, No. 18, pp. 3555-3567, 1995.
- CHEN, K., YEN, S. & W. HUANG (1995): A Simple Model for Retrieving Bare Soil Moisture from Radar-Scattering Coefficients, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 54, pp. 121-126, 1995.
- COLPITTS, B. G. (1998): The Integral Equation Model and Surface Roughness Signatures in Soil Moisture and Tillage Type Determination, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 36, No. 3, pp. 833-837, Mai 1998.
- COOKMARTIN, G., SAICH, P., QUEGAN, S., CORDEY, R., BURGESS-ALLEN, P. & A. SOWTER (1998): Using Backscatter Models to Define the Limits of Crop Information

Recovery from SAR Data, *Proceedings of the 2nd Intern. Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*. ESA/ESTEC, pp. 107-114, Noordwijk, Oct. 1998.

- DAVIDSON, M., LE TOAN, T., MATTIA, F., MANNINEN, T., BORDERIES, P., CHENERIE, I. & M. BORGEAUD (1998): A validation of multi-scale surface roughness description for the modelling of radar backscattering from bare soil surfaces, *Proceedings of the 2nd Intern. Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*. ESA/ESTEC, pp. 395-400, Noordwijk, Oct. 1998.
- DELINCE, J., GALLEGU, F. J. & J. C. TAYLOR (1994): Des inventaires regionaux au controle de la reforme de la Politique Agricole Commune, *Proceedings of the 1993 Conference on the MARS Project*, pp. 93-104, Ispra, 1994.
- DEMIRCAN, A. (1995): Die Nutzung fernerkundlich bestimmter Pflanzenparameter zur flächenhaften Modellierung von Ertragsbildung und Verdunstung, *Münchener Geogr. Abhandlungen*, Reihe B, Band b 20, Geobuch-Verlag, München, 1995.
- DEROIN, J.-P., COMPANY, A. & A. SIMONIN (1997): An Empirical Model for Interpreting the Relationship Between Backscattering and Arid Land Surface Roughness as Seen with the SAR, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, No. 1, pp. 86-91, Jan. 1997.
- Deutscher Wetterdienst: Klimawerte der Bundesrepublik Deutschland, Selbstverlag, div. Erscheinungsjahre, Offenbach.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (1997): DIN 18716-3. Photogrammetrie und Fernerkundung, Teil 3: Begriffe der Fernerkundung, pp. 416-430, 1997.
- DOBSON, M. C., ULABY, F. T., HALLIKAINEN, M. T. & M. A. EL-RAYES (1985): Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil – Part II: Dielectric Mixing Models, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-23, No. 1, pp. 35-46, 1985.
- DOBSON, M. C. & F. T. ULABY (1986): Active Microwave Soil Moisture Research, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-24, No. 1, pp. 23-36, 1986.
- DOBSON, M. C., PIERCE, K., McDONALD, K. & T. SHARIK (1991): Seasonal change in radar backscatter from mixed conifer and hardwood forest in Northern Michigan, *Proceedings IGARSS'91*, pp. 1121-1124, Helsinki, 1991.
- DOBSON, M. C., PIERCE, L., SARABANDI, K., ULABY, F. T. & T. SHARIK (1992): Preliminary Analysis of ERS-1 SAR for Forest Ecosystem Studies, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, No. 2, pp. 203-211, March 1992.
- DOBSON, M. C., ULABY, F. T. & L. E. PIERCE (1995): Land-Cover Classification and Estimation of Terrain Attributes Using Synthetic Aperture Radar, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 51, pp. 199-214, 1995.

- DU, Y, ULABY, F. T. & M. C. DOBSON (1999): Sensitivity to Soil Moisture by Active and Passive Microwave Sensors, *Proceedings IGARSS'99 Remote Sensing of the Earth - A Challenge for the 21st Century*, Vol. IV, Hamburg, 28.06.-02.07.1999.
- DUBOIS, P. C., VAN ZYL, J. & T. ENGMAN (1995) : Measuring Soil Moisture with Imaging Radars, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 33, No. 4, pp. 915-918, July 1995.
- DUDA, R. O. & P. E. HART (1973): Pattern Classification and Scene Analysis, Wiley, New York, 1973.
- ELACHI, C. (1988): Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques, *IEEE Press*, New York, 1988.
- ENGDAHL, M. & M. BORGEAUD (1998): ERS-1/-2 Tandem Interferometry Coherence and Agricultural Crop Height, *Proceedings of the 2nd Intern. Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*. ESA/ESTEC, pp. 121-127, Oct. 1998, Noordwijk.
- ENGMAN, E. T. & N. CHAUHAN (1995): Status of Microwave Soil Moisture Measurements with Remote Sensing, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 51, pp. 189-198, 1995.
- ERDAS Field Guide (1994): Third Edition. Revised and Expanded. ERDAS Inc., Atlanta, GA.
- EVANS, D. L. (1992): Current status and future developments in radar remote sensing, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 47, pp. 79-99, 1992.
- EVANS, D. L., FARR, T. G. & J. VAN ZYL (1992): Estimates of Surface Roughness Derived from Synthetic Aperture Radard (SAR) Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, No. 2, pp. 382-389, March 1992.
- FETZER, K. D., GROTTENTHALER, W., HOFMANN, B., JERZ, H., RÜCKERT, G., SCHMIDT, F. & O. WITTMANN (1986): Erläuterungen zur Standortkundlichen Bodenkarte von Bayern 1 : 50000, München-Augsburg und Umgebung, *Bayerisches Geologisches Landesamt*, München, 1986.
- FOODY, G. M., MCCULLOCH, M. B. & W. B. YATES (1994): Crop classification from C-band polarimetric radar data, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 15, No. 14, pp. 2871-2885.
- FUNG, A. K., LI, Z. & K. CHEN (1992): Backscattering from a Randomly Rough Dielectric Surface, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, No. 2, pp. 356-369, March 1992.
- FUNG, A. K., DAWSON, M. S., CHEN, K. S., HSU, A. Y., ENGMAN, E. T., O'NEILL, P. O. & J. WANG (1996): A modified IEM Model for Scattering from Soil Surfaces with Application to Soil Moisture Sensing, *Proceedings IGARSS '96*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., pp. 1297-1299, July 1996.
- GEUDTNER, D. (1995): Die interferometrische Verarbeitung von SAR-Daten des ERS-1, Dissertation Universität Stuttgart, *DLR-Forschungsbericht*, pp. 95-28, 1995.

- GIACOMELLI, A., BACCHIEGA, U., TROCH, P. A. & M. MANCINI (1995): Evaluation of surface soil moisture distribution by means of SAR remote sensing techniques and conceptual hydrological modelling, *Journal of hydrology*, Vol. 166, pp. 445-459, 1995.
- GNOSA, T. (1997): Radarfernerkundung landwirtschaftlich genutzter Flächen-Scatterometermessungen an Winterweizen- und Zuckerrübenbeständen, *Dissertation*, Universität Bonn, 1997.
- GODDING, R., DOCKTER, K., KUPFER, G. & W. KÜHBAUCH (1989): Eignung von SAR-Daten zur Gewinnung von Agrarinformationen, *GIS*, Jhg. 2, Nr. 2, pp. 23-28, 1989.
- GÜNZL, M. H. & O. HELLWICH (2000): A new segment shape parameter for grid data and its application to land use segments, *ISPRS*, Vol. XXXIII, Amsterdam, 2000.
- HAACK, B. & M. BECHDOL (2000): Integrating multisensor data and radar texture measures for land cover mapping, *Computers & Geosciences*, Vol. 26, pp. 411-421, 2000.
- HAACK, B., HEROLD, N. D. & M. BECHDOL (2000): Radar and Optical Data Integration for Land Use / Land Cover Mapping, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 66, No. 6, pp. 706-716.
- HÄCKEL, H. & J. WINKLER (1985): Über den mittleren Jahresablauf landwirtschaftlich wichtiger Witterungsfaktoren, *Bayer. Landw. Jb.*, Nr. 62, 438-492, April 1985.
- HABERMEYER M. (1999): Optimization of Multi-Channel SAR Data Classification using Genetic Algorithms, *Proceedings IGARSS'99 Remote Sensing of the Earth - A Challenge for the 21st Century*, Vol. IV, Hamburg, 28.06.-02.07.1999.
- HALLIKAINEN, M. T., ULABY, F. T., DOBSON, M. C., EL-RAYES, M. A. & L.-K. WU (1985): Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil Part I: Empirical Models and Experimental Observations, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-23, No. 1, pp. 25-34, Jan. 1985.
- HEATH, M., SARKAR, S., SANOCKI, T. & K. BOWYERT (1998): Comparison of Edge Detectors. A Methodology and Initial Study, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 69, No. 1, pp. 38-54, 1998.
- HEINE, G. W. (1986): A controlled Study of some Two-Dimensional Interpolation Methods, *COGS Computer Contributions*, Vol. 2, No. 2, pp. 60-72, Aug. 1986.
- HERTZ, J. A., PALMER, R. G. & S. A. KROGH (1991): Introduction to the theory of neuronal computing, Addison-Wesley, Redwood City, 1991.
- HOBBS, S. E., WENG, A. & C. SEYNAT (1998): Wind and Rain Effects on SAR Backscatter from Crops, *Proceedings of the 2nd Intern. Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*. ESA/ESTEC, pp. 185-189, Noordwijk, Oct. 1998.
- HOEBEN, R. & P. A. TROCH (1998): Development and Testing of a Soil Moisture Inversion Algorithm Based on Hydrological Modeling and Remote Sensing Through Advanced

- Filtering Techniques, *Proceedings of the 2nd Intern. Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*. ESA/ESTEC, pp. 431-438, Noordwijk, Oct. 1998.
- HOLECZ, F. (1993): Postprocessing von SAR-Satellitenbilddaten, *Remote Sensing Series*, Vol. 23, Remote Sensing Laboratories, Dep. of Geography, University of Zürich, 1993.
- HUBER, R. & L. V. DUTRA (1998): Feature selection for ERS-1/-2 InSAR Classification: High Dimensionality Case, *Proceedings IGARSS'98*, Vol. 3, pp. 1605-1607, Seattle, July 1998.
- HUSSEY, G., SOFKO, G., BRISCO, B., KOEHLER, J. & M. MCKIBBEN (1989): The Effect of Agricultural Parameters on Radar Cross-Section: A Linear Regression Model, *IGARSS'89 -- Quantitative Remote Sensing: An Economic Tool for the Nineties*, G. TOMLINS (eds.), Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE No. 89CH2768-0, pp. 2112-2115, July 1989.
- ISAAKS, E. H. & R. M. SRIVASTAVA (1989): An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, 1989.
- ISHIMARU, A. (1978): Wave propagation and scattering in random media, Vol. 1 und Vol. 2, Academic Press, New York, 1978.
- JACKSON, T., MCNAIRN, H., WELTZ, M., BRISCO, B. & R. BROWN (1997): First Order Surface Roughness Correction of Active Microwave Observations for Estimating Soil Moisture, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, No. 4, pp. 1065-1069, July 1997.
- JUST, D. & R. BAMLER (1994): Phase Statistics of Interferograms with Application to Synthetic Aperture Radar, *Appl. Opt.*, Vol. 33, No. 20, pp. 4361-4368.
- KARAM, M. A. & A. K. FUNG (1983): Scattering from Randomly Orientated Circular Disks with Application to Vegetation, *Radio Science*, Vol. 18, pp. 557-565, 1983.
- KARAM, M. A., FUNG, A. K., LANG, R. H. & N. S. CHAUHAN (1992): A Microwave Scattering Model for Layered Media, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, pp. 767-784, 1992.
- KASISCHKE, E. S., MELACK, J. M. & M. C. DOBSON (1997): The use of Imaging Radars for Ecological Applications – A Review, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 59, pp. 141-156, 1997.
- KÖPPEN, W. & R. GEIGER (1961): Die Klimate der Erde, Verlag Pertes, Darmstadt, 1961.
- KELLNDORFER, J. M., PIERCE, L. E., DOBSON, M. C. & F. T. ULABY (1998a): Toward Consistent Regional-to-Global-Scale Vegetation Characterization Using Orbital SAR Systems, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 36, No. 5, pp. 1396-1411, Sept. 1998.

- KELLNDORFER, J. M., XIE, H., ULABY, F. T. & M. C. DOBSON (1998b): Combined Multi-Temporal ERS-1/JERS-1 Imagery for Land-Cover Classification, *Proceedings IGARSS'98*, Vol. 3, pp. 1714-1716, Seattle, July 1998.
- Klimaatlas von Bayern (1996). Hrsg.: Bayerischer Klimaforschungsverbund München.
- KING, C. & J. MEYER-ROUX (1990): Remote Sensing in Agriculture: From Research to Application, STEVEN, M. D. & J. A. CLARK (Eds.): Application of remote sensing in agriculture, pp. 377-395, Butterworth, London, 1990.
- KLAASSEN, W., VAN DER LINDEN, M. & A. BALLAST (1997): SAR Sensing of Vegetation Wetness: First results, *Proceedings of the 3rd ERS Symposium on Space at Service of our Environment*. ESA SP-414, pp. 103-106, Florence, March 1997.
- Kommission der EWG (1992): Durchführungsbestimmung zum integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem für bestimmte gemeinschaftliche Beihilferegelungen, Verordnung (EWG) Nr. 3887/92 der Kommission, 23.12.1992.
- KRÄTZSCHMAR, E. & M. HELLMANN (1999): Informationsgehalt von SAR-Daten unterschiedlicher Trägerplattformen für kartographische Anwendungen, *Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*, Band 7, pp. 399-407, 1999.
- KÜHBAUCH W., HAWLITSCHKA, S. & M. HAMACHER (1998): Zwischenbericht zum Verbundvorhaben 95HS017: EMAP – Landnutzungsinventuren mit ERS-1/-2 Radarfernerkundung, Unveröffentl. Zwischenbericht, Bonn, Okt. 1998.
- KÜHBAUCH, W., HAWLITSCHKA, S., HAMACHER, M., HAGEMEISTER, A., GÜNZL, M. H., WEISE, K., REICH, M. & S. GÜTH (1999): Endbericht zum Verbundvorhaben EMAP - Landnutzungsinventuren mit ERS-1/-2 Radarfernerkundung. Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten (95HS017), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (50EE9613), Bonn, Nov. 1999.
- KUMAR, M. (1988): World Geodetic System 1984: A Modern and Accurate Global Reference Frame, *Marine Geodesy*, Vol. 12, pp. 117-127, 1988.
- KUPLICH, T. M., FREITAS, C. C. & J. V. SOARES (2000): The study of ERS-1 SAR and Landsat TM synergism for land use classification, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 21, No. 10, pp. 2101-2111, 2000.
- KUROSU, T., URATSUKA, S., MAENO, H. & T. KOZU (1999): Texture Statistics for Classification of Land Use with Multitemporal JERS-1 SAR Single-Look Imagery, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 37, No. 1, pp. 227-234, 1999.
- LANG, R. H. & J. S. SIDHU (1983): Electromagnetic Backscattering from a Layer of Vegetation: A Discrete Approach, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 21, pp. 62-71, 1983.
- LAUR, H., BALLY, P., MEADOWS, P., SANCHEZ, J., SCHAETTLER, B., LOPINTO, E. & D. ESTEBAN (1998): ERS SAR Calibration - Derivation of the Backscattering coefficient

- σ^0 in ESA ERS SAR PRI Products, *ESA ES-TN-RS-PM-HL09 2*, Rev. 5b, Sept. 1998.
- LEMOINE, G., KIDDS, R. & H. VAN LEEUWEN (1997): Methodological Advancements in Using ERS SAR Data for Crop Area Estimation, *Proceedings of the 3rd ERS Symposium on Space at Service of our Environment*. ESA SP-414, pp. 125-130, Florence, March 1997.
- LEMOINE, G. & R. KIDDS (1998): A Knowledge Steered Stratified Classification Approach for ERS SAR Data Used in an Agricultural Area Estimation, *Proceedings IGARSS'98 Sensing and Managing the Environment*, Vol. IV, pp. 1825-1827., Seattle, July 1998.
- LE TOAN, T., DAVIDSON, M., BORDERIES, P., CHENERIE, I., MATTIA, F., MANNINEN, T. & M. BORGEAUD (1998): Improved Observation and Modelling of Bare Soil Surfaces for Soil Moisture Retrieval, *Proceedings of the 2nd Intern. Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*. ESA/ESTEC, pp. 389-394, Noordwijk, Oct. 1998.
- LILLESAND, T. M. & R. W. KIEFER (1994): Remote Sensing and Image Interpretation, 3rd Edition, New York, 1994.
- MANNINEN, T., RANTASUO, M., LE TOAN, T., DAVIDSON, M., MATTIA, F. & M. BORGEAUD (1998): Multiscale Surface Roughness of Bare Soil, *Proceedings IGARSS'98 -- Sensing and Managing the Environment*, Vol. 3, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., pp. 1203-1206, July 1998.
- MARTONNE, E. DE & M. FAYOL (1935): Sur la formule de l'indice d'aridité, *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris*, 200: 1166-1168, Paris, 1935.
- MATTIA, F., LE TOAN, T., DAVIDSON, M., MANNINEN, T., BORDERIES, P. & M. BORGEAUD (1998): On the assessment of relevant roughness parameters for microwave remote sensing, *Proceedings IGARSS'98 -- Sensing and Managing the Environment*, Vol. 3, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., pp. 1210-1212, Juli 1998.
- MATTIKALLI, N., ENGMAN, E., AHUJA, L. & T. JACKSON (1998): Microwave remote sensing of soil moisture for estimation of profile soil property, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 19, No. 9, pp. 1751-1767, 1998.
- MCCULLOCH, W. S. & W. PITTS (1943): A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5, pp. 115-133.
- MEADOWS, P. J. & H. LAUR (1998): Exploitation of ERS SAR Imagery For Land Applications, *Proceedings of the 2nd Intern. Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*. ESA/ESTEC, pp. 43-50, Noordwijk, Oct. 1998.

- MO, T., SCHMUGGE, T. J. & T. J. JACKSON (1984): Calculations of radar backscattering coefficient of vegetation covered soils, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 15, pp. 119-133, 1984.
- MORRISON, K., COOKMARTIN, G., BENNETT, J. C. & S. QUEGAN (1998): The Effect of Wind Motion on Cereal Crops, *Proceedings IGARSS'98*, Vol. 4, pp. 2071-2073, Seattle, July 1998.
- OH, Y., SARABANDI, K. & F. T. ULABY (1992): An Empirical Model and an Inversion Technique for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, No. 2, pp. 370-381, March 1992.
- OH, Y. & Y. C. KAY (1998): Condition for Precise Measurement of Soil Surface Roughness, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 36, No. 2, pp. 691-695, March 1998.
- OLIVER, C. & S. QUEGAN (1998): Understanding Synthetic Aperture Radar Images, Artech House, Boston, London, 1998.
- OLIVER, M. A. & R. WEBSTER (1990): Kriging: a method of interpolation for geographical information systems, *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 313-332, 1990.
- PIERCE, L., XIE, H., DOBSON, M. C. & F. T. ULABY (1998a): Texture Features for Classification with ERS/JERS Composites, *Proceedings IGARSS'98*, Vol. 1, pp. 348-350, Seattle, July 1998.
- PIERCE, L. SAMPLES, G., DOBSON, M. C. & F. T. ULABY (1998b): An Automated Unsupervised/ Supervised Classification Methodology, *Proceedings IGARSS'98*, Vol. 4, pp. 1781-1783, Seattle, July 1998.
- PREVOT, L., DECHAMBRE, M., TACONET, O., VIDAL-MADJAR, D., NORMAND, M. & S. GALLE (1993): Estimating the characteristics of vegetation canopies with airborne radar measurements, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 14, No. 15, pp. 2803-2818, 1993.
- PULLIAINEN, J. T., MIKKELÄ, P. J., HALLIKAINEN, M. T. & J. P. IKONEN (1996): Seasonal dynamics of C-band backscatter of boreal forests with applications to biomass and soil moisture estimation, *IEEE Trans. Geo. Rem. Sens.*, Vol. 34, pp. 758-770, 1996.
- QUEGAN, S., CAVES R. G. & R. G. WHITE (1993): The structural content of ERS-1 images and its implications, *Proceedings of the 2nd ERS-1 Symp.*, ESA SP-361, Vol. 2, pp. 623-628, Hamburg, 1993.
- RELIN, A. (1996): Kontrolle flächengestützter Beihilfen in der Landwirtschaft durch Satellitenfernerkundung. *Dissertation, Technische Universität München*, 1996.
- REMONDIERE, S. & H. LAUR (1998): The use of ERS SAR data for land applications: an overview of ESA ERS Announcement of Opportunity achievements, *Proceedings of the 2nd Intern. Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*. ESA/ESTEC, pp. 27-33, Noordwijk, Oct. 1998.

- RITTER, H., MARTINETZ, T., & K. SCHULTEN (1990): Neuronale Netze, eine Einführung in die Neuroinformatik selbstorganisierender Netzwerke, Addison-Wesley Verlag, Bonn, 1990.
- ROTH, K., FLÜHLER, H. & W. ATTINGER (1989): TDR - Eine Methode zur Messung des volumetrischen Wassergehaltes, *Mitteil. des Fachbereichs Bodenphysik*, ETH Zürich.
- RUMMELHART, D., HINTON, G. & R. WILLIAMS (1986): Learning representations by Back-Propagating Errors, *Nature*, No. 323, pp. 533-536, 1986.
- SAICH, P. J., CORDEY, R. A., QUEGAN, S., WILLIAMS, M., BAKER, J. R., LUCKMAN, A., WIELOGORSKA, A. & M. G. WOODING (1995): SAR Retrieval Algorithms for Land Applications, *ESA Final Report*, Vol. 1-3, ESA Contract No: 10644/93/NL/NB, Nov. 1995.
- SAICH, P. J., CORDEY, R. A., COOKMARTIN, G., QUEGAN, S., BURGESS-ALLEN, P. & A. SOWTER (1998): Radiative Transfer Modelling of ERS SAR Signatures for Agricultural Crop Classification and Monitoring, *Proceedings IGARSS'98*, Vol. 4, pp. 1822-1824, Seattle, July 1998.
- SAICH, P. J. & M. BORGEAUD (1998): Interpreting Agricultural Crop Signatures from Flevoland, 1993-1996, *Proceedings of the 2nd Intern. Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*. ESA/ESTEC, pp. 175-184, Noordwijk, Oct. 1998.
- SAICH, P. J. & M. BORGEAUD (1999): The Inter-Year Stability of ERS Agricultural Crop Signatures (Flevoland 1993-1996), *Proceedings IGARSS'99 Remote Sensing of the Earth – A Challenge for the 21st Century*, Vol. IV, Hamburg, 28.06.-02.07.1999.
- SCHACHTSCHABEL P., BLUME, H.-P., BRÜMMER, G., HARTGE, K.-H., FISCHER, W. R., RENGER, M., STREBEL, O. & U. SCHWERTMANN (1992): Lehrbuch der Bodenkunde, 13. Auflage, Stuttgart, 1992.
- SCHMIDT, F., BÖHM, A., HAMMERL, J., HOFMANN, B., HOLZNER, G., JOCHUM, R., KELLER, X., MAHLER, C., MARTIN, W., PETSCHL, A., PRINZ, R., SCHILLING, B., SPIES, E.-D., STIMMELMEIER, G. & O. WITTMANN (1992): Die Böden Bayerns, *Bayerisches Geologisches Landesamt*, München, 1992.
- SCHMIDT, J., THIEL, K. H. & X. WU (1998): Programmentwicklung und Anwendung der SAR-Interferometrie, *Institut für Navigation, Universität Stuttgart*, Schlußbericht Projekt-Nr. 03PL016A DYPAG, Stuttgart, Juni 1998.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (1992): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler, 2. Auflage, Stuttgart, 1992.
- SCHOTTEN, C. G., VAN ROOIJ, W. & L. JANSSEN (1995): Assessment of capabilities of multitemporal ERS-1/SAR data to discriminate between agricultural crops, (accepted by *Int. J. of Remote Sensing*).

- SCHOUPS, G., TROCH, P. A. & N. VERHOEST (1998): Soil Moisture Influence on the Radar Backscattering of Sugar Beet Fields, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 65, pp. 184-194, 1998.
- SCHOWENGERDT, R. A. (1983): Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing, Academic, New York, 1983.
- SCHREIER, G. (1993): SAR Geocoding. Data and Systems, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1993.
- SCHWÄBISCH, M. (1995): Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemodelle. *Dissertation Universität Stuttgart, DLR-Forschungsbericht*, pp. 95-25, 1995.
- SEGL, K. (1996): Integration von Form- und Spektralmerkmalen durch künstliche neuronale Netze bei der Satellitenbildklassifizierung, *Deutsche Geodätische Kommission DGK, Reihe C, Nr. 468*, München, 1996.
- SEYNAT, C. & S. HOBBS (1998): Crop Parameter Retrieval with Multi-Temporal Coherence Images, *Proceedings of the 2nd Intern. Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*. ESA/ESTEC, pp. 191-196, Noordwijk, Oct. 1998.
- SHOSHANY, M., SVORAY, T., CURRAN, P. J., FOODY, G. M. & A. PEREVOLOTSKY (1998): ERS-2 SAR Soil Moisture and Herbaceous Biomass Monitoring across a semi-arid transect in Israel, *Proceedings of the 2nd Intern. Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*. ESA/ESTEC, pp. 455-459, Noordwijk, Oct. 1998.
- SHOSHANY, M., SVORAY, T., CURRAN, P. J., FOODY, G. M. & A. PEREVOLOTSKY (2000): The relationship between ERS-2 SAR backscatter and soil moisture: generalization from a humid to semi-arid transect, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 21., No. 11, pp. 2337-2343, 2000.
- SOARES, J. V., RENNO, C. D., FORMAGGIO, A. R., FREITAS, C. C. & A. C. FRERY (1997): An Investigation of the Selection of Texture Features for Crop Discrimination Using SAR Imagery, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 59, pp. 234-247, 1997.
- STAUB, R., BLEIHOLDER, H., BOOM, T. VAN DEN, BUHR, L., HACH, H., HEß, M., KLOSE, R., MEIER, U. & E. WEBER (1994): Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen. Erweiterte BBCH-Skala, *Biologische Bundesanstalt für Land- u. Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Industrieverband Agrar*, 1994.
- STEINBORN, W. & K. BARWINSKI (1995): Hochauflösende Satellitendaten in Kartographie und Geo-Informationssystemen, *Spektrum der Wissenschaft*, pp. 93-100, 1, 1995.

- SU, Z., TROCH, P. & F. DE TROCH (1997): Remote sensing of bare surface soil moisture using EMAC/ESAR data, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 18, No. 10, pp. 2105-2124, 1997.
- SUCHAIL, J.-L., BUCK, C., GUIJARRO, J. & R. TORRES (1999): The ENVISAT-1 Advanced Synthetic Aperture Radar Instrument, *Proceedings IGARSS'99 Remote Sensing of the Earth – A Challenge for the 21st Century*, Hamburg, 28.06.-02.07.1999.
- SVENDSEN, M. T. & K. SARABANDI (1998): Retrieval of Vegetation Parameters from SAR Data using a Coherent Scattering Model for Grassland, *Proceedings of the 2nd Intern. Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*. ESA/ESTEC, pp. 115-120, Noordwijk, Oct. 1998.
- TANSEY, K. J. & A. C. MILLINGTON (1997): Comparison of Modelled Backscatter Response and ERS-1 SAR Data for Desert Surfaces, the Eastern Badia of Jordan, *Proceedings of the 3rd ERS Symposium on Space at Service of our Environment*. ESA SP-414, pp. 21-26, Florence, March 1997.
- TOURE, A., THOMPSON, K., EDWARDS, G., BROWN, R. J. & B. G. BRISCO (1994): Adaption of MIMICS backscattering model to agricultural context – wheat and canola at L- and C-bands, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 32, No. 1, pp. 81-95, 1994.
- ULABY, F. T. & T. F. BUSH (1976): Monitoring wheat growth with radar, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 42, No. 4, pp. 557-568, 1976.
- ULABY, F. T., BATLIVALA, P. & M. C. DOBSON (1978): Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture: Part I - bare soil, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-19, pp. 62-69, 1978.
- ULABY, F. T. (1981): *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Vol I: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*, 1981.
- ULABY, F. T., MOORE, R. K. & A. K. FUNG (1982a): *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Vol. II, Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*, Artech House.
- ULABY, F. T., KOUYATE, F., FUNG, A. K. & A. J. SIEBER (1982b): A backscatter model for a randomly perturbed periodic surface, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-20, pp. 518-528, Oct. 1982.
- ULABY, F. T., ALLEN, C., EGER, G. & E. KANEMASU (1984): Relating the Microwave Backscattering Coefficient to Leaf Area Index, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 14, pp. 113-133, 1984.
- ULABY, F. T. & E. A. WILSON (1985): Microwave Attenuation Properties of Vegetation Canopies, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-23, No. 5, pp. 746-753, Sept. 1985.

- ULABY, F. T., MOORE, R. K. & A. K. FUNG (1986a): Microwave Remote Sensing. Active and Passive, Vol. III, From Theory to Applications, Artech House.
- ULABY, F. T., KOUYATE, F., BRISCO, B. & W. T. LEE (1986b): Textural Information in SAR Images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-24, No. 2, pp. 235-245, March 1986.
- ULABY, F. T., SARABANDI, K., McDONALD, K., WHITT, M. & M. C. DOBSON (1990): Michigan microwave canopy scattering model, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 11, No. 7, pp. 1223-1253, 1990.
- ULABY, F. T., DUBOIS, P. C. & J. VAN ZYL (1996): Radar mapping of surface soil moisture, *Journal of Hydrology*, Vol. 184, pp. 57-84, 1996.
- ULABY, F. T. (1998): SAR Biophysical Retrievals: Lessons Learned and Challenges to Overcome, *Proceedings of the 2nd Intern. Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*. ESA/ESTEC, pp. 19-25, Noordwijk, Oct. 1998.
- VAN DE STEENE, M. & J. DELINCE (1992): The Checking of Agricultural Areas which Benefit from Community Aid, *Proceedings of the 1991 Conference on the Application of Remote Sensing to Agricultural Statistics*, pp. 107-115, Ispra, 1992.
- VAREKAMP, C., SKIDMORE, A. K. & P. A. BURROUGH (1996): Spatial interpolation using public domain software, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 62, pp. 845-854, 1996.
- VOSSEN, P. & J. MEYER-ROUX (1994): The first phase of the MARS-Project, 1988-1993: Overview, methods and results, *Proceedings of the 1993 Conference on the MARS Project*, pp. 33-81, Ispra, 1994.
- WANG, J., HSU, A., SHI, J., O'NEILL, P. & E. ENGMAN (1997): A Comparison of Soil Moisture Retrieval Models Using SIR-C Measurements over the Little Washita River Watershed, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 59, pp. 308-320, 1997.
- WEGMÜLLER, U., STROZZI, T., WEISE, T. & C. L. WERNER (1995): ERS SAR Interferometry for Land Applications, *Final Report, ESTEC/Contract 11740/95/NL/PB (SC)*, Feb. 1995.
- WEGMÜLLER, U. (1997): Soil Moisture Monitoring with SAR Interferometry, *Proceedings of the 3rd ERS Symposium on Space at Service of our Environment*. ESA SP-414, pp. 47-52, Florence, March 1997.
- WEGMÜLLER, U. & C. WERNER (1997): Retrieval of Vegetation Parameters with SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, No. 1, pp. 18-24, Jan. 1997.
- WEIMANN, A., VON SCHÖNERMARK, M., SCHUMANN, A., JÖRN, P. & R. GÜNTHER (1998): Soil moisture estimation with ERS-1 SAR data in the East-German loess soil area, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 19, No. 2, pp. 237-243, 1998.

- WEULE, J. (1994): Iteration nichtlinearer Gauß-Filter in der Bildverarbeitung, *Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf*, 1994.
- WHITE, R. G. (1994): A simulated image annealing algorithm for radar cross-section estimation and segmentation, *SPIE Int. Conf. On Applications of Artificial Neuronal Networks V*, 4-8, Manuscript 2243-25, pp. 1-10, Orlando, Florida, April 1994.
- WHITT, M. & F. T. ULABY (1994): Radar response of periodic vegetation canopies, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 15, No. 9, pp. 1813-1848, 1994.
- WITTMANN, O., HOFMANN, B., RÜCKERT, G. & F. SCHMIDT (1981): Erläuterungen zur Standortkundlichen Bodenkarte von Bayern 1 : 25.000, Blatt Hallertau, *Bayerisches Geologisches Landesamt*, München, 1981.
- WITTMANN, O. (1983): Standortkundliche Landschaftsgliederung von Bayern. Materialien, 21, 1-30, 1 Übersichtskarte 1 : 100 000, *Bayer. Staatsmin. F. Landesentwicklung und Umweltfragen*, München, 1983.
- WOODING, M. G., GRIFFITHS, G. H., EVANS, R., BIRD, P., KENWARD, D. & G. E. KEYTE (1992): Temporal Monitoring of Soil Moisture using ERS-1 SAR Data, *Proceedings of the 1st ERS-1 symposium - Space at the Service of our Environment*, ESA SP-359, 4.-6. Nov. 1992, pp. 641-648, Cannes.
- WOODING, M. G., ZMUDA, A. D. & G. H. GRIFFITHS (1993): Crop discrimination using multitemporal ERS SAR data, *Proceedings 2nd ERS-1 Symposium*, ESA SP-361, Vol. 1, pp. 51-56, Hamburg, 1993.
- WOODING, M. G., ATTEMA, E., ASCHBACHER, J., BORGEAUD, M. CORDEY, R. A., DE GROOF, H., HARMS, J., LICHTENEGGER, J., NIEUWENHUIS, G., SCHMULLIUS, C. & A. D. ZMUDA (1995): Satellite Radar in Agriculture: Experience with ERS-1, *ESA SP-1185*, Oct. 1995.
- WÜRFL, P., DÖRFLER, J. & P. M. RINTELEN (1984): Die Einteilung Bayerns in Landwirtschaftliche Standorte, Landwirtschaftliche Erzeugungsgebiete und Agrargebiete, *Bayer. Landw. Jb.*, 61, pp. 377-423, München, 1984.
- YAKAM-SIMEN, F. & E. NEZRY (1999): Early estimation of crop surfaces, and agriculture monitoring using RADARSAT data, *Proceedings IGARSS'99 Remote Sensing of the Earth - A Challenge for the 21st Century*, Hamburg, 28.06.-02.07.1999.
- ZMUDA, A. D., BATTIS, A. J., WOODING, M. G. & P. FLETCHER (1994): Discrimination of agricultural crops using multitemporal ERS-1/SAR data. Results of the 1993 crop growing season, unpublished report to the Defence Research Agency, UK.