

**Extrahierung hydrologisch relevanter Parameter
aus hochaufgelösten polarimetrischen L-Band sowie
interferometrischen X-Band SAR-Daten**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades doctor rerum naturalium
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt dem Rat der Chemisch-Geowissenschaftlichen Fakultät der
Friedrich-Schiller-Universität Jena

von Dipl. Geogr. Christian Thiel
geboren am 21.06.1975 in Crimmitschau

Gutachter:

1. Prof. Dr. Volker Hochschild (Universität Tübingen)
2. Prof. Dr. Christiane Schullius (Universität Jena)
3. Prof. Dr. Gunter Menz (Universität Bonn)

Tag der öffentlichen Verteidigung: 14.07.2004

VORWORT

Die vorliegende Abhandlung entstand am Lehrstuhl für Geoinformatik des Institutes für Geographie an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Ein Teil der durchgeführten Untersuchungen erfolgte im Rahmen der Projektaufgaben des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) über insgesamt drei Jahre geförderten Projektes PHYMO (Parametrisierung Hydrologischer Modelle mit multifrequenten, multipolarimetrischen und interferometrischen Flugzeug-SAR-Daten [www.geogr.uni-jena.de/1725.0.html], DFG-Geschäftszeichen: HO 1840/5-1 & HO 1840/5-2). Die SAR-Datenbasis wurde im Rahmen des Projektes PHYMO durch das E-SAR, dem experimentellen flugzeuggetragenen Sensorsystem, betrieben vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), erzeugt.

Mein besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr. V. Hochschild für sein entgegengebrachtes Vertrauen bezüglich der kompetenten Ausführung der Projektaufgaben sowie für die Betreuung dieser Arbeit. Die im Zusammenhang seiner bisherigen Forschungen gewonnenen Erkenntnisse boten eine fundierte Grundlage der durchgeführten Untersuchungen. Außerdem bedanke ich mich bei Frau Prof. Dr. C.C. Schmallius für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie die wertvollen Anregungen im Verlauf der Arbeiten.

Verschiedenartige Unterstützungen wurden mir von den Kollegen des Institutes für Geographie als auch externer Institutionen zuteil. Martin Hellmann und Irena Hajnsek steuerten einen wesentlichen Teil zu meinem Verständnis der SAR-Polarimetrie bei und halfen mir somit den Einstieg in diesen Forschungszweig zu bewältigen. In diesem Zusammenhang ist auch Tanja Riedel zu erwähnen. Die intensiven und interessanten Diskussionen zum Thema SAR-Fernerkundung trugen einen immensen Teil dazu bei, meine Kenntnisse innerhalb dieses Fachgebietes zu erweitern. René Zimmermann gebührt Dank für seine Hilfeleistungen bei mathematischen Problemen. Besonderer Dank geht auch an Steffen Grünler für die Unterstützung bei Geländearbeiten und der IDL-Programmierung. Herrn R. Hoffmann sei für seinen Beitrag als Systemadministrator bei auftretenden soft- und hardwaretechnischen Problemen gedankt. Weiterhin möchte ich mich bei allen nicht namentlich aufgeführten Korrekturlesern, Mitarbeitern und Freunden bedanken, die mir sowohl in fachlicher als auch in persönlicher Hinsicht nützliche Anregungen und Unterstützung zuteil werden ließen.

Besonderer Dank gilt schließlich meinen Eltern sowie Carolin für die mannigfaltige Unterstützung während der Anfertigung dieser Arbeit.

Jena, im März 2004

Christian Thiel

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT	I
INHALTSVERZEICHNIS	II
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
TABELLENVERZEICHNIS	VII
HÄUFIGE ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE.....	VIII
1 EINLEITUNG	1
1.1 Einführung in die Thematik der SAR-Fernerkundung	1
1.2 Aufbau und Ausrichtung der Arbeit.....	5
2 THEORIE DER RADARFERNERKUNDUNG.....	6
2.1 Das Synthetische Apertur Radar – SAR.....	6
2.1.1 Speckle.....	8
2.1.2 Die Radargleichung	10
2.1.3 Besonderheiten der Bildgeometrie.....	11
2.1.4 SAR Parameter.....	14
2.2 Aktuelle Ansätze der SAR-Fernerkundung.....	16
2.2.1 SAR-Interferometrie	16
2.2.1.1 Interferometrische Kohärenz.....	17
2.2.1.2 Generierung von Höhenmodellen aus interferometrischen SAR Daten.....	18
2.2.1.3 Differentielle Interferometrie.....	20
2.2.2 SAR-Polarimetrie	22
2.2.2.1 Elektromagnetische Wellen.....	22
2.2.2.2 Beschreibung der Polarisation ebener monochromatischer EM Wellen	24
2.2.2.3 Repräsentationen von EM Wellen	25
2.2.2.3.1 Stokes Vektor Darstellung.....	25
2.2.2.3.2 Jones Vektor Darstellung.....	27
2.2.2.3.3 Änderung der Polarisationsbasis einer EM Welle.....	28
2.2.2.4 Repräsentation des Streuprozesses	29
2.2.2.4.1 Die Streumatrix für Rückwärtsstreuung	29
2.2.2.4.2 Die Müller Matrix für Rückwärtsstreuung	30
2.2.2.4.3 Das Konzept des Streuvektors.....	30
2.2.2.4.4 Polarimetrische Kohärenz- und Kovarianzmatrix.....	32
2.2.2.4.5 Polarisations-synthese	33
2.2.2.5 Dekomposition.....	34
2.2.3 Polarimetrische Interferometrie	37
2.3 Inversion von Oberflächenparametern.....	38
2.3.1 Messung und Darstellung der Oberflächenparameter.....	38
2.3.1.1 Oberflächenrauigkeit.....	38
2.3.1.2 Dielektrische Bodeneigenschaften	40
2.3.1.3 Vegetationsparameter.....	43
2.3.2 Rückstreuemodelle für Oberflächenparameter.....	44

2.3.2.1 Modelle auf Basis der Intensitäten	44
2.3.2.1.1 Das Fresnel Gesetz als eine Grundlage der Radarrückstreumodellierung.....	44
2.3.2.1.2 Theoretische Rückstreumodelle.....	45
2.3.2.1.3 Verknüpfung der mathematischen Rückstreumodelle – <i>Integral Equation Method</i>	48
2.3.2.1.4 Semiempirische und empirische Rückstreumodelle	49
2.3.2.2 Verwendung der Radarpolarimetrie für die Radarrückstreumodellierung.....	54
2.3.2.2.1 Einsatz polarimetrisch vorverarbeiteter Daten für die Rückstreumodellierung	54
2.3.2.2.2 Erweitertes Bragg Scattering Modell auf Basis des SPM	55
2.3.2.2.3 Polarimetrische Kohärenz und Oberflächenrauigkeit.....	56
2.4 Klassifikationsansätze für SAR Daten	57
2.4.1 Standardklassifikationsalgorithmen.....	58
2.4.2 Entwicklungstrends bei der Klassifikation von Fernerkundungsdaten	59
2.5 Hydrologisch relevante Forschungsansätze der SAR Fernerkundung	62
2.5.1 Analyse der Eindringtiefe von Mikrowellen in dielektrische Medien.....	62
2.5.2 Extrapolation der Oberbodenfeuchte in den Wurzelraum.....	63
2.5.3 Passives versus aktives Radar.....	66
2.5.4 Das VHF-SAR – SAR-Technologie für hydrologisch relevante Parameter	68
2.6 Resümee & Forschungsbedarf	71
2.7 Zielsetzung und methodisches Vorgehen	75
3 UNTERSUCHUNGSGEBIET UND DATENGRUNDLAGEN	77
3.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes.....	77
3.2 Beschreibung der Datengrundlagen	80
3.2.1 GIS-Daten.....	80
3.2.2 Geländedaten.....	81
3.2.3 Fernerkundungsdaten	83
4 AUSWERTUNG	85
4.1 Vorverarbeitung und erste Analyse der Daten	85
4.1.1 Analyse der Felddaten.....	85
4.1.1.1 Bodenfeuchte.....	85
4.1.1.2 Oberflächenrauigkeit.....	87
4.1.1.3 Biomasse.....	89
4.1.2 Vorverarbeitung und Analyse der SAR-Daten	90
4.1.2.1 Vorverarbeitung der SAR-Daten.....	90
4.1.2.2 Analyse der SAR-Daten	91
4.1.2.2.1 Analyse der Intensitäten.....	91
4.1.2.2.2 Analyse der polarimetrischen Information	93
4.1.2.2.3 Analyse des interferometrischen Höhenmodells.....	97
4.2 Klassifikation der Landbedeckung	100
4.2.1 Pixelbasierte Klassifikation anhand von Standardverfahren.....	100
4.2.1.1 Klassifikation auf Basis der Radarintensitäten	100
4.2.1.2 Klassifikation unter Einbeziehung der Polarisationsparameter.....	102
4.2.2 Pixelbasierte Klassifikation unter Verwendung von <i>Fuzzy Logic</i>	105
4.2.3 Klassentrennbarkeit anhand verschiedener Radarparameter.....	106
4.2.4 Schema für eine unüberwachte Klassifikation polarimetrischer SAR-Daten	110
4.3 Aufbereitung des interferometrischen Höhenmodells	115

4.4 Analyse der Korrelation zwischen SAR- und Oberflächenparametern.....	118
4.4.1 SAR-Parameter vs. Lokaler Einfallswinkel θ	118
4.4.2 SAR-Parameter vs. Biomasse.....	122
4.4.3 SAR-Parameter vs. Oberflächenrauigkeit.....	124
4.4.4 SAR-Parameter vs. Bodenfeuchte.....	129
4.4.5 Zusammenfassung der Korrelationsanalysen.....	133
4.5 Modellierung der Radarrückstreuung.....	134
4.5.1 Oh-Modell	134
4.5.2 Dubois-Modell	137
4.5.3 Chen-Modell.....	141
4.5.4 Integral Equation Method Model – IEM	143
4.5.4.1 Sensitivitätsanalyse.....	143
4.5.4.2 Forward Modellierung.....	149
4.5.4.3 Inversion.....	150
4.5.3 Zusammenfassung der Radarrückstreumodellierung.....	157
5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	159
5.1 Zusammenfassung der Arbeit	159
5.2 Ausblick.....	162
6 REFERENZEN	163

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1.1	Die Bodenfeuchte als eine der Steuergrößen für hydrologische und klimatologische Prozesse	3
Abb. 2.1	Auflösungszelle eines Radarimpulses	6
Abb. 2.2	Länge der synthetischen Apertur in Abhängigkeit der Entfernung Sensor – Objekt	7
Abb. 2.3	Impulskompression	8
Abb. 2.4	Vektoraddition des Streuanteils der Elementarstreuer	9
Abb. 2.5	Abbildungsgeometrie eines Radarbildes	12
Abb. 2.6	Auswirkung der erhöhten Lage von Objekten auf ihre <i>Slant Range</i> Position	13
Abb. 2.7	Unterschiedliche Rückstreupfade am Beispiel eines Fußballtores (HH-Polarisation, L-Band)	14
Abb. 2.8	Prinzipielle Darstellung der Systemanordnung für SAR Interferometrie	19
Abb. 2.9	Schematische Darstellung einer linear polarisierten EM Welle	22
Abb. 2.10	Ausbreitung einer linear polarisierten EM Welle	23
Abb. 2.11	Polarisationsellipse mit elektrischem Feldvektor \vec{E}	24
Abb. 2.12	Poincaré Sphäre	26
Abb. 2.13	Aus dem α -Winkel abgeleitete Streumechanismen	36
Abb. 2.14	Querschnitt einer rauen Oberfläche mit Höhendifferenz h	39
Abb. 2.15	Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und ε für verschiedene Bodenarten und Frequenzen	41
Abb. 2.16	Funktionsweise des <i>Time Domain Reflectometry</i> Verfahrens	42
Abb. 2.17	Gültigkeitskriterien theoretischer Modelle hinsichtlich ks und kl	45
Abb. 2.18	Klassenspezifische Schwellenwerte im H - α -Merkmalsraum	59
Abb. 2.19	Multilayer Perceptron	60
Abb. 2.20	Fuzzy Set für die Signatur eines Fernerkundungsparameters	61
Abb. 2.21	Eindringtiefe von Mikrowellen in Abhängigkeit der Bodenfeuchte	63
Abb. 2.22	Bodenfeuchteprofil im Gleichgewichtszustand	64
Abb. 2.23	Änderung des Rückstreusignals mit der Zunahme des Stammvolumens für versch. Frequenzen	69
Abb. 3.1	Lage und Reliefdarstellung (5-fach überhöht) des EZG Zeulenroda inkl. Befliegungsstreifen	78
Abb. 3.2	GIS-Daten über die land- und forstwirtschaftliche Bewirtschaftung	80
Abb. 3.3	Aufgenommene Geländedaten mit Verortung	81
Abb. 3.4	Aufnahme eines Rauigkeitsprofils im Gelände	82
Abb. 3.5	RGB-Komposite der Intensitäten (L-HH, L-VV, X-VV) und Karte des Lokalen Einfallswinkels	83
Abb. 4.1	Niederschlag und mittlere Tagestemperatur im Untersuchungsgebiet	85
Abb. 4.2	Aus TDR-Messungen interpolierte Bodenfeuchte mit Geländehöhe	85
Abb. 4.3	Vergleich zwischen gravimetrisch- und volumetrisch gemessener Bodenfeuchte	86
Abb. 4.4	Vergleich zwischen senkrecht- und parallel zur Flugrichtung gemessenen Rauigkeitsparametern	88
Abb. 4.5	RMS-Höhe vs. Autokorrelationslänge	88
Abb. 4.6	Phänologischer Entwicklungsstand der Feldfrüchte bzw. Residuen zum Zeitpunkt der Befliegung	89
Abb. 4.7	Gemessene Biomasse vor und nach Ofentrocknung	90
Abb. 4.8	Ausschnitte aus der E-SAR Szene und dazugehörige Geländeaufnahmen, Teil 1	91
Abb. 4.9	Bragg Rückstreukonditionen	92
Abb. 4.10	Ausschnitte aus der E-SAR Szene und dazugehörige Geländeaufnahmen, Teil 2	93
Abb. 4.11	Normierte Pauli-Rückstreutypen und Gesamtintensität des Paulivektors	94
Abb. 4.12	Polarisationsparameter nach Cloude: Alpha (α), Entropie (H) und Anisotropie (A)	95
Abb. 4.13	Korrelation zwischen Alpha & Entropie	97
Abb. 4.14	Interferometrisches DHM, 3D-Ansicht 3-fach überhöht	98
Abb. 4.15	Validierung der Baumhöhen des Interferometrisches DHM	99
Abb. 4.16	Mittlere L-Band Textur der E-SAR Szene	101
Abb. 4.17	3D-Darstellung der Landbedeckungsklassifikation aus Intensitäten	102
Abb. 4.18	3D-Darstellung der Landbedeckungsklassifikation unter Einbeziehung der Polarisationsparameter	104

Abb. 4.19	Klassifikationsergebnis mit <i>Fuzzy Logic</i> Ansatz	105
Abb. 4.20	Ablaufplan des Klassifikationsschemas	113
Abb. 4.21	Ergebnis nach Ablauf des Klassifikationsschemas	114
Abb. 4.22	Aus DHM-Daten abgeleitete Karte der Baum- und Gebäudehöhen	115
Abb. 4.23	3D-Darstellung der Baum- und Gebäudehöhen (5-fache Überhöhung)	116
Abb. 4.24	Geländehöhenvergleich zwischen interferometrischem DHM und LVA-DGM	117
Abb. 4.25	Aufbereitetes IF-DHM, eingebettet in LVA-DGM	117
Abb. 4.26	Landbedeckungsspezifische Abhängigkeit der L-HH Intensität von θ	119
Abb. 4.27	Landbedeckungsspezifischer Zusammenhang zwischen α und θ	120
Abb. 4.28	Landbedeckungsspezifischer Zusammenhang zwischen H und θ	121
Abb. 4.29	Sensitivität des Parameters α_2 für feuchte Biomasse	122
Abb. 4.30	Biomassekarte aus SAR-Daten basierend auf Korrelationsanalyse	123
Abb. 4.31	Messwerte für k_s und k_l parallel zur Flugrichtung	124
Abb. 4.32	Sensitivität des Parameters λ_1 für die RMS-Höhe (orthogonal zur Flugrichtung)	125
Abb. 4.33	Absolutwert und Realteil der RRL-Kohärenz	127
Abb. 4.34	$\text{Re}[\rho_{\text{RRL}}]$ vs. RMS-Höhe (Messung parallel zur Flugrichtung)	128
Abb. 4.35	Anhand $\text{Re}[\rho_{\text{RRL}}]$ abgeleitete Karte für s (orthonormal zur Flugrichtung)	129
Abb. 4.36	L-VV vs. Bodenfeuchte, Feld Tegau Süd, Bereich Süd	130
Abb. 4.37	Bodenfeuchtekarten, Feld Läwitz West	132
Abb. 4.38	<i>Forward</i> Ergebnisse [dB] mit Oh-Modell	135
Abb. 4.39	Auf Oh-Modell basierende Inversion bezüglich k_s	136
Abb. 4.40	<i>Forward</i> Ergebnisse [dB] mit Dubois-Modell	138
Abb. 4.41	Auf Dubois-Modell basierende Inversion bezüglich s	139
Abb. 4.42	Auf Dubois-Modell basierende Inversion bezüglich ϵ'	139
Abb. 4.43	Zusammenhang zwischen den absoluten Fehlern für s und ϵ'	140
Abb. 4.44	Kartendarstellung der Parameter s und ϵ' , basierend auf der Inversion des Dubois-Modells	141
Abb. 4.45	Auf Chen-Modell basierende Inversion bezüglich der Bodenfeuchte	142
Abb. 4.46	Kartendarstellung der Bodenfeuchte, basierend auf Chen-Modell	142
Abb. 4.47	Sensitivität der simulierten Rückstreuintensität hinsichtlich verschiedener Parameter	144
Abb. 4.48	Sensitivität betreffs der Bodenfeuchte in Abhängigkeit von deren Ausprägung	145
Abb. 4.49	Sensitivität der simulierten Rückstreuintensität hinsichtlich s und l ($\theta = 45^\circ$, $m_v = 20\%$)	146
Abb. 4.50	Sensitivität der simulierten Rückstreuintensität hinsichtlich m_v und θ ($s = 1,5$ cm, $l = 3,85$ cm)	146
Abb. 4.51	Sensitivität der simulierten Rückstreuintensität hinsichtlich s und m_v ($\theta = 45^\circ$, $l = f(s)$)	147
Abb. 4.52	Sensitivität der simulierten Rückstreuintensität hinsichtlich θ und s ($l = f(s)$, $m_v = 20\%$)	148
Abb. 4.53	<i>Forward</i> Ergebnisse mit IEM-Modell	149
Abb. 4.54	Schema der Inversion des IEM-Modells	150
Abb. 4.55	Auf IEM-Modell basierende Inversion bezüglich ϵ'	151
Abb. 4.56	Kartendarstellung von ϵ' , basierend auf der Inversion des IEM-Modells	154
Abb. 4.57	Auf IEM-Modell basierende Inversion bezüglich s	155
Abb. 4.58	Kartendarstellung von s , basierend auf der Inversion des IEM-Modells	156

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 4.1	Genauigkeitsbetrachtung der Landbedeckungsklassifikation	102
Tab. 4.2	Angewandete Filter und Fenstergrößen für die Homogenisierung der Polarisationsparameter	103
Tab. 4.3	Genauigkeitsbetrachtung der Landbedeckungsklassifikation unter Einbeziehung der Polarisationsparameter	104
Tab. 4.4	Angepasste Grenzen der linguistischen Variablen des <i>Fuzzy Sets</i> zur Berechnung des Klassenzugehörigkeitsgrades	105
Tab. 4.5	<i>Jefferies-Matusita</i> Distanzen für die Intensitäten und L-Band Textur	107
Tab. 4.6	<i>Jefferies-Matusita</i> Distanzen für die Polarisationsparameter	108
Tab. 4.7	Klassenspezifische <i>Jefferies-Matusita</i> Distanzen für alle Intensitäten inkl. L-Band Textur	109
Tab. 4.8	Klassenspezifische <i>Jefferies-Matusita</i> Distanzen für alle Polarisationsparameter (ohne Textur)	109
Tab. 4.9	Klassenspezifische <i>Jefferies-Matusita</i> Distanzen für alle SAR-Parameter	110
Tab. 4.10	Theoretische klassentypische Werte verschiedener SAR-Parameter	111
Tab. 4.11	Gemessene klassentypische Werte verschiedener SAR-Parameter	111
Tab. 4.12	Kriterien für die Kategorisierung der SAR-Parameter	112
Tab. 4.13	Korrelation zwischen feuchter Biomasse und SAR-Parametern inkl. Kenngrößen der Regressionsgeraden	123
Tab. 4.14	Korrelation zwischen RMS-Höhe (orthogonal zur Flugrichtung) und SAR-Parametern	125
Tab. 4.15	Korrelation zwischen RMS-Höhe (parallel zur Flugrichtung) und SAR-Parametern	125
Tab. 4.16	Korrelation zwischen der Autokorrelationslänge (orthogonal zur Flugrichtung) und SAR-Parametern	126
Tab. 4.17	Korrelation zwischen der Autokorrelationslänge (parallel zur Flugrichtung) und SAR-Parametern	126
Tab. 4.18	Korrelation zwischen volumetrischer Bodenfeuchte und SAR-Parametern, Feld Läwitz West	131
Tab. 4.19	Korrelation zwischen volumetrischer Bodenfeuchte und SAR-Parametern, Feld Tegau Süd, Bereich Süd	131

HÄUFIGE ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE

BSA	<i>Backward Scattering Alignment</i>
DGM	Digitales Geländemodell (Repräsentiert Topographie eines Geländes)
DHM	Digitales Höhenmodell (DGM plus Vegetations- und Gebäudehöhen)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EM	Elektromagnetisch
E-SAR	Experimentelles Synthetisches Apertur Radar
ESTAR	<i>Electronically Scanned Thinned Array Radiometer</i>
FSA	<i>Forward Scattering Alignment</i>
GIS	Geographisches Informationssystem
GOM	<i>Geometric Optics Model</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IEM	<i>Integral Equation Method</i>
KA	Kirchhoffsche Annäherung
LIA	<i>Local Incidence Angle</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
LVA	Landesvermessungsamt
MAP	<i>Maximum a Posteriori Probability</i>
MLP	<i>Multi Layer Perceptron</i>
NN	Neuronales Netz
PDF	<i>Probability Density Function</i>
POM	<i>Physical Optics Model</i>
PS	<i>Permanent Scatterers</i>
RFI	Radio Frequenz Interferenzen
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SAR	Synthetisches Apertur Radar
SLAR	<i>Sidelooking Airborne Radar</i>
SLC	Single Look Complex
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SPM	<i>Small Perturbation Model</i>
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i>
λ	Wellenlänge
c	Lichtgeschwindigkeit
f	Frequenz
σ	Rückstreuquerschnitt
σ^0	Normalisierter Rückstreuquerschnitt
γ	Interferometrische Kohärenz
$\Delta\phi$	Phasendifferenz
θ	Lokaler Einfallswinkel
ψ	Orientierungswinkel
χ	Elliptizitätswinkel
ρ	Komplexes Polarisationsverhältnis
α	Mittlerer Streumechanismus (Cloude Dekomposition)
β	Orientierungswinkel zur LOS (Cloude Dekomposition)
H	Entropie (Cloude Dekomposition)
Λ	Anisotropie (Cloude Dekomposition)
s	RMS-Höhe
l	Autokorrelationslänge
ξ	Autokorrelationsfunktion
ϵ	Dielektrizitätskonstante
ϵ', ϵ''	Real- und Imaginärteil von ϵ
μ_r	Magnetische Permeabilität
m_r	Volumetrische Bodenfeuchte
Γ_p	Fresnel Reflexivität
k	Normierungsfaktor hinsichtlich Wellenlänge
ρ_{RRLL}	Polarimetrische RRLK-Kohärenz
T_B	<i>Brightness</i> Temperatur

1 EINLEITUNG

1.1 Einführung in die Methodik der Radarfernerkundung

Das Verständnis der dynamischen Prozesse auf globaler Ebene stand vor allem in den letzten Dekaden im Mittelpunkt wissenschaftlichen Interesses. Bis heute wurden hinsichtlich der Erfassung komplexer Systeme in verschiedenen Forschungszweigen bedeutende Fortschritte erzielt. Mit dem Aufkommen moderner Rechentechnik entstand die notwendige Basis, viele der erforschten Zusammenhänge mehr oder weniger komplex zu simulieren. Dabei greift die Klimatologie eines der umfassendsten Prozessgefüge auf. Das Klima steht u.a. in dauernder Wechselwirkung mit geologischen, hydrologischen, biologischen sowie anthropogenen Prozessen. Um das Klima zu verstehen, ist das Verständnis aller auf das Klima wirkenden Größen unerlässlich. Zumeist handelt es sich dabei nicht um statische und unabhängige Parameter. Vielmehr verhalten sie sich zeitlich dynamisch und stehen in Interaktion miteinander sowie mit dem System Klima selbst. Steuernde Parameter werden beispielsweise in den Forschungszweigen Hydrologie, Ökologie oder Ozeanographie anhand einer prozessorientierten Systemanalyse des entsprechenden Systems abgeleitet und analysiert. Die Dynamik dieser Größen erfordert dabei eine hohe Aktualität relevanter Daten. Die Möglichkeiten der manuellen Datenakquisition sind dieser Anforderung meist nicht mehr gewachsen. Probleme entstehen vor allem aus dem Mangel an räumlicher und zeitlicher Kontinuität der maßgeblichen Parameter.

Das Defizit der unzureichenden zeitlichen Auflösung wurde und wird vor allem durch das Aufkommen mathematischer Modelle, welche das jeweilige System mit all seinen Prozessen und Parametern simulieren, überwunden. Die Verlässlichkeit der so gewonnenen Daten hängt jedoch von der Qualität des Modells inklusive jener des Dateninputs ab.

Auch der Mangel an räumlicher Kontinuität kann auf Basis mathematischer Modelle ausgeräumt werden. Anhand elementarer Interpolationsverfahren werden Punktmessungen regionalisiert. Komplexere Modelle berücksichtigen die Ursachen der gegenwärtigen räumlichen Verteilung einer Messgröße. Eine effektivere Möglichkeit, die aktuelle räumliche Formation gesuchter Größen zu bestimmen und damit den Mangel an räumlicher Kontinuität auszuräumen, besteht in der Verwendung von Fernerkundungsdaten.

Fernerkundung bedeutet die Möglichkeit, bestimmte Eigenschaften von Objekten berührungsfrei zu messen. Untersuchungsschwerpunkte bilden hierbei die Geometrie und physikalische Eigenschaften. Die Aufnahme der Daten kann von einem Flugzeug oder einem Satelliten als jeweilige Sensorplattform erfolgen. Überträger der Informationen sind elektromagnetische Wellen. Während sich die optische Fernerkundung den Bereich des sichtbaren Lichtes, erweitert um das Infrarot, zunutze macht, werden in der Radarfernerkundung Mikrowellen eingesetzt. Die Energiequelle der optischen Fernerkundung stellt die Sonne dar, die Mikrowellen der Radarfernerkundung werden vom Sensor selbst generiert. Eine Ausnahme bilden passive Radarsysteme. Spezielle Anwendungen der Fernerkundung befassen sich mit dem Informationsgehalt der irdischen Gamma- und Thermalstrahlung.

Optische Fernerkundungssysteme zeichnen das von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenlicht auf. Die Reflexion des Sonnenlichts findet dabei an der Oberfläche des jeweiligen Objektes statt. Unterschiede in der Reflexion des Lichts sind auf molekularer Ebene zu suchen. Aktive Radarsysteme senden Mikrowellenstrahlen aus und zeichnen deren an der Erdoberfläche reflektierten Anteil wieder auf. Die im Vergleich zu optischen Systemen deutlich größere Wellenlänge sensibilisiert die Mikrowellen für andere Oberflächeneigenschaften. So werden die Art und Intensität des Rückstreusignals durch die Geometrie sowie die dielektrischen Eigenschaften der Streuer bestimmt. Zudem ist vor allem der langwelligere Bereich der Mikrowellen in der Lage, in Medien einzudringen und somit Informationen über deren innere Beschaf-

fenheit zu liefern. Aus der Funktionsweise von Radar-Systemen erwachsen drei systemimmanente Vorteile gegenüber optischen Sensoren. Dies sind die weitestgehende Wetterunabhängigkeit, die Unabhängigkeit von solaren Beleuchtungsverhältnissen sowie die exakte Kenntnis der ausgesandten Strahlung. Letztere Eigenschaft ermöglicht die Normierung der Rückstreuintensität und somit den absoluten Vergleich der Daten verschiedener Radarsysteme miteinander. Zudem ermöglicht die Arbeitsweise als kohärentes System die Auswertung der Phaseninformation. Darauf begründen sich die Ansätze der Interferometrie, der Polarimetrie sowie der polarimetrischen Interferometrie.

Optische Fernerkundungsdaten und Radardaten beinhalten unterschiedliche Informationen. Im Idealfall werden sie daher ergänzend eingesetzt. In der Realität ist, begründet durch das zumeist begrenzte Budget, die Beschränkung auf ein Fernerkundungsverfahren notwendig. Die Entscheidung zwischen optischen Daten und Radardaten richtet sich dann nach der Aufgabenstellung und der Verfügbarkeit der Daten. Dabei eignen sich optische Daten insbesondere für vegetationspezifische Untersuchungen. Anhand der Rückstreusignatur sind z.B. Aussagen über die Vitalität bzw. den Reifegrad von Pflanzen möglich. Je nach spektraler Auflösung und Bandbreite des Sensors können in optischen Daten zudem Informationen über die mineralische Zusammensetzung nichtbewachsener Oberflächen enthalten sein. Die Sensitivität der Mikrowellen bezüglich Geometrie und dielektrischen Eigenschaften von Streuern hingegen lässt auf andere Landoberflächenparameter schließen. Hinsichtlich der Vegetation sind in Abhängigkeit von der Wellenlänge die Biomasse, der Pflanzenwassergehalt, die Vegetationsstruktur sowie Wuchsdichte und Vegetationshöhe von Bedeutung. Die Art und Intensität der Rückstreuung vegetationsfreier Landoberflächen wird von der Oberflächenrauigkeit und der Dielektrizitätskonstante des Bodens bestimmt. Die Dielektrizitätskonstante wiederum hängt maßgeblich von der Bodenfeuchtigkeit sowie dessen mineralogischen Zusammensetzung (Vorkommen dielektrisch wirksamer Verbindungen) ab. In besiedelten Gebieten sind Art und Anordnung der Gebäude relevant.

Insbesondere die Sensitivität für Bodenfeuchte und Oberflächenrauigkeit macht die Radarfernerkundung zu einem wertvollen Werkzeug, um steuernde Systemparameter der Klimatologie oder der Hydrologie zu liefern. So wirkt sich speziell bei vegetationsfreien Arealen die Feuchtigkeit im oberen Bodenbereich auf den Anteil des Oberflächenabflusses am Gesamtabfluss aus. Auch klimatologisch gesehen ist die Oberbodenfeuchte ein entscheidender Parameter. An der Schnittstelle zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre steuert sie die Art und die Intensität des atmosphärischen Energieflusses (Abb. 1.1). Die Fläche dieser Schnittstelle ist eine Funktion der Oberflächenrauigkeit. Auch sie wirkt auf Art und Intensität des Energieflusses. Zudem wirkt die Oberflächenrauigkeit auf die Art der Abflussbildung (ENGMAN 1995).

Die im Radarsignal enthaltene Information über Oberflächenrauigkeit und Bodenfeuchte stellt eine Mischinformation dar. Beide Parameter wirken gemeinsam auf das Rückstreusignal. Die Zerlegung des Signals in Bodenfeuchte- und Rauigkeitseinfluss ist nicht ohne weiteres möglich. Zudem ist das Radarsignal von weiteren Einflussgrößen abhängig. Um Oberflächenrauigkeit oder Bodenfeuchte bestimmen zu können, müssen alle anderen Parameter konstant gehalten werden. Für eine parallele Herleitung beider Oberflächenparameter aus einem Radardatensatz ist die Verwendung mehrerer Polarisierungen oder Frequenzen Voraussetzung. Für die Auflösung dieser Information wurde eine Reihe von Rückstreumodellen entwickelt.

Mit verschiedenartigen Ansätzen wird versucht, die Rückstreuintensität in Abhängigkeit der Oberflächenparameter, der Frequenz sowie des lokalen Einfallswinkels zu simulieren. Rein empirische Modelle stützen sich auf einfache, testgebietsbezogene Korrelationsbeziehungen zwischen Radarparametern und Oberflächeneigenschaften. Semiempirische Methoden berücksichtigen zwar physikalische Gesetzmäßigkeiten,

mehr als zwei Phasenbilder herangezogen, können topographische Veränderungen im Zentimeterbereich gemessen werden (GABRIEL et al. 1989, ZEBKER et al. 1994, MASSONNET 1996). In der polarimetrischen Interferometrie steht die Analyse der Unterschiede zwischen Interferogrammen aus verschiedenen Polarisationen im Mittelpunkt. Die Grundlage dieses Ansatzes ist die unterschiedliche Position der Streuzentren für die verschiedenen Polarisierungen. Dabei ist der vertikale Versatz der Streuzentren mit der Vegetationshöhe korreliert (CLOUDE & CORR 2003).

Im Gegensatz zur Interferometrie wird bei der Polarimetrie ein Objekt nur von einem Standort beleuchtet. Allerdings werden dafür verschiedene Polarisierungen verwendet. In der üblichen linearen Polarisationsbasis stehen die horizontale sowie die vertikale Polarisierung zur Verfügung. Daraus ergeben sich vier Kombinationsmöglichkeiten aus Sendepolarisation und Empfangspolarisation. Die Analyse der Rückstreuintensität sowie der Phaseninformation aller Polarisierungen erlaubt Rückschlüsse auf die wirkenden Streumechanismen und somit auf die Geometrie der Streuobjekte. Diese Tatsache machen sich polarimetrische Klassifikationsansätze zunutze (KROGAGER & MADSEN 1996, CLOUDE & PORTIER 1997, HELLMANN et al. 1999, LEE et al. 2001). Ebenfalls auf dieser Tatsache basierend können theoretische Rückstreuemodelle entwickelt werden, die eine gegenseitige Isolierung der Oberflächenparameter Rauigkeit und Bodenfeuchte ermöglichen (CLOUDE et al. 1999).

Obwohl das Potenzial der Radarfernerkundung hinsichtlich der Messung von Umweltparametern wie Bodenfeuchte, Oberflächenrauigkeit oder Vegetationsparameter in einer Vielzahl von Untersuchungen nachgewiesen wurde, stehen die meisten Verfahren noch nicht für eine operationelle Anwendung zur Verfügung. Einfache, testgebietsbezogene Algorithmen besitzen keine Allgemeingültigkeit und sind somit nicht direkt auf andere Gebiete übertragbar. Den meisten theoretischen Ansätzen fehlt noch eine hinreichende Validierung oder sie besitzen aufgrund des hohen Datenbedarfs keine praktische Bedeutung. Hinzu kommt die Notwendigkeit eines umfangreichen Expertenwissens und die damit in Verbindung stehende Einschränkung der Anwendergemeinde.

Zur Etablierung der Radarfernerkundung als sicheres Instrument für die Messung der genannten Umweltparameter sind allgemein anwendbare Verfahren mit qualitativ ausreichenden Ergebnissen von grundlegender Bedeutung. Primäres Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer diesen Ansprüchen genügenden Methode mit dem Zweck der Bestimmung von Bodenfeuchte und Oberflächenrauigkeit.

1.2 Aufbau und Ausrichtung der Arbeit

Die Arbeit untergliedert sich in einen theoretischen und einen praktischen Teil. Im theoretischen Abschnitt, dem 2. Kapitel, werden einleitend die Grundlagen der Radarfernerkundung aufbereitet. Darauf aufbauend erfolgt die Zusammenfassung moderner Ansätze der SAR-Fernerkundung (SAR: Synthetisches Apertur Radar), nämlich der Interferometrie sowie der Polarimetrie. Im Anschluss werden Möglichkeiten der Inversion von SAR-Daten in die Oberflächenparameter Bodenfeuchte und Rauigkeit diskutiert. Hier stehen Rückstreumodelle im Vordergrund. Der darauf folgende Text ist den Möglichkeiten einer landbedeckungsorientierten Klassifikation von SAR-Daten gewidmet. Im Anschluss erfolgt exkursiv die Sichtung und Analyse hydrologisch relevanter Forschungsgegenstände der SAR-Fernerkundung. Zum Abschluss des 2. Kapitels werden Forschungsdefizite aufgezeigt und die Zielsetzungen dieser Arbeit abgeleitet.

Im 3. Kapitel werden die Datengrundlagen für den praktischen Teil dieser Arbeit präsentiert. Zudem erfolgt eine Vorstellung des im Einzugsgebiet der Trinkwassertalsperre Zeulenroda befindlichen Untersuchungsgebietes (bisherige Forschungsaktivitäten inbegriffen).

Das darauffolgende Kapitel 4.1 beinhaltet die Aufbereitung, Analyse und Diskussion aller relevanten Daten. Gelände- und Fernerkundungsdaten werden eingangs separat diskutiert. Die anschließende polarimetrisch orientierte Untersuchung der SAR-Daten bezieht die Ausprägung der Oberflächenparameter zum Teil mit ein. Zum Abschluss wird das interferometrische Höhenmodell analysiert.

Die praktische Durchführung der Landbedeckungsklassifikation sowie deren Resultate werden im Kapitel 4.2 beschrieben. Ein besonderes Augenmerk wird darauf gelegt, inwieweit die Verwendung polarimetrischer Parameter hier eine Qualitätssteigerung ermöglicht. Zudem werden verschiedene Klassifikationsalgorithmen hinsichtlich ihrer Eignung für hochaufgelöste SAR-Daten validiert. Die im Rahmen dieser Arbeiten gewonnenen Erkenntnisse werden schließlich als Schema einer unüberwachten Klassifikation polarimetrischer SAR-Daten zusammengefasst.

Kapitel 4.3 befasst sich mit der Aufbereitung des interferometrischen Höhenmodells. Die durchgeführten Arbeiten beinhalten notwendige Korrekturen als Folge der vollständigen Dekorrelation durch Systemrauschen (für Wasserflächen) sowie Geländehöhenanpassungen für Wald- und Siedlungsflächen. Als Nebenprodukt wurde eine Karte für Wald- und Gebäudehöhen generiert.

Als Grundlage für die später folgende Rückstreumodellierung beschäftigt sich Kapitel 4.4 mit der Analyse der Beziehungen zwischen SAR- und Oberflächenparametern (Biomasse, Bodenfeuchte, Rauigkeit, Lokaler Einfallswinkel). Neben den Radarintensitäten wurden ebenfalls die Polarisationsparameter in die Untersuchung einbezogen. Ferner erfolgte die Prüfung des Rauigkeitseinflusses auf die polarimetrische RRL-Kohärenz (siehe Punkt 2.3.2.2.3). Basierend auf dem signifikanten Zusammenhang zwischen beiden Parametern wurde von der RRL-Kohärenz eine Rauigkeitskarte abgeleitet.

Das Kapitel 4.5 beinhaltet die Modellierung der Radarrückstreuung. Es werden die Modellergebnisse (*Forward Approach* und Inversion) der Rückstreumodelle nach OH et al. (1992) (*Ob-Modell*), DUBOIS et al. (1995) (*Dubois-Modell*), CHEN et al. (1995) (*Chen-Modell*) und FUNG (1994) (*Integral Equation Method Model - IEM*) vorgestellt. Der Schwerpunkt der Diskussion liegt auf dem IEM-Modell.

Das abschließende Kapitel 5 fasst die Inhalte und Ergebnisse dieser Arbeit mit Bezugnahme auf die Zielsetzung zusammen. Zudem wird die Relevanz der anhand der SAR-Datenauswertung bereitgestellten Informationen aus dem Blickwinkel der hydrologisch orientierten Modellierung betrachtet. In einem anschließenden Ausblick erfolgt die Abschätzung des zukünftigen Potenzials der Radarfernerkundung unter Berücksichtigung der in dieser Arbeit diskutierten Sachverhalte.

2 THEORIE DER RADARFERNERKUNDUNG

Die Radarfernerkundung bedient sich der Mikrowellen als Informationsüberträger. Als Mikrowellen werden elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge zwischen einem Millimeter und einem Meter bezeichnet. Im elektromagnetischen Spektrum sind diese Wellen zwischen der Thermalstrahlung und den Radiowellen angesiedelt. Die Fähigkeit, Wolken und Dunst zu durchdringen, macht Mikrowellensysteme nahezu wetterunabhängig.

Ursprünglich wurden Radarsysteme zur Ortung und Geschwindigkeitsmessung von Objekten entwickelt. Das Flugüberwachungsradar funktioniert beispielsweise nach diesem Prinzip (SEIFERT & ZINK 1993). Hochfrequente Mikrowellenstrahlung wird im Wetterradar verwendet, um Niederschlagsgebiete zu detektieren. Nutzt man die Radarstrahlung zur Abbildung und Untersuchung der Erdoberfläche, spricht man von Radarfernerkundung.

In der Radarfernerkundung werden aktive und passive Systeme unterschieden. Während bei aktiven Systemen die Mikrowellen vom Sensor selbst generiert werden, nutzen passive Systeme die terrestrische Mikrowellenstrahlung. Somit sind beide Verfahren unabhängig von der aktuellen solaren Einstrahlung.

2.1 Das Synthetische Apertur Radar – SAR

Bei aktiven Radarfernerkundungssystemen werden die Mikrowellen senkrecht zur Bewegungsrichtung der Plattform schräg nach unten ausgesendet. Die Emission der Strahlung erfolgt dabei nicht kontinuierlich, sondern in Form von Impulsen. Das reflektierte Signal jedes Impulses wird in Form des Amplituden- und Phasenverlaufes vom Sensor aufgezeichnet. Über die Laufzeit des Signals wird die Entfernung zum Sensor bestimmt. Die geometrische Auflösung in Richtung der ausgesandten Strahlung (*Range*) hängt von der Länge eines Impulses – der Bandbreite ab (Abb. 2.1).

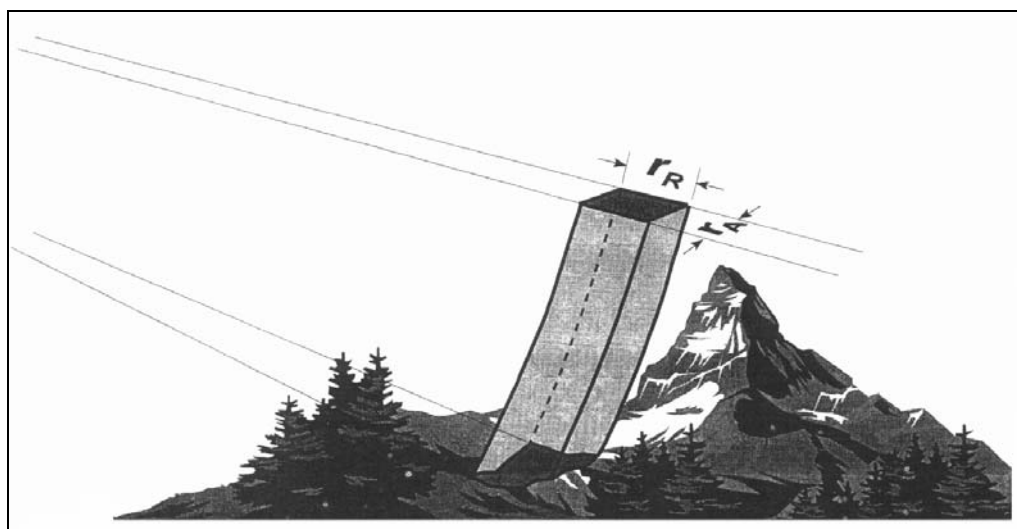


Abb. 2.1: Auflösungszelle eines Radarimpulses (r_R = Auflösung in Range, r_A = Auflösung in Azimut)
RANEY (1998), S. 29

Die Auflösung in Flugrichtung (*Azimuth*) ist umgekehrt proportional zum azimutalen Strahlungswinkel (*azimuth beamwidth*) der emittierten Mikrowellen. Der Strahlungswinkel wiederum ist eine Funktion der Baulänge der Antenne. Des Weiteren verringert sich die geometrische Auflösung mit der Entfernung zwi-

schen Objekt und Sensor. Nach ULABY (1986) wird die Bodenaufösung in Azimut nach folgender Gleichung bestimmt:

$$\delta_{re} = \frac{\lambda \cdot r}{l_{re}} \quad 2.1$$

Dabei stehen l_{re} für die Länge der Antenne (reale Apertur), r für die Entfernung zwischen Objekt und Sensor und λ für die Wellenlänge der ausgesandten Mikrowellen. Für ein orbital operierendes System ($r = 300$ km) mit einer Wellenlänge von $\lambda = 23$ cm (L-Band) müsste die Antennenlänge 2,3 km betragen, um eine azimutale Bodenaufösung von 30 m zu erreichen. Die Errichtung eines Systems mit diesen Spezifikationen ist sicher unrealistisch. Demnach sind diese sogenannten SLAR-Systeme (*Sidelooking Airborne Radar*) mit realer Apertur lediglich in geringen Flughöhen einsetzbar.

Um Objekte auch aus großer Entfernung in ausreichender Auflösung abbilden zu können, musste das Seitensicht radar weiter entwickelt werden. Anstelle einer Verlängerung der realen Antenne wird bei den SAR-Systemen (*Synthetic Apertur Radar*) durch das Aneinanderreihen realer kurzer Antennen eine lange Apertur simuliert. Hierfür wird die kurze Antenne entlang eines geradlinigen Pfades bewegt. Der azimutale Öffnungswinkel ist dabei im Vergleich mit den SLAR-Systeme relativ groß. Dadurch wird ein sich im Aufnahmebereich des Sensors befindliches Objekt von mehreren Impulsen beleuchtet (Abb. 2.2). Die Zahl der auf ein Ziel auftreffenden Impulse nimmt mit der Entfernung zum Sensor zu. Die Länge der synthetischen Apertur für ein bestimmtes Objekt entspricht der Strecke die der Sensor zurücklegt, während sich dieses Objekt im Beleuchtungsbereich befindet. Demnach steigt die synthetische Antennenlänge proportional mit der Distanz zum Sensor. Aus dieser Beziehung resultiert die Unabhängigkeit der geometrischen Auflösung von der Entfernung. Somit ist bei einem SAR die Auflösung in Azimut nur von der Größe der realen Antenne abhängig. Mit kleinen Antennen können aufgrund des großen azimutalen Öffnungswinkels hohe Auflösungen erreicht werden. Limitiert wird das Bestreben nach höherer Auflösung durch ein ausreichendes Signal-zu-Rauschen-Verhältnis (SNR), da mit den Antennendimensionen auch die Leistungsdichte am Boden (SEIFERT & ZINK 1993) und die Empfangsleistung schwinden. Die Lösung dieses Konfliktes mittels höherer Sendeleistung ist aufgrund der zur Verfügung stehenden Energie begrenzt (RANEY 1998).

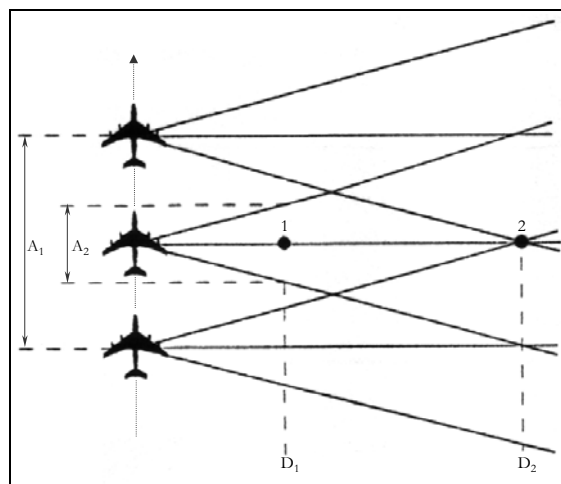


Abb. 2.2: Länge der synthetischen Apertur in Abhängigkeit der Entfernung Sensor – Objekt, verändert nach SEIFERT & ZINK 1993, S. 26

Die Generierung der synthetischen Apertur setzt eine kohärente Aussendung der Radarimpulse voraus. Jeder Streuer besitzt eine immanente Objektphase, welche sich in Abhängigkeit vom Abstand zum Sensor kontinuierlich ändert. Diese Kontinuität wird genutzt, um anhand einer kohärenten Addition aus den Signalen der kleinen realen Aperturen mit großem Öffnungswinkel eine lange Antenne mit kleinem Öffnungswinkel zu synthetisieren (SEIFERT & ZINK 1993, RANEY 1998).

In der Phase der SAR-Prozessierung werden die Radarrohdaten in Bilddaten umgewandelt. Diese Phase lässt sich in zwei Arbeitsschritte untergliedern: die Impulskompression und die Korrektur der Dopplerverschiebung. Die Impulskompression ist notwendig, um das emittierte linear frequenzmodulierte Signal (*Chirp*) zu verkürzen und zu verstärken (Abb. 2.3). Dieser Vorgang wird mit sog. adaptiven Filtern, welche die Autokorrelation des Signals ausnutzen, vollzogen. Auf diese Weise beseitigt man Überlagerungen im Rückstreusignal, die durch benachbarte Streuer entstehen. Die Korrektur der Dopplerverschiebung bedient sich des gleichen Ansatzes wie die Impulskompression. In diesem Schritt wird jedem Streuer die korrekte Azimutposition zugewiesen (SEIFERT & ZINK 1993, RANEY 1998).

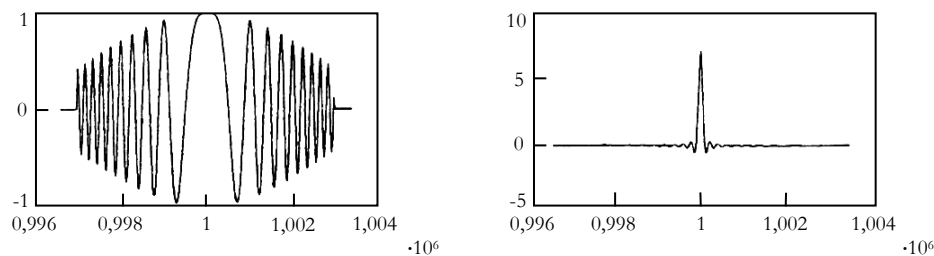


Abb. 2.3: Impulskompression (links: linear frequenzmodulierter Impuls, rechts: komprimierter Impuls), verändert nach RANEY (1998), S. 23

2.1.1 Speckle

Speckle ist nicht ausschließlich ein SAR inhärentes Phänomen. Dieser Effekt, welcher sich in einem das SAR-Bild überlagernde Rauschen äußert, tritt bei allen monochromatischen Systemen mit Auflösungszellen größer als die Wellenlänge auf. Die gesamte Rückstreuung einer Auflösungszelle ergibt sich aus der Vektoraddition aller Streuanteile innerhalb dieser Zelle. In Abb. 2.4 steht jeder Pfeil für die Rückstreuecharakteristik eines Streuers. Diese ist jeweils durch die Magnitude und die Phase gekennzeichnet. Als Ergebnis der kohärenten Addition der Rückstreuung der Einzelstreuer ergeben sich Magnitude sowie Phase einer Auflösungszelle. Befindet sich nur ein einzelnes zur Rückstreuung beitragendes Objekt in einer Auflösungszelle, werden Magnitude und Phase der Auflösungszelle ausschließlich durch diesen Streuer bestimmt. Die Vektoraddition von Phase und Magnitude von zufällig angeordneten Elementarstreuern entfällt. In diesem Fall tritt kein Speckle auf.

Im Regelfall ist Speckle eine für die Datenauswertung unerwünschte Erscheinung. Die durch den Speckle verursachte Variabilität der gemessenen Rückstreuung entspricht nicht den tatsächlichen Schwankungen der Oberflächeneigenschaften. Mit den Möglichkeiten der Beseitigung dieser Störgröße befasst sich eine Vielzahl von Studien. Dabei lassen sich im wesentlichen zwei Ansätze voneinander abgrenzen.

Der erste Ansatz verfolgt die unkohärente Addition unabhängiger Bildelemente. Im einfachsten Fall ist damit eine Mittelung über eine bestimmte Zahl von Auflösungszellen gemeint. Eine andere Möglichkeit ist das sogenannte *Multilooking*. Für dieses Verfahren wird die synthetische Apertur in Teilaperturen zerlegt. Für jede Teilapertur wird durch die SAR-Prozessierung ein Bilddatensatz erzeugt. Anschließend er-

folgt eine Mittelung über die Bildelemente gleicher Koordinaten. Mit der Verkürzung der synthetischen Antennenlänge reduziert sich auch die geometrische Auflösung der Bilddaten. Eine Homogenisierung der Radardaten anhand dieser unkohärenten Addition geht folglich zu Lasten der geometrischen Genauigkeit.

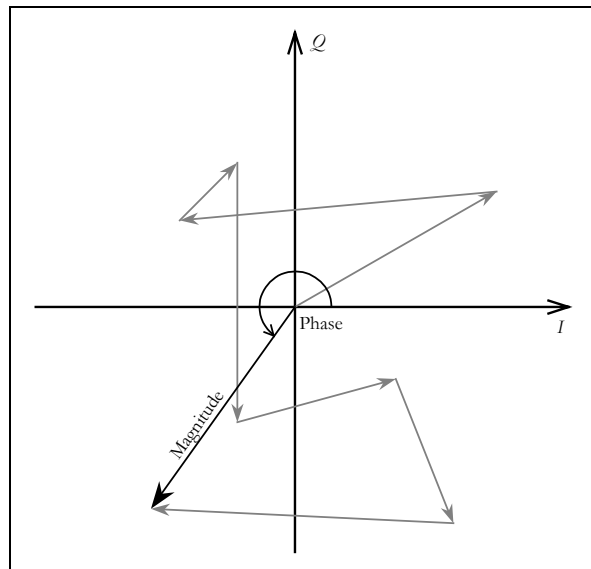


Abb. 2.4: Vektoraddition des Streuanteils der Elementarstreuer nach RANEY (1998), S. 69

Der zweite Ansatz, den Speckle zu reduzieren, sind adaptive Specklefilter. Sie wurden ausschließlich für diesen Zweck entwickelt. Ziel ist eine bessere Homogenisierung der Bilddaten als mit Mittelwertfiltern bei Erhaltung der geometrischen Genauigkeit. Im Gegensatz zu einfachen Mittelwertfiltern berücksichtigen sie die statistischen Eigenschaften des Speckle. So wird voll ausgebildeter Speckle oft als multiplikatives Rauschen mit einer Gauß-Verteilung modelliert (RANEY 1998). Unter Berücksichtigung dieser statistischen Verteilung können die auf Speckle beruhenden Grauwertschwankungen innerhalb eines kleinen Bildbereichs erkannt und reduziert werden. Nach diesem Prinzip funktionieren der Frost- und der Lee-Filter (FROST et al. 1982, LEE 1986). MAP Filter (*Maximum a Posteriori Probability*) sind eine Erweiterung dieses Prinzips. Hier werden Schwellenwerte benutzt, um die Reaktion des Filters auf Grauwertschwankungen im Bild besser kontrollieren zu können (RANEY 1998). Diskussionen dieser und anderer Specklefilter wurden beispielsweise in HAGG & STIES (1994, 1996) sowie in GEBHARDT et al. (1995) geführt.

Trotz aller Bemühungen, wirksame Specklefilter zu entwickeln, weisen die Filter, sofern sie auf das gesamte Bild angewendet werden, drei Schwächen auf. So werden Einzelobjekte mit besonders hoher Radar-rückstreuung nicht ausreichend berücksichtigt, Objektkanten werden verwischt und die tatsächliche Textur kann stellenweise nicht von Speckleeffekten unterschieden werden. WALESSA & DATCU (2000) umgehen diese Probleme damit, dass sie vor der Anwendung des eigentlichen Specklefilters Kanten, Textur und Einzelstreuer aus dem Bild extrahieren. Die Filterung erfolgt anschließend für verschiedene Bildbereiche getrennt. LOPES et al. (1992) kombinieren den Ansatz des *Multilooking* mit dem adaptiven MAP Filter. Auf diese Weise erfolgt die Specklefilterung schon in der SAR-Prozessierungsebene.

Mit dem Aufkommen der Polarimetrie wurden neue Anforderungen an Specklefilter gestellt. Bislang wurden die Filter getrennt für jeden Kanal angewendet. Damit würden jedoch die polarimetrischen Eigenschaften und die Korrelationen der Polarisierungen miteinander verändert. Eine polarimetrische Auswertung ist dann nicht mehr möglich. LEE et al. (1997) entwickelten daher einen polarimetrischen Specklefilter, der die Beziehung der einzelnen Polarisierungen zueinander berücksichtigt. Zum Erhalt von Objektkanten und Punktzielen implementierten sie einen Algorithmus wie WALESSA & DATCU (2000).

Obwohl Speckle für die meisten Anwendungen einen Störfaktor darstellt, kann er verwertbare Informationen enthalten (RANEY 1998). Anhand dessen Verteilung und Intensität kann auf die Elementarstreuer der Auflösungszellen geschlossen werden. Befinden sich innerhalb eines Bildelements nur wenige Streuer und besitzen diese einen geringen Rückstreuquerschnitt, so liegen theoretisches Minimum und Maximum nach der Vektoraddition der elementaren Streuteile relativ dicht beieinander. Der Speckle in einem Gebiet mit diesen Eigenschaften wäre gering ausgeprägt. Diese Gegebenheit ist beispielsweise für objektbasierte Klassifikationen nützlich. Ein Sonderfall, der zu einer geringen Ausprägung des Speckle führt, sind dem Sensor zugewandte vegetationsfreie Bergflanken. Trifft die Radarstrahlung nahezu senkrecht auf die Flanken auf, dominiert der Anteil der spiegelnden Reflexion das Rückstreusignal. Alle Elementarstreuer besitzen dann annähernd dieselbe Phase. RANEY (1998) sieht hier aufgrund der Möglichkeit der Erkennung solcher Regionen die Chance, die radiometrische Reliefkorrektur zu verbessern. Weitere Wege, den Informationsgehalt des Speckle zu nutzen, sind in RANEY (1998) beschrieben. Zu ihnen zählen die Histogrammanalyse, die Texturverbesserung und die Kohärenzschätzung.

2.1.2 Die Radargleichung

Die Radargleichung ermöglicht einen guten Überblick über jene Parameter, die sich auf die Rückstreuintensität auswirken. Die Phase sowie polarimetrische Effekte bleiben hier unberücksichtigt. Dieser Abschnitt orientiert sich an den Ausführungen von SEIFERT & ZINK (1993) sowie LEWIS & HENDERSON (1998).

Wird ein Dipol zum Schwingen angeregt, beginnt er elektromagnetische Wellen zu emittieren. Diese breiten sich in alle Richtungen im Raum aus. Die Energiedichte der sich ausbreitenden Welle nimmt dabei mit der Entfernung zum Dipol ab. Nimmt man an, dass sich die Wellen in alle Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit ausbreiten, bilden die Wellenfronten eine Kugeloberfläche. Die Größe der Kugeloberfläche hängt von der Entfernung der Wellenfront zum Dipol, bzw. der Laufzeit der Welle ab. Somit ist die Energiedichte an der Wellenfront umgekehrt proportional zur Laufzeit. Daraus ergibt sich die folgende Gleichung für die Energiedichte der elektromagnetischen Wellen in Abhängigkeit von der Laufzeit:

$$E_z = \frac{E_s}{4\pi(c \cdot t)^2} \quad 2.2$$

In diesem Term ergibt sich aus c (Lichtgeschwindigkeit) und t (Laufzeit der Welle) die Entfernung zum Sender. Der Nenner beschreibt demnach eine Kugeloberfläche. Mit E_s bzw. E_z wird die Energiedichte am Sender bzw. in einer bestimmten Entfernung beschrieben.

Trifft das emittierte Signal auf ein Objekt, wird eine bestimmte Menge der auftreffenden Energie absorbiert. Der andere Teil wird reflektiert. Das Objekt kann nun als Mikrowellensender betrachtet werden. Ein Teil dieser Mikrowellen gelangt wieder zurück zum Sensor und wird dort registriert. Anhand der dort eintreffenden Energiemenge berechnet sich der Radar-Rückstreuquerschnitt σ . Der Radarrückstreuquerschnitt ist demzufolge ein Maß der Reflexionscharakteristik eines Objektes für elektromagnetische Wellen einer bestimmten Frequenz. Er ist abhängig von den geometrischen und dielektrischen Eigenschaften sowie der Größe des Zielobjektes. Die Einheit für σ ist Quadratmeter. Damit wird die Größe einer virtuellen Fläche beschrieben, die ein Ziel aufweisen müsste, um bei angenommener isotroper Reflexion des einfallenden Signals am Sensor dieselbe Signalintensität zu erzeugen wie das tatsächliche Objekt. Aufgrund des enormen Wertebereichs wird dieser Parameter üblicherweise logarithmiert.

Die Energiemenge, die von diesem Objekt Richtung Sensor ausgesandt wird, ergibt sich also aus σ multipliziert mit Gleichung 2.2. Auch hier reduziert sich die Energiedichte mit der Entfernung. Die am Sensor Eintreffende Energie ist dementsprechend wieder umgekehrt proportional zur zurückgelegten Distanz. Der von der Antenne tatsächlich empfangene Anteil der Rückstreuung richtet sich nach der effektiven Antennengröße A_e . Daraus ergibt sich folgende Gleichung für die gesamte empfangene Energie E_r :

$$E_r = \frac{E_s \cdot G}{4\pi(c \cdot t)^2} \cdot \sigma \cdot \frac{1}{4\pi(c \cdot t)^2} \cdot A_e \quad 2.3$$

Diese Gleichung wird als die Radargleichung bezeichnet. Der Faktor G wurde eingeführt, da Radarsensoren gerichtet und nicht isotrop strahlen. Somit ist G ein Maß für die Bündelung der Mikrowellenstrahlung.

Die effektive Antennengröße ist eine Funktion der Wellenlänge λ sowie des Gewinns G . Verwendet man dieselbe Antenne als Sender und Empfänger erhält man durch Einsetzen dieses Zusammenhangs in Gleichung 2.3 nach der Zusammenfassung die folgende Gleichung:

$$E_r = \frac{E_s \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot (c \cdot t)^4} \quad 2.4$$

Anhand dieser Gleichung kann E_r für einzelne Punktstreuer berechnet werden. In der Radarfernerkundung erfolgt die Rückstreuung jedoch an Flächen mit einer Dimension A (Auflösungszelle). Die von einer Auflösungszelle empfangene Energie steigt mit deren Fläche. Der Radarrückstreuoeffizient σ^0 bezeichnet daher die Radarrückstreuung für eine Einheitsfläche. Der gesamte Rückstreuquerschnitt einer Auflösungszelle ergibt sich aus deren Fläche multipliziert mit σ^0 . Entsprechend der Gleichung 2.4 für Punktstreuer ergibt sich der folgende Zusammenhang für flächenhafte Ziele:

$$E_r = \frac{E_s \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot (\sigma^0 \cdot A)}{(4\pi)^3 \cdot (c \cdot t)^4} \quad 2.5$$

2.1.3 Besonderheiten der Bildgeometrie

Abbildende Radarsensoren müssen als Seitensichtsysteme arbeiten. Anderenfalls wäre keine eindeutige Entfernungszuordnung der Auflösungszeilen in *Range* möglich. Aus dieser Notwendigkeit ergeben sich spezifische geometrische Eigenschaften der Radaraufnahmen. Selbst bei flachem Relief entspricht die Bildgeometrie des Radarbildes nicht den tatsächlichen Verhältnissen (*Ground Range*). Mit zunehmender Entfernung zum Sensor bzw. abnehmendem Abstrahlungswinkel (*Depression Angle*) werden die *Range*-Bildzeilen gestreckt. Die Aufnahmegeometrie eines Seitensichtradars wird als Schrägentfernungsgeometrie bzw. *Slant Range* bezeichnet. Diese inhärente Eigenschaft von abbildenden Radarsystemen wird durch die impuls-längengesteuerte Auflösung in *Range* bewirkt. Je kleiner der Winkel zwischen der Oberfläche und der einfallenden Radarstrahlung wird, desto länger ist der durch den Impuls beleuchtete Bereich der Oberfläche (Abb. 2.5). Objekte mit denselben Dimensionen in *Range* werden im *Slant Range* Bild mit zunehmender Entfernung zum Sensor und steigendem Einfallswinkel länger dargestellt. Dieser Effekt ist bei SAR-Systemen mit einem großen Öffnungswinkel in *Range* besonders ausgeprägt.

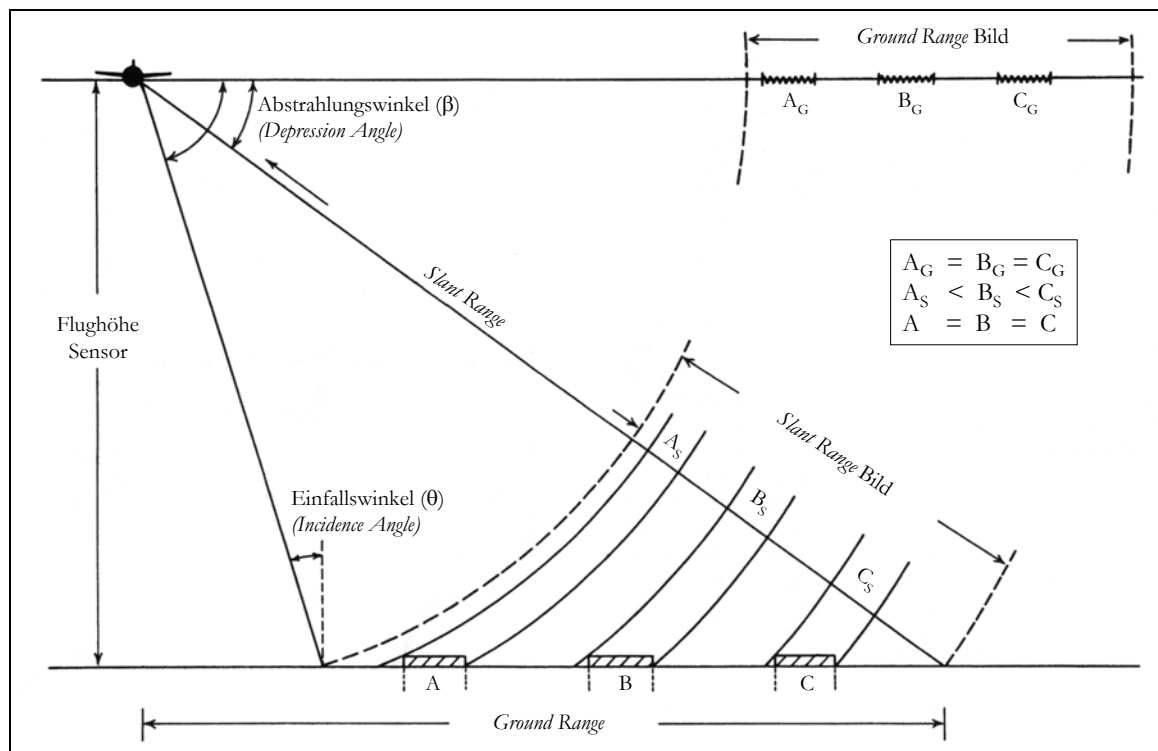


Abb. 2.5: Abbildungsgeometrie eines Radarbildes, verändert nach LEWIS & HENDERSON 1998, S. 146

Für flaches Gelände ist die Umrechnung des *Slant Range* Bildes in die *Ground Range* Geometrie auf Basis einfacher Winkelfunktionen zu bewerkstelligen. Ist jedoch das beflogene Gebiet durch ein ausgeprägtes Relief gekennzeichnet oder befinden sich Objekte einer bestimmten Höhe im Befliegungsstreifen, kommen weitere geometrische Besonderheiten hinzu.

Aufgrund der schrägen Aussendung der Mikrowellen gibt es Bereiche im Gelände, die nicht von der Strahlung erreicht werden. Über diese Bereiche, welche sich im sogenannten Radarschatten befinden, liegen im Radarbild keinerlei Informationen vor. Radarschatten entsteht beispielsweise an sensorabgewandten Waldkanten oder hinter Gebäuden. Auch durch das Relief kann ein Radarschatten hervorgerufen werden. Er entsteht dann, wenn der Neigungswinkel der sensorabgewandten Komponente eines Hanges größer ist als der Depressionswinkel β (Punkt B in Abb. 2.6)

Weitere durch Höhenunterschiede innerhalb einer Radarszene hervorgerufene geometrische Besonderheiten sind *Foreshortening* und *Layover* (Abb. 2.6). Beide Effekte entstehen dadurch, dass die Entfernung in *Range* zum Sensor anhand der Laufzeit der elektromagnetischen Wellen ermittelt wird. Da sich die Entfernung eines Objektes zum Sensor mit dessen Höhe verringert, verkürzt sich auch die Laufzeit. Das Resultat ist, dass sich dieses Objekt im *Slant Range* Bild Richtung Sensor (Punkt C in Abb. 2.6) verschiebt (*Foreshortening*). Diese Erscheinung kann im Extremfall so weit gehen, dass das Rückstreusignal dieses Objektes zur selben Zeit vom Sensor registriert wird, wie das Signal eines diesem Objekt in Richtung Sensor vorgelegten Streuers niedrigerer Höhe (Punkte F & G in Abb. 2.6). In diesem Fall überlagern sich die Signale beider Objekte im Radarbild (*Layover*), obwohl sie in *Ground Range* verschiedene Positionen besitzen.

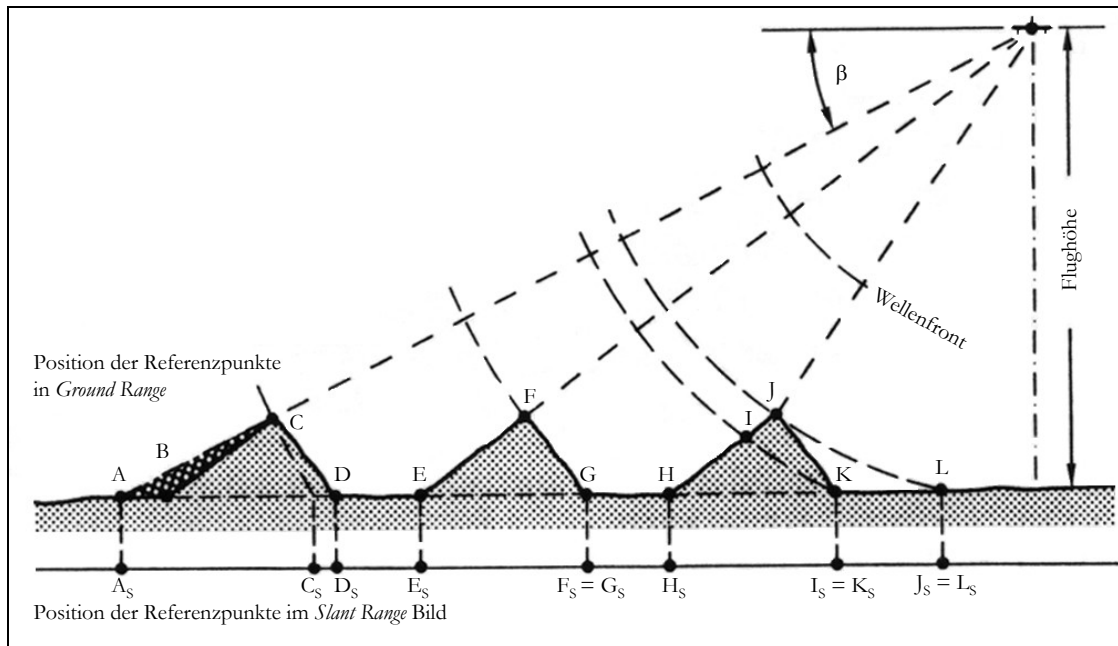


Abb. 2.6: Auswirkung der erhöhten Lage von Objekten auf ihre *Slant Range* Position
verändert nach ALBERTZ 1991, S. 73

Das Auftreten von *Foreshortening* und *Layover* wird durch ein starkes Relief und große Depressionswinkel begünstigt. Die Umrechnung der *Slant Range* Geometrie in *Ground Range* ist für Radaraufnahmen eines nicht ebenen Geländes ohne *a priori* Wissen nicht zu bewerkstelligen. Dieses nötige Wissen steht jedoch zumeist in Form eines Geländemodells zur Verfügung.

Eine weitere Besonderheit der Radarfernerkundung ist die Möglichkeit, dass ein Objekt in erhöhter Lage h über einer glatten Oberfläche mehr als einmal im Radarbild abgebildet wird. Dieses Phänomen kann primär an künstlichen Streuern mit einer starken Reflexion beobachtet werden. Bedingt wird diese Erscheinung durch das Vorhandensein mehrerer Rückstreupfade. In Abb. 2.7 ist diese Situation beispielhaft anhand eines Fußballtores dargestellt. Neben der direkten Reflexion am Querbalken ist ein weiterer Reflexionspfad vorhanden. Ein Teil der vom Querbalken nach unten reflektierten Strahlung wird spiegelnd zurück zum Sensor geleitet. Während im ersten Fall aufgrund der erhöhten Lage des Objektes *Foreshortening* auftritt, ist der Reflexionspfad im Fall der doppelten Reflexion (*Double Bounce*) deutlich länger. Das Abbild des Balkens verlagert sich nach hinten. Die tatsächliche Position des Querbalkens befindet sich also zwischen den beiden Erscheinungen im Radarbild. Der vorgestellte Fall des *Double Bounce* verläuft ebenso in der umgekehrten Richtung. Dabei ist die Wegstrecke, welche die Mikrowellenstrahlung zurücklegen muss, in beiden Richtungen dieselbe.

Voraussetzung für das Auftreten dieser Erscheinung ist das Vorhandensein eines starken isotropen Streuers, der sich in einer erhöhten Lage zu einer spiegelnd reflektierenden Oberfläche befindet. Fungiert der Streuer als Dipol, muss die Schwingungsebene der elektromagnetischen Wellen parallel zu diesem Dipol sein. Zu beobachten ist dieses Phänomen besonders häufig an Brücken über Gewässer, bei hohen Gebäuden aus einem Baustoff mit hoher Dielektrizitätskonstante, bei Überlandleitungen und deren Stahlmasten, aber auch an Waldkanten, sofern glatte Oberflächen wie geggte Felder vorgelagert sind.

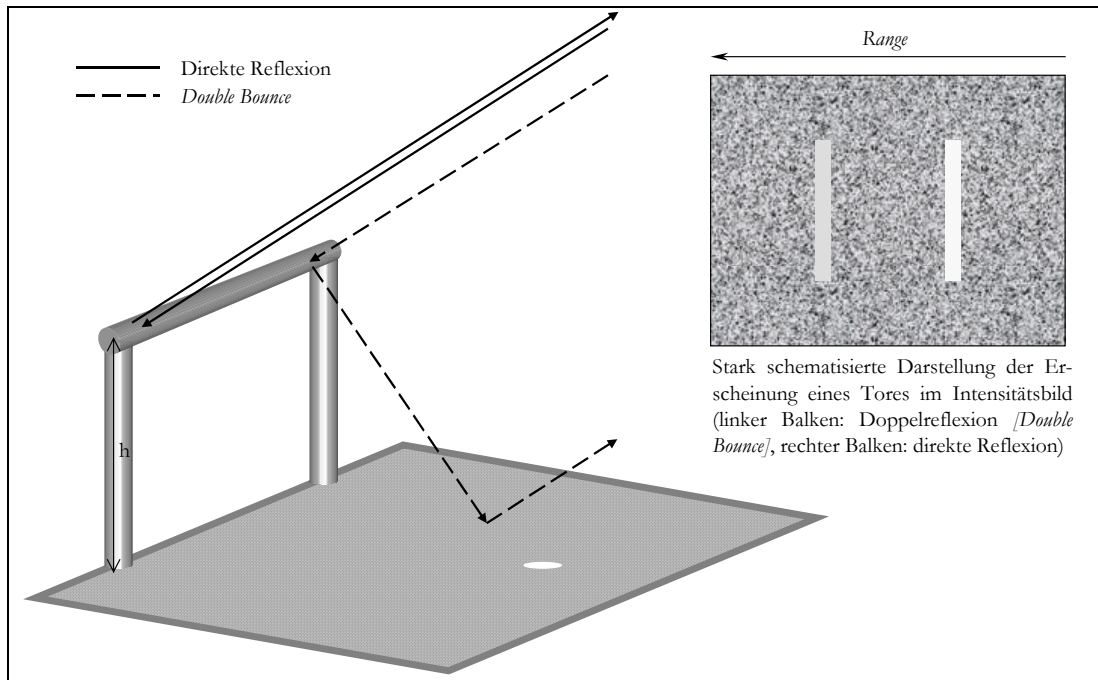


Abb. 2.7: Unterschiedliche Rückstreupfade am Beispiel eines Fußballtores (HH-Polarisation, L-Band)

2.1.4 SAR Parameter

Die weltweit zur Verfügung stehenden SAR-Systeme sind durch spezifische Systemparameter charakterisiert. Je nach Aufgabenstellung fällt die Wahl auf einen bestimmten Sensor. Für den Anwender sind vor allem die Parameter Wellenlänge, Polarisation, geometrische Auflösung und Depressionswinkelbereich von Interesse. Die Frage der geometrischen Auflösung wurde bereits besprochen. Je nach System variiert sie zwischen einem und einhundert Metern für eine Auflösungszelle (RANEY 1998). Aufgrund der technischen Möglichkeiten bringt bei den meisten SAR-Systemen eine höhere geometrische Auflösung eine geringere Aufnahmestreifenbreite mit sich.

Der Depressionswinkelbereich beeinflusst maßgeblich die geometrischen Eigenschaften des SAR Bildes. Operiert ein System mit geringen Depressionswinkeln bzw. großen Einfallswinkeln, treten geometrische Effekte wie *Foreshortening* und *Layover* in den Hintergrund. Dafür müssen Schattenbereiche und große Beleuchtungsunterschiede aufgrund der hohen Bandbreite des Lokalen Einfallswinkels (*LLA* – Winkel zwischen Geländenormaler und einfallender Strahlung) in Kauf genommen werden. Systeme mit einem breiten Spektrum an Einfallswinkeln, dies gilt insbesondere für die meisten flugzeuggetragenen Sensoren, gestalten aufgrund der Sensitivität für alle geometrischen Effekte die Umrechnung der *Slant Range* Geometrie in *Ground Range* besonders anspruchsvoll. Sie sind daher für Gebiete mit starkem Relief weniger geeignet (LEWIS & HENDERSON 1998).

Die Wellenlänge λ bzw. Frequenz f (Gl. 2.6, c = Lichtgeschwindigkeit) bestimmen maßgeblich die Art der Informationen eines Radarbildes. Dieses Faktum begründet sich mit der zunehmenden Eindringtiefe der Mikrowellenstrahlung in Medien mit steigender Wellenlänge.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Kurzweilige Radarstrahlung wird beispielsweise bereits an den Blättern des Kronendachs reflektiert, während lange Wellen die Kronen durchdringen und erst an starken Ästen und Stämmen zur Reflexion kommen. Analog dazu nimmt die Eindringtiefe in den Boden mit der Wellenlänge zu. Wie weit die Mikrowellenstrahlung tatsächlich in ein Medium eindringt, wird durch dessen Dielektrizitätskonstante gesteuert (ULABY et al. 1986).

Die Einteilung des gesamten Frequenzbereichs der Mikrowellen in Bänder entstammt dem Militär. Das Spektrum reicht vom kurzwelligen K-Band ($\lambda \approx 1$ cm) bis zum P-Band ($\lambda \approx 70$ cm). Dazwischen liegen das X-, C-, S-, sowie das L-Band. Eine Sonderstellung nimmt das VHF-Band mit einer Wellenlänge von bis zu 15 m ein (ISRAELSSON et al. 1997). Die Radarbänder legen keine spezifische Frequenz fest, sondern umfassen einen Frequenzbereich. So kann möglicherweise bei genauerer Betrachtung zweier im selben Band operierender Systeme ein Unterschied in der tatsächlichen Wellenlänge vorgefunden werden. In der Praxis wird jedoch angestrebt, für die jeweiligen Bänder dieselben Frequenzen zu verwenden. Damit soll eine Vergleichbarkeit der Daten verschiedener Sensoren gewährleistet werden. Eine umfassende Zusammenstellung verfügbarer Sensoren und deren Frequenzen findet sich in LEWIS & HENDERSON (1998).

Neben der Wellenlänge bestimmt die Polarisation den Informationsgehalt des Radarbildes. Dabei kann die Basis der Polarisation des elektrischen Feldvektors linear, elliptisch oder zirkular sein. Am gebräuchlichsten ist jedoch die lineare Basis. Ausgesendet wird entweder horizontal (H) oder vertikal (V). Ist der Empfänger in derselben Polarisationssebene ausgerichtet wie der Sender, spricht man von Kopolarisation (HH, VV). Jene Dipole, die entsprechend der Polarisation der ausgesandten Strahlung ausgerichtet sind, besitzen für diese Polarisationssebene eine hohe Rückstreuung.

Im Gegensatz zur Kopolarisation stehen bei der Kreuzpolarisation Sende- und Empfangspolarisation orthogonal zueinander (HV, VH). Ausschließlich depolarisierend wirkende Streuer tragen zur Rückstreuung bei. Daher ist das Verhältnis von Signal zu Rauschen (*Signal to Noise Ratio* - SNR) bei der Kreuzpolarisation deutlich schlechter als bei der Kopolarisation (LEWIS & HENDERSON 1998). Dennoch sind die Kreuzpolarisationen bedeutsam. In Verbindung mit den Kopolarisationen sind sie die Voraussetzung für die Messung der komplexen Streumatrix [S], auf der die Polarimetrie aufsetzt (CLOUDE 1992). Eine ausführliche Behandlung dieser Thematik findet sich im Abschnitt 2.2.2.

Die Auswahl eines SAR-Datensatzes richtet sich zwar in erster Linie nach den oben besprochenen Parametern. Jedoch ist ein steter Zuwachs von Anwendungen mit hohen Anforderungen an die absolute radiometrische Genauigkeit zu verzeichnen. Neben der Kalibrierengenauigkeit (siehe hierzu ZEBKER et al. 1991, FREEMAN 1992, ULANDER 1995, SARABANDI et al. 1995, ZINK & BAMLER 1995 & SATAKE et al. 2001) spielt auch das SNR eines Datensatzes eine wesentliche Rolle. Die Signalstärke lässt sich aus der Radargleichung (Abschnitt 2.1.2) herleiten. Das Rauschen eines SAR-Systems, welches u.a. durch die systeminternen Stromflüsse entsteht, ist nicht direkt zu berechnen. Es kann jedoch für den Fall, dass kein Signal vorliegt, gemessen werden. Der gemessene Betrag wird dann vom gesamten Bild subtrahiert. Das SNR lässt sich in Anlehnung an CURLANDER 1991 wie folgt berechnen:

$$SNR = \frac{E_r \cdot \rho_r}{v \cdot F \cdot T \cdot k} \quad 2.7$$

Somit verbessert sich das SNR mit der Zunahme der Signalstärke E_r und der Größe einer Auflösungszelle in Ground Range ρ_r . Es verschlechtert sich mit der Geschwindigkeit des Sensors und dem Rauschterm $F \cdot T \cdot k$, wobei F einen Rauschfaktor, T die äquivalente Rauschtemperatur und k die Boltzmannkonstante repräsentieren. Das Verhältnis von Signal zu Rauschen hängt also vom Radar-Sensor und den Eigenschaften des beflogenen Gebietes ab.

2.2 Aktuelle Ansätze der SAR-Fernerkundung

Ein SAR zeichnet den Amplituden- und Phasenverlauf des reflektierten Signals auf. Die Amplitude ist ein Maß dafür, wie stark das Radarsignal von einem Streuer Richtung Sensor reflektiert wird. Befinden sich mehrere Streuer in einer Auflösungszelle, ist aufgrund der kohärenten Additionsweise der Rückstreuanteile der Einzelstreuer auch deren Verteilung innerhalb der Zelle relevant. Die Phase ist im Gegensatz zur Amplitude unabhängig von der rückgestreuten Energiemenge. Sie beschreibt den Zustand des elektrischen Feldvektors der reflektierten elektromagnetischen Welle am Sensor. Sie gibt also an, in welcher Phase der Sinusschwingung sich der elektrische Feldvektor beim Auftreffen der Welle auf die Antenne befindet. Der Phasenwert ist zum einen von der Entfernung zwischen Sensor und Streuer und zum anderen von dem am Streuer stattfindenden Streuprozess abhängig. Die Phase setzt sich demnach aus einer Entfernungskomponente und der sogenannten Objektphase zusammen. Beide Phasenkomponenten sind unabhängig voneinander, können aber anhand eines einzelnen Phasenbildes nicht aufgelöst werden. Ein einzelnes Phasenbild birgt keine nutzbare Information.

Wird ein zweites Phasenbild von einer anderen Position aus aufgezeichnet, kann die Phasenmischinformation aufgelöst werden. Unter der Voraussetzung, dass dieselben Objekte auch dieselbe Objektphase besitzen, wird diese bei der Subtraktion beider Phasenbilder eliminiert. Zurück bleibt die Entfernungskomponente. Diese Vorgehensweise bildet die Grundlage der SAR Interferometrie (Abschnitt 2.2.1).

Bei der Polarimetrie (Abschnitt 2.2.2) werden Phasenbilder verschiedener Polarisierungen von derselben Antennenposition aus aufgenommen. Die entfernungsabhängige Komponente ist also bei allen Bildern gleich. Dadurch wird die Objektphase herausgearbeitet. Die jeweilige Objektphase ist das Resultat der in einer Auflösungszelle stattfindenden Streuprozesse. Da Streuprozesse in der Regel stark polarisationsabhängig sind, unterscheidet sich die Objektphase für die unterschiedlichen Polarisierungen. Anhand dieser Unterschiede können physikalische Oberflächenparameter abgeleitet werden.

2.2.1 SAR-Interferometrie

Das Grundprinzip der SAR-Interferometrie erfordert mindestens zwei Phasenbilder eines Gebietes. Der Informationsgehalt dieser Daten und die Art der Auswertung ist von einer Reihe von Parametern abhängig. Dazu gehören die jeweilige Position des Sensors sowie der zeitliche Abstand zwischen den Aufnahmen. Aus den Sensorpositionen während der Aufnahmen ergibt sich der jeweilige Abstand zwischen beiden Fluglinien der Plattform. Dieser wird als *Baseline* [B] bezeichnet. Entscheidend für die Extrahierung topographischer Informationen ist, dass ein Objekt aus zwei unterschiedlichen Blickwinkeln (*Look Angle*) aufgenommen wird.

Die zeitliche Differenz zwischen den Aufnahmen hängt vom SAR System ab. Bei einmal passierenden (*Single Pass*) Sensoren geht die Zeitdifferenz gegen Null. Die *Baseline* kommt durch zwei in Abstrahlungsrichtung versetzt angebrachte Antennen zustande. Diese Konfiguration kommt hauptsächlich bei flugzeuggetragenen Systemen zur Anwendung. Die bislang einzige Ausnahme stellt die SRTM Mission dar (ROTH et al. 2000, SCHMULLIUS et al. 2000). Die aufgrund der orbitalen Flughöhe benötigte große *Baseline* wurde durch einen speziellen Verbindungsmast zwischen Shuttle und zweiter Antenne erreicht.

Satellitengetragene SAR Systeme besitzen keine versetzten Antennen. Um einen interferometrischen Datensatz zu erzeugen, müssen sie ein Gebiet wiederholt (*Repeat Pass*) überfliegen. Der zeitliche Abstand zwischen den Aufnahmen richtet sich dann nach der Repetitionsrate der Satelliten. Eine Ausnahme bildete die Tandemkonfiguration der europäischen Radarsatelliten ERS-1 und ERS-2. Die baugleichen Sensoren

überflogen dasselbe Gebiet mit einer zeitlichen Differenz von nur einem Tag (MADSEN & ZEBKER 1998). Die *Repeat Pass* Konfiguration wurde ebenfalls bei flugzeuggetragenen Sensoren erprobt (GRAY 1993, ULBRICHT 1999, WILKINSON et al. 2001). Vor allem aufgrund der anspruchsvollen Bewegungskompensation kam diese Methode lediglich in Experimenten zum Einsatz.

Um die Objektphase eliminieren zu können, muss sie in allen Aufnahmen gleich sein. Der Phasenunterschied zwischen den Bildern ist dann entfernungsbedingt. Ein Maß für die diesbezügliche Gleichheit zweier komplexer SAR Bilder ist die Interferometrische Kohärenz. Nur bei ausreichender Kohärenz ist eine interferometrische Phasenauswertung möglich. Im Allgemeinen gilt: die Interferometrische Kohärenz verringert sich mit der Erhöhung der *Baseline* und der zeitlichen Differenz zwischen beiden Aufnahmen.

Unter idealen Voraussetzungen kann die Objektphase vollständig beseitigt werden. In diesem Fall ist der Informationsgehalt der Daten von der *Baseline* abhängig. Ist sie größer Null, werden die Unterschiede in der entfernungsabhängigen Phasenkomponente zwischen beiden Bildern durch die Topographie hervorgerufen. Demnach eignen sich diese Phasenbilderpaare, um Reliefinformationen zu gewinnen.

Ist die *Baseline* Null, sind die Entfernungskomponenten in beiden Phasenbildern gleich. Wird das Phasenbilderpaar zu selben Zeit aufgezeichnet, sind beide Aufnahmen identisch. Besteht jedoch ein zeitlicher Unterschied zwischen den Aufzeichnungen, kann das Interferogramm Informationen zur Dynamik innerhalb der Szene enthalten. Sehr kurze Zeitdifferenzen in der Größenordnung von Millisekunden lassen auf die Geschwindigkeit von Objekten wie beispielsweise Ozeanwellen oder militärischen Zielen schließen (MADSEN & ZEBKER 1998). Systeme mit der Kapazität, solche Daten zu generieren, besitzen zwei in Flugrichtung hintereinander angebrachte Antennen. Größere Zeitspannen wie Tage werden für die Differentielle Interferometrie verwendet, um topographische Unterschiede zwischen den beiden Aufnahmen, z.B. infolge eines Erdbebens, zu messen (GABRIEL et al. 1989).

2.2.1.1 Interferometrische Kohärenz

Die Interferometrische Kohärenz γ ist ein Maß für die Korrelation zweier komplexer Datensätze (SCHWÄBISCH 1997). Die Berechnung erfolgt in Anlehnung an ZEBKER & VILLASENOR (1992) nach der folgenden Gleichung. Dabei stehen s_1 und s_2 für die komplexen Daten beider Bilder.

$$\gamma = \frac{\langle s_1 \cdot s_2^* \rangle}{\sqrt{\langle |s_1|^2 \rangle \langle |s_2|^2 \rangle}} \quad 2.8$$

Ist die Objektphase beider Datensätze gleich, ist unter Voraussetzung eines hohen SNR die Interferometrische Kohärenz maximal. Ein Ziel der SAR Interferometrie ist die Erzeugung von Höhenmodellen. In diesem Fall müssen *Baseline* bzw. *Look Angle* größer Null sein. Demzufolge werden die Streuer in beiden Aufnahmen von unterschiedlichen Positionen aus betrachtet. In diesem Zusammenhang ändert sich auch deren Rückstreuverhalten. Auch kleine Änderungen der Objektphase von Elementarstreuern innerhalb einer Auflösungszelle können aufgrund der Vektoraddition zu entscheidenden Veränderungen der gesamten Objektphase und somit auch der Verteilung des Speckle führen. Dieser Zusammenhang zwischen zunehmender *Baseline* und Veränderung der Objektphase wird als räumliche Dekorrelation bezeichnet. Überschreitet die Länge der *Baseline* einen kritischen Wert (kritische *Baseline*) erfolgt die vollständige Dekorrelation beider Datensätze. Die Berechnung brauchbarer Interferogramme ist dann nicht mehr möglich (ZEBKER & VILLASENOR 1992, MADSEN & ZEBKER 1998).

Im Gegensatz zur räumlichen Dekorrelation ändert sich bei der temporalen Dekorrelation die Objektphase aufgrund der Veränderung der Objekte mit der Zeit. Allein kleinste Veränderungen können zur Dekorrelation führen. Beispiele hierfür sind Vegetationswachstum, die Änderung von Blattstellungen durch Niederschläge oder Wind oder auch anthropogen erzeugte Umgestaltungen. Im Regelfall nehmen derartige Veränderungen und somit auch die temporale Dekorrelation mit der Zeit zu (ZEBKER et al. 1994a). Die Verwendung größerer Wellenlängen kann dieses Problem etwas mildern, aber nicht beseitigen (GRAY & FARRIS-MANNING 1993). Letztlich bleibt nur die Möglichkeit, kurze Intervalle zu wählen.

Ein dritter, die Kohärenz verschlechternder Faktor ist das Systemrauschen. Es beeinflusst neben der Amplitude auch den Phasenverlauf. Für Bildbereiche mit einem starken Rückstreusignal und demzufolge einem hohen SNR ist der Rauschanteil am Gesamtsignal vernachlässigbar. Bei Arealen mit sehr geringer Radarrückstreuung wie glatten Wasserflächen wird nur ein sehr geringes SNR erzielt. In diesen Fällen ist der Störeinfluss des Rauschens auf die Phase massiv. Die Phaseninformation ist für diese Bildbereiche nicht nutzbar.

Kohärenzbilder beinhalten nutzbare Informationen. Korrelationsverluste zwischen zeitlich versetzten Aufnahmen weisen auf Veränderungen der Landoberfläche hin. Eine hohe Kohärenz ist vor allem bei Siedlungsflächen und vegetationsfreien, unveränderlichen Gebieten zu erwarten (WU et al. 1996). Wasserflächen neigen aufgrund des geringen SNR und der Variabilität durch Wellen zur vollständigen Dekorrelation (SCHWÄBISCH 1997). Vegetationsbestandene Gebiete sind ebenfalls durch eine geringe Kohärenz gekennzeichnet. Allerdings ist dieser Zusammenhang von der Wellenlänge abhängig (GRAY & FARRIS-MANNING 1993).

Aufgrund dieser Eigenschaften bietet sich die interferometrische Kohärenz etwa als eine Grundlage für Landnutzungsklassifikationen an (SCHWÄBISCH 1997, HOCHSCHILD et al. 2000). WEGMÜLLER (1997) und HAJNSEK (2003) nutzen diesen Parameter für die Ermittlung der Oberflächenrauigkeit. Der Zusammenhang zwischen Waldbiomasse und interferometrischer Kohärenz wurde u.a. von ASKNE et al. (1997), WILKINSON et al. (2001), ERIKSSON et al. (2003) und SANTORO et al. (2004) untersucht.

2.2.1.2 Generierung von Höhenmodellen aus interferometrischen SAR Daten

Das Potenzial der Radarfernerkundung hinsichtlich der Messung der Topographie wurde bereits von ZISK (1972) erkannt. Er untersuchte die Mondtopographie mit der Erde als Plattform. Die Versuchsanordnung dieses Experiments umfasste unter anderem zwei 1200 Meter auseinander gelegene Antennen von 18 bzw. 36 Metern Länge. GRAHAM (1974) stellte das erste flugzeuggetragene interferometrisch arbeitende Radarsystem vor. Die Datenauswertung erfolgte dabei analog mit optischen Verfahren. Die Höheninformation wurde zeilenweise auf einem Film gespeichert.

Die prinzipielle Systemanordnung für SAR Interferometrie ist in Abb. 2.8 dargestellt. Ein Punkt T mit einer Höhe h_T über der Referenzhöhe h_0 wird von einem SAR aus zwei unterschiedlichen Positionen P_1 und P_2 registriert. Die Distanzen d_1 und d_2 ergeben sich aus der Entfernung zwischen T und P_1 bzw. P_2 , wobei gilt: $d_1 = d_2 + \Delta d$. Die Strecke zwischen P_1 und P_2 ergibt die *Baseline* B, die in eine senkrechte (B_{\perp}) und eine vertikale Komponente (B_{\parallel}) zerlegt werden kann. Die Phase ϕ_x für T ergibt sich dann je nach Sensorposition P_x wie folgt (Gl. 2.9):

$$\phi_x = 4\pi \frac{d_x}{\lambda} + \phi_{\text{Objekt}} \quad 2.9$$

Die für T gemessene Phase ist also eine Funktion der Entfernung zwischen Sensor und Objekt, der Wellenlänge λ sowie der Objektphase ϕ_{Objekt} . Für eine *Baseline* B kleiner der kritischen *Baseline* ist die Objektphase für beide Antennenpositionen P₁ und P₂ annähernd identisch. Bei der Berechnung der Phasendifferenz $\Delta\phi$ für T zwischen beiden Antennenpositionen wird daraus resultierend der Einfluss der Objektphase beseitigt. Somit ergibt sich Gl. 2.10:

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = 2\pi \frac{\Delta d}{\lambda} \cdot p \quad 2.10$$

Für eine gegebene Wellenlänge wird die Phasendifferenz $\Delta\phi$ somit ausschließlich von Δd bestimmt. Der Wert des Faktors p richtet sich nach dem Aufnahmesystem. Er beträgt eins, wenn nur eine von beiden Antennen als Sender fungiert (*Single Pass* Interferometrie). Bei *Repeat Pass* Systemen gilt $p = 2$ (MADSEN & ZEBKER 1998). Unter Voraussetzung der Aufnahmegeometrie aus Abb. 2.8 gilt folgende Beziehung:

$$d_2^2 = d_1^2 + B^2 - 2d_1 B \sin(\theta - \alpha) \quad 2.11$$

$$\Delta d = \sqrt{d_1^2 + B^2 - 2d_1 B \sin(\theta - \alpha)} - d_1$$

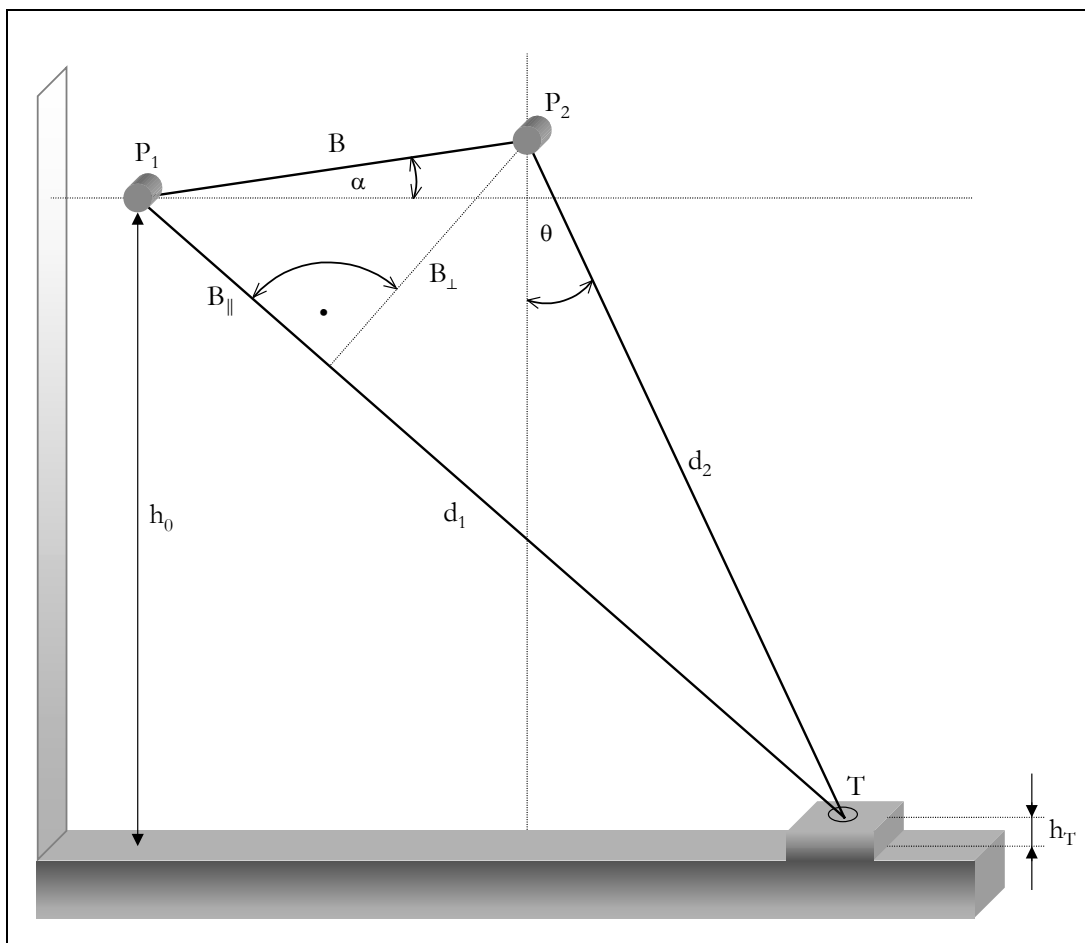


Abb. 2.8: Prinzipielle Darstellung der Systemanordnung für SAR Interferometrie

Unter Einbeziehung des Zusammenhangs zwischen der Höhe b des Sensors über dem Objekt T ($b = h_0 - h_T$), der Distanz d_x zwischen P_x und T sowie dem Winkel θ_x (Gl. 2.12):

$$h = d_x \cdot \cos(\theta_x) \quad 2.12$$

ergibt sich die Gleichung zur Berechnung von h in Abhängigkeit der Bahnparameter sowie der Phasendifferenz (ZEBKER & GOLDSTEIN, 1986):

$$h = d_1 \sin\left(\cos^{-1} \frac{\Delta\phi\lambda}{2\pi B} - \alpha\right) \quad 2.13$$

Somit lässt sich die Höhe jedes Punktes anhand messbarer Parameter bestimmen. Die Höhengenaugigkeit dieses Verfahrens liegt für satellitengelegene Systeme im Bereich von Metern. Flugzeuggetragene Sensoren können Genauigkeiten im Zentimeterbereich erlangen (PAPATHANASSIOU 1999, HELLMANN 2000).

Der Phasenverlauf wird vom SAR jedoch lediglich im Bereich $[0, 2\pi]$ aufgezeichnet. Dieser Umstand führt im Interferogramm zu Mehrdeutigkeiten. Diese äußern sich in einem Streifenmuster, den sogenannten *Fringes*. Die Höheninformation ist also in einem Bild aus Interferenzstreifen verpackt, wobei ein Streifen den Höhenunterschied repräsentiert, der entsprechend der Aufnahmegeometrie einem kompletten Phasendurchlauf entspricht. Nach Entfernung des „Terms der flachen Erde“ aus dem Interferogramm könnte durch Auszählen und Aufrechnen der *Fringes* die relative Höhe verschiedener Punkte zueinander bestimmt werden. Dieser Prozessierungsschritt, welcher in der Regel mit digitaler Rechentechnik erfolgt, wird als *Phase Unwrapping* bezeichnet. Dabei handelt es sich um das Aufintegrieren der relativen zur absoluten Phase. Mit der Entwicklung einer sicheren Lösung dieses Problems haben sich unter anderem GOLDSTEIN et al. (1988), GHIGLIA & ROMERO (1994), JUST et al. (1995) sowie DAVIDSON & BAMLER (1996) befasst. Die Schwierigkeit des *Phase Unwrapping* besteht vor allem in der korrekten Aufintegrierung für Bildbereiche mit geringer Kohärenz. Der Algorithmus muss in der Lage sein, zwischen zwei wirklichen Phasenzyklen und zufälligen Phasensprüngen, verursacht durch Störungen wie Rauschen oder *Layover*, zu unterscheiden (GOLDSTEIN et al. 1988). GATELLI et al. (1994) schlagen ein spezielles Spektralfilterverfahren (*Wavenumber Shift*) vor, um den Rauschanteil im Interferogramm zu vermindern.

Der oben erwähnte „Term der flachen Erde“ steht für das Interferogramm, das sich bei der Aufnahme eines völlig flachen Geländes ergeben würde. Die *Fringes* verlaufen parallel zur Flugrichtung und entstehen ausschließlich aufgrund der sich ändernden Entfernung zum Sensor. Dieser Term überlagert die tatsächliche Höheninformation im Interferogramm. Anhand der Aufnahmegeometrie kann dieser Einfluss berechnet und das Interferogramm entsprechend korrigiert werden.

2.2.1.3 Differentielle Interferometrie

Die Differentielle Interferometrie zielt nicht auf Herstellung digitaler Höhenmodelle ab. Mit diesem Verfahren wird die Messung der Veränderung der Topographie ermöglicht (ZEBKER et al. 1994b). Dabei können Differenzen im Millimeterbereich ermittelt werden. Derartige topographische Abweichungen treten beispielsweise nach Erdbeben oder Vulkaneruptionen auf (MASSONNET 1996). GABRIEL et al. (1989) konnten in einem landwirtschaftlich genutzten Gebiet für bestimmte Felder eine Zu- bzw. Abnahme der mittleren Höhe um einige Zentimeter feststellen. Sie führten diese Beobachtung auf das mit der selektiven Bewässerung herbeigeführte lokale Quellen bzw. Schrumpfen der im Boden befindlichen Ton-

minerale zurück. Die Änderung des Höhengniveaus eines Gletschers wurde von SCHWÄBISCH (1997) anhand der differentiellen Auswertung interferometrischer Daten nachgewiesen.

Für die Differentielle Interferometrie werden zwei Interferogramme herangezogen. Die Phasendifferenz zwischen beiden Interferogrammen spiegelt die topographischen Unterschiede wider. Die ursprüngliche topographische Information wird durch diesen Schritt eliminiert. Dabei verhält sich laut ZEBKER et al. 1994b die Phasendifferenz $\Delta\phi$ zwischen beiden Interferogrammen zur topografischen Abweichung Δd wie folgt:

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta d} = \frac{4\pi}{\lambda} \quad 2.14$$

Dabei ist zu beachten, dass Δd die topografische Abweichung entlang der Strecke zwischen der Sensorposition P und dem Ziel T (*Line Of Sight*) repräsentiert. Die Genauigkeit dieses Verfahrens wird laut Gl. 2.14 von der Phasengenauigkeit des Sensors sowie der Wellenlänge bestimmt.

Für die Berechnung der zwei Interferogramme werden mindestens drei Phasenbilder benötigt. Dabei muss das Ereignis, das zur Veränderung der Topographie führte, zwischen der ersten und der letzten Aufnahme liegen (ZEBKER et al. 1994b). Eine Ausnahme wird durch die Möglichkeit gebildet, dass zwei Bilder von derselben Position (*Baseline* = 0) aufgenommen wurden. In diesem Fall besitzt das Interferogramm keine Sensitivität für die Topographie. Lediglich topografische Änderungen werden festgehalten. Für diesen theoretischen Spezialfall werden nur zwei Phasenbilder benötigt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, eines der beiden Interferogramme anhand eines genauen Geländemodells zu berechnen (MASSONNET 1996). Dieser Ansatz kann dann zur Anwendung kommen, wenn aufgrund zu geringer Kohärenz kein zweites Interferogramm erzeugt werden kann. Die Genauigkeit der Ergebnisse ist dann allerdings in erster Linie von der Genauigkeit des Geländemodells abhängig.

Ein Hauptproblem der Differenziellen Interferometrie ist die zeitliche Dekorrelation der Aufnahmen. Werden durch Deformationsprozesse die Streuzentren innerhalb einer Auflösungszelle in ihrer Anordnung oder Erscheinung verändert, reduziert sich die Kohärenz. Dies kann die vollständige Dekorrelation zur Folge haben. Bei großflächiger Deformation der Erdoberfläche bleiben die ursprünglichen Elementarstreuer jedoch zumeist erhalten (PAPATHANASSIOU 1999).

Eine Möglichkeit, das Problem des Kohärenzverlustes zu umgehen, bietet der Ansatz der permanenten Streuer (*Permanent Scatterers* - PS). Hierfür werden innerhalb einer Zeitserie von Aufnahmen desselben Gebietes Streuer gesucht, die im Laufe der Zeit ihre Rückstreucharakteristik beibehalten und somit in jeder der Aufnahmen wiederzufinden sind. Dauerhafte Streuer sind vor allem in besiedelten Gebieten zu finden. Die Phasenauswertung erfolgt dann ausschließlich für diese Streuer. Regionalisierungsverfahren zur flächenhaften Auswertung kommen erst später zur Anwendung. Der Hauptvorteil des PS Verfahrens liegt in der Umgehung des Kohärenzproblems. Zudem können atmosphärische Artefakte von tatsächlichen topographischen Veränderungen abgegrenzt werden (COLESANTI et al. 2001). COLESANTI et al. (2001) konnten mit diesem Verfahren langzeitliche tektonische Prozesse in der Größenordnung von Millimetern dokumentieren.

2.2.2 SAR-Polarimetrie

Die SAR-Polarimetrie befasst sich mit der Auswertung polarimetrischer SAR-Daten inklusive der polarimetrischen Phase. Ein vollpolarimetrischer Datensatz beinhaltet beide Ko- und Kreuzpolarisationen in einer orthogonalen Polarisationsbasis. In der zirkularen Polarisationsbasis sind beispielsweise die folgenden Kanäle verfügbar: RR (rechts - rechts), LL (links - links), RL (rechts - links) sowie LR (links - rechts). Übergeordnetes Ziel der polarimetrischen Auswertung solcher Daten ist die Analyse des Rückstreuverhaltens der Objekte und somit der Schluss auf deren physikalische Eigenschaften.

In den folgenden Abschnitten werden die Grundlagen für die Interpretation polarimetrischer Daten vorgestellt. Dabei wird zunächst auf die Erscheinung und die Beschreibungsformalismen ebener elektromagnetischer (EM) Wellen eingegangen. Die mathematische Beschreibung kann entweder auf der Basis der realen Zahlen (Stokes Vektor) oder im komplexen Zahlenbereich (Jones Vektor) erfolgen. Die EM Welle wird bei der Streuung an einem Objekt verändert. Die Art der Veränderung wird durch die Streumatrix bzw. den Streuvektor beschrieben. Auf der Streumatrix basieren die Ansätze der Dekomposition vollpolarimetrischer SAR-Daten mit physikalisch interpretierbaren Parametern (CLOUDE 1992).

2.2.2.1 Elektromagnetische Wellen

Elektromagnetische (EM) Wellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Ihre Ausbreitung ist dabei nicht an ein Medium gebunden. Sie bestehen stets aus einem veränderlichen elektrischen und einem veränderlichen magnetischen Feld. Die Vektoren beider Felder stehen jeweils senkrecht zueinander (Abb. 2.9) sowie senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Die Veränderung des einen Feldes zieht die Erzeugung des anderen Feldes nach sich. In diesem Sinne sind EM Wellen selbsterhaltend. Dieser Sachverhalt wurde von Maxwell erkannt und wie folgt in Form der ersten beiden Maxwellschen Gleichungen für den allgemeinen Fall (differentielle Form) formuliert:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad 2.15$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 2.16$$

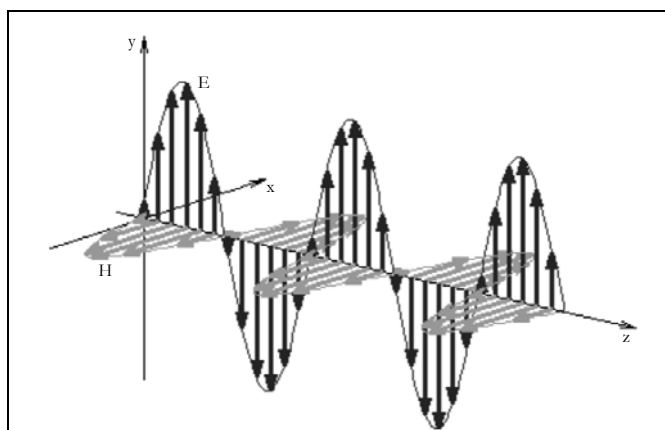


Abb. 2.9: Schematische Darstellung einer linear polarisierten EM Welle

Die erste beider Gleichungen sagt aus, dass ein zeitlich veränderliches (∂t) elektrisches Feld immer die Induktion eines Magnetfeldes H mit sich bringt. Steuergrößen sind Verschiebungsstrom D und der Leistungsstrom (Stromdichte) j . Die zeitliche Veränderung der magnetische Induktion B wiederum, so Gleichung 2.16, erzeugt ein elektrisches Wirbelfeld $\text{rot}\vec{E}$. Anhand dieser sowie der dritten und vierten Maxwellschen Gleichung ist das Verhalten elektromagnetischer Wellen eindeutig beschrieben.

In der SAR-Fernerkundung werden in der Regel monochromatische EM Wellen verwendet. Das heißt, es kommt je eine diskrete Frequenz in einer Polarisation zum Einsatz. Handelt es sich dabei um harmonische Schwingungen mit einer Schwingungsebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle, spricht man von ebenen Wellen (*Plane Waves*) (BÖRNER 1996). In Abb. 2.9 ist die Ausbreitung einer linear polarisierten EM Welle skizziert. Die Schwingungsebene des elektrischen sowie des magnetischen Feldes wird durch ein kartesisches Koordinatensystem mit der x- und y-Achse aufgespannt. Die Ausbreitung der Welle erfolgt senkrecht zur Schwingungsebene in Richtung der z-Achse. Der elektrische Feldvektor schwingt senkrecht zur y-Achse. Dementsprechend handelt es sich um eine vertikal polarisierte EM Welle.

Projiziert man beide Feldvektoren einer linear polarisierten EM Welle zu einer diskreten Zeit t_n auf die Schwingungsebene, ergibt sich das Bild der Abb. 2.10. Nach dem Durchlaufen einer halben Wellenlänge zeigen die Vektoren beider Felder in die jeweils entgegengesetzte Richtung. Die Länge beider Vektoren, d.h. die Amplitude der Welle bleibt konstant. Daraus lässt sich folgern, dass sich der Zustand einer ebenen monochromatischen EM Welle zu einem beliebigen Zeitpunkt t_n bestimmen lässt, sofern die Wellenparameter zu einem anderen Zeitpunkt t_m bekannt sind. Diese Parameter sind die Polarisationseigenschaften, die Amplitude und die Phase.

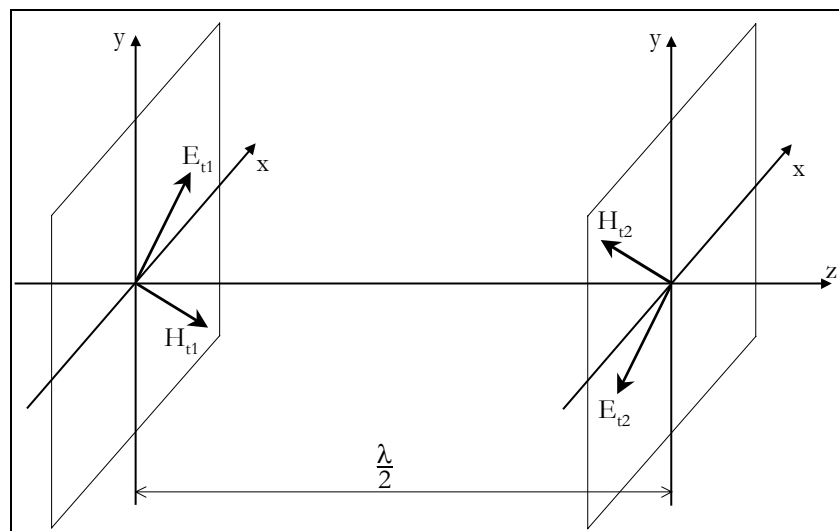


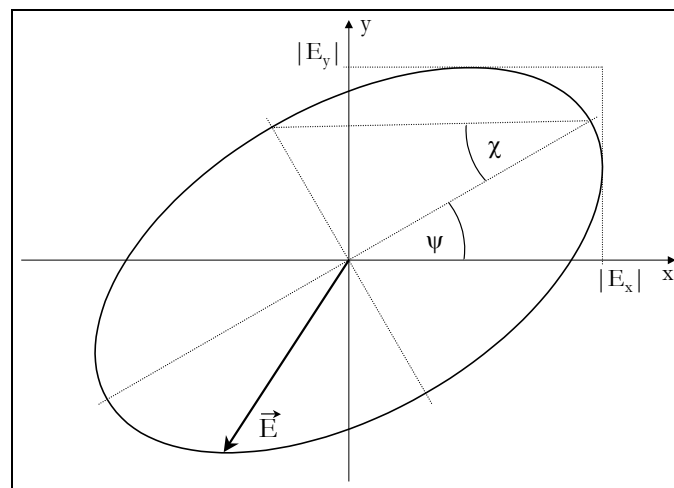
Abb. 2.10: Ausbreitung einer linear polarisierten EM Welle, verändert nach BÖRNER 1996

Die EM Welle in Abb. 2.10 ist weder horizontal noch vertikal polarisiert. Der komplexe elektrische Feldvektor \vec{E}_m ergibt auf die Schwingungsebene projiziert (Zeitpunkt t_n) eine Linie, die sich aus einer horizontalen (x-Richtung) und einer vertikalen (y-Richtung) Komponente zusammensetzt. Nach KROGAGER & BÖRNER (1996) gilt:

$$\vec{E}_m = E_{mx} \hat{X} + E_{my} \hat{Y} \quad 2.17$$

2.2.2.2 Beschreibung der Polarisation ebener monochromatischer EM Wellen

Im Allgemeinen Fall beschreibt die Spitze des komplexen elektrischen Feldvektors (die Polarimetrie betrachtet nur den elektrischen Vektor) auf der Schwingungsebene eine Ellipse (Abb. 2.11). Die Form der Ellipse wird mit zwei Winkeln beschrieben. Dies sind der Orientierungswinkel ψ ($0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$) sowie der Elliptizitätswinkel χ ($-45^\circ \leq \chi \leq 45^\circ$). Anhand des Wertebereichs für ψ und χ ergeben sich zwei Spezialfälle der Polarisation. Für $\chi = 0^\circ$ beschreibt die Spitze des komplexen elektrischen Feldvektors eine Linie. Besitzt der Orientierungswinkel ψ in diesem Fall einen Wert von $\psi = 0^\circ$, ist die EM Welle linear horizontal polarisiert. Bei $\psi = 90^\circ$ ist die Polarisation entsprechend linear vertikal. Dabei handelt es sich um die bevorzugte Konfiguration der meisten SAR-Systeme. Der zweite Spezialfall tritt auf, wenn gilt: $\chi = 45^\circ$ bzw. $\chi = -45^\circ$. Mit diesen Parametern beschreibt die Spitze des komplexen elektrischen Feldvektors einen Kreis auf der Schwingungsebene. Der Orientierungswinkel besitzt dann keine Relevanz. Anhand des Vorzeichens von χ lässt sich ablesen, in welcher Richtung der Vektor auf der Schwingungsebene rotiert. Laut Definition bedeutet ein negatives Vorzeichen die Anwendung der „Rechten-Hand-Regel“. Geht man bei der Abb. 2.11 davon aus, dass sich die EM Welle in den Hintergrund fortpflanzt, rotiert der elektrische Feldvektor im Uhrzeigersinn. Gegensätzliches gilt für ein positives Vorzeichen („Linke-Hand-Regel“). Dieser Zusammenhang gilt prinzipiell, wenn $\chi \neq 0^\circ$ (EVANS et al. 1988, BÖRNER et al. 1998).

Abb. 2.11: Polarisationsellipse mit elektrischem Feldvektor \vec{E}

Eine andere Möglichkeit die Polarisation einer ebenen EM Welle zu beschreiben, ist das komplexe Polarisationsverhältnis (*Complex Polarisation Ratio*) ρ . Jede EM Welle kann in der Schwingungsebene in zwei orthogonale Komponenten zerlegt werden (Gl. 2.17). Eine bestimmte Polarisationsbasis ist nicht vorgegeben, sie wirkt sich jedoch auf das komplexe Polarisationsverhältnis aus. Für den allgemeinen Fall gilt (BÖRNER 1996):

$$\rho_{XY} = \frac{E_Y}{E_X} = \frac{|E_Y|}{|E_X|} e^{j(\phi_Y - \phi_X)} \quad 2.18$$

Die Variablen E_X und E_Y stehen für die komplexen orthogonalen Komponenten des elektrischen Feldvektors, ϕ_X und ϕ_Y beschreiben deren Phase. Zwei EM Wellen sind genau dann orthogonal zueinander polarisiert, wenn gilt: $\rho_2 = -1/\rho_1^*$. Bei elliptisch polarisierten Wellen tritt dieser Fall ein, wenn die Polarisationsellipse beider Wellen bis auf den Drehsinn übereinstimmt. Zwei linear polarisierte Wellen sind orthogonal, wenn gilt: $\psi_2 - \psi_1 = 90^\circ$ (BÖRNER et al. 1998).

Das komplexe Polarisationsverhältnis ρ kann ferner auf Basis des Orientierungs- und des Elliptizitätswinkels berechnet werden. Diesbezüglich gilt der folgende Zusammenhang (AGRAWAL & BÖRNER 1989):

$$\rho = \frac{\cos(2\chi)\sin(2\psi) + i\sin(2\chi)}{1 - \cos(2\psi)\cos(2\chi)} \quad 2.19$$

Das komplexe Polarisationsverhältnis ρ einer linear horizontal polarisierten EM Welle ist demzufolge Null. Im vertikalen Fall gilt $\rho = \infty$.

2.2.2.3 Repräsentationen von EM Wellen

2.2.2.3.1 Stokes Vektor Darstellung

Der Stokes Vektor ermöglicht die Darstellung einer EM Welle anhand von vier Parametern (g_0, g_1, g_2, g_3). Ein Vorteil dieser Darstellung ist, dass auch teilpolarisierte Wellen repräsentiert werden können. Zudem können alle vier Parameter auf Basis von Intensitätsmessungen bestimmt werden. Die Stokes Parameter berechnen sich wie folgt (BÖRNER 1996, BÖRNER et al. 1998):

$$\vec{g} = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_x|^2 + |E_y|^2 \\ |E_x|^2 - |E_y|^2 \\ 2\operatorname{Re}\langle E_x^* E_y \rangle \\ 2\operatorname{Im}\langle E_x^* E_y \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_x|^2 + |E_y|^2 \\ |E_x|^2 - |E_y|^2 \\ 2|E_x||E_y|\cos\phi \\ 2|E_x||E_y|\sin\phi \end{bmatrix} \quad 2.20$$

Der erste Parameter (g_0) entspricht der Gesamtintensität der Welle. Die restlichen Parameter besitzen physikalische Signifikanz (BÖRNER et al. 1998). So gibt der zweite Stokes Parameter (g_1) mit der Differenz zwischen den orthogonalen Polarisationskomponenten Auskunft über deren jeweiligen Anteil an der Gesamtintensität. Er entspricht also der Energiemenge der horizontal oder vertikal polarisierten Komponente. Die letzten beiden Parameter (g_2, g_3) beinhalten die Phasendifferenz zwischen beiden Polarisationskomponenten. Dabei steht g_2 für den linear polarisierten Anteil mit einem Orientierungswinkel von 45 bzw. 135 Grad. Der letzte Parameter beschreibt den Anteil zirkular polarisierter Energiekomponenten. Für vollständig polarisierte Wellen ergibt sich g_0 aus der Addition der anderen Stokes Parameter (BÖRNER 1996):

$$g_0^2 = g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 \quad 2.21$$

Somit ist die Kenntnis von nur drei Stokes Parametern ausreichend, um die Polarisation einer EM Welle zu beschreiben. Demzufolge sind für vollständig polarisierte Wellen nur drei unabhängige Stokes Parameter verfügbar. Für nicht vollständig polarisierte Wellen hingegen gilt:

$$g_0^2 > g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 \quad 2.22$$

Da mit den letzten drei Parametern lediglich der polarisierte Anteil der EM Welle beschrieben wird, entspricht die Differenz zwischen der Gesamtintensität g_0 und der Summe der restlichen drei Stokes Parameter der Energiemenge des unpolarisierten Anteils der Welle. Anhand aller vier Parameter kann demzufolge der Polarisationszustand einer EM Welle inklusive des nicht polarisierten Anteils dargestellt werden. Für den Spezialfall einer vollständig unpolarisierten Welle sind die letzten drei Stokes Parameter gleich Null. Die Gesamtintensität der Welle wird auch in diesem Fall durch g_0 angegeben. Anhand der Stokes Parameter kann der Grad der Polarisation p einer EM Welle bestimmt werden. Er ist definiert als der polarisierte Anteil an der Gesamtenergie einer Welle (BÖRNER et al. 1998) und berechnet sich wie folgt:

$$p = \frac{\sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2}}{g_0} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^3 g_i^2}}{g_0} \quad 2.23$$

Jede EM Welle kann anhand des Stokes Vektors mathematisch beschrieben werden. Für die graphische Darstellung des Polarisationszustandes einer Welle wird die *Poincaré Sphäre* herangezogen (Abb. 2.12). Innerhalb der Sphäre spannen die drei letzten Stokes Vektoren ein kartesisches Koordinatensystem auf. Der Radius der Kugel entspricht der Gesamtintensität der Welle, also g_0 . Anhand der Stokes Parameter werden die Koordinaten eines auf der Kugeloberfläche liegenden Punktes P vorgegeben. Die Lage von P kann außerdem durch die Parameter der Polarisationsellipse (Orientierungswinkel ψ , Elliptizität χ) definiert werden. Mittels der *Poincaré Sphäre* ist es möglich, anhand von Länge und Breite des Punktes P auf den Polarisationszustand der Welle zu schließen (BÖRNER 1996).

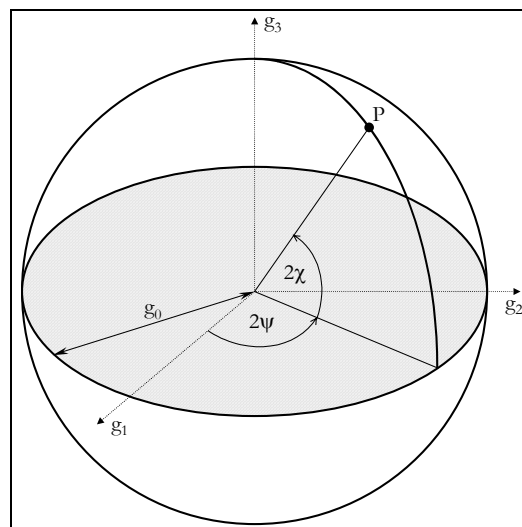


Abb. 2.12: Poincaré Sphäre

Punkte, die sich auf dem Äquator der Sphäre befinden, beschreiben eine linear polarisierte Welle. Im Gegensatz dazu stehen die Pole der Kugel. An diesen Stellen wird eine zirkular polarisierte Welle definiert. Am „Nordpol“ besitzt der Orientierungswinkel ein positives Vorzeichen, daher gilt dort die „Linke-Hand-Regel“. Zwischen den Polen und dem Äquator ist die EM Welle elliptisch polarisiert.

Für unpolarisierte Wellen kann kein bestimmter Punkt auf der Kugeloberfläche beschrieben werden. Die Einzelkomponenten der Welle sind auf der gesamten Oberfläche verteilt. Bei teilpolarisierten Wellen kann ein Zentrum, welches dem polarisierten Anteil der Welle entspricht, definiert werden. Der unpolarisierte Teil kann wie im Fall der unpolarisierten Welle auf der gesamten Kugeloberfläche verteilt sein.

2.2.2.3.2 Jones Vektor Darstellung

Der Stokes Vektor beschreibt eine ebene EM Welle in einem dreidimensionalen realen Raum. Dem gegenüber steht die Darstellung einer vollständig polarisierten harmonischen EM Welle anhand des Jones Vektors. Hier wird die Welle in einem zweidimensionalen komplexen Raum abgebildet. Diese Art der Darstellung ist in der Radarfernerkundung häufig zu finden. Dabei enthält der Jones Vektor annähernd dieselben Informationen wie der Stokes Vektor. Lediglich die Ausbreitungsrichtung der Welle kann in der ursprünglichen Form des Jones Vektors nicht erfasst werden. Zwei gleichartige Wellen mit lediglich entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung besitzen dieselben Parameterwerte. Entsprechend ist die Drehrichtung des elektrischen Feldvektors auf der Schwingungsebene unbekannt (BÖRNER 1996). Diese Zweideutigkeit kann jedoch durch die Verwendung eines Vorzeichens aufgehoben werden (LÜNEBURG 1995). Ein positives Vorzeichen verweist auf eine Ausbreitungsrichtung in Richtung \vec{k} und umgekehrt.

Die Art des zweidimensionalen Raums für die Darstellung der EM Welle ist frei wählbar. Entscheidend ist, dass zwei orthonormale Polarisationszustände $\vec{\epsilon}_x$ und $\vec{\epsilon}_y$ definiert werden. Diese werden entsprechend des Polarisationsanteils der Welle am jeweiligen Polarisationszustand (E_x und E_y) gewichtet. Somit ergibt sich analog zu Gleichung 2.17:

$$\vec{E} = E_x \vec{\epsilon}_x + E_y \vec{\epsilon}_y \quad 2.24$$

Anhand der komplexen Amplituden E_x und E_y kann die EM Welle ebenfalls als komplexer Vektor dargestellt werden (BÖRNER 1996):

$$\vec{E}_{xy} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_x| e^{i\phi_x} \\ |E_y| e^{i\phi_y} \end{bmatrix} \quad 2.25$$

Hierbei handelt es sich um den Jones Vektor. Die Parameter ϕ_x und ϕ_y stehen für die Initialphase der jeweiligen Schwingungskomponente. Nach FERRO-FAMIL (2000) zit. in HAJNSEK (2001) kann der Jones Vektor anhand der Parameter aus dem realen Raum wie folgt berechnet werden:

$$\vec{E}_{xy} = A_0 e^{-i\phi_0} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \chi \\ -i \sin \chi \end{bmatrix} \quad 2.26$$

Dabei gehen der Orientierungswinkel ψ sowie der Elliptizitätswinkel χ aus der Polarisationsellipse ein, A_0 steht für die Amplitude und ϕ_0 für die Initialphase.

Wie bereits angedeutet, kann unter Verwendung des Jones Vektors nur eine vollständig polarisierte Welle beschrieben werden. In der Realität kommt es jedoch zur partiellen Depolarisation des Radarsignals. Ursache dieses Effektes ist die Bewegung von Objekten bzw. die Bewegung des Sensors (BÖRNER et al. 1998). Bewegt sich ein Objekt (z.B. durch Wind) während es von einem Impuls mit einer Länge größer Null erfasst wird, ändert sich auch die Art der Polarisation des rückgestreuten Signals während der Impulsreflexion. Innerhalb einer Auflösungszelle ändert sich also die Polarisation für die Dauer der Signalreflexion. Die zweite Form der Depolarisation ist SAR immanent. Der Sensor bewegt sich und beleuchtet jedes Objekt mehrmals. Die Position der Objekte zum Sensor ist demnach veränderlich. Ebenso verändern sich deren polarisierende Eigenschaften. Neben jenen Parametern, welche zur Beschreibung der Hauptpolarisation der Welle herangezogen werden müssen, ist die Kenntnis des Grades der Polarisation für eine teil-

polarisierte Welle erforderlich. Eine andere Möglichkeit der Erfassung aller Welleneigenschaften ist die Wellenkohärenzmatrix (BÖRNER et al. 1998).

2.2.2.3.3 Änderung der Polarisationsbasis einer EM Welle

Eine monochromatische EM Welle besitzt eine definierte Polarisation. Diese physikalische Eigenschaft der Welle ist unabhängig davon, wie sie letztlich dargestellt wird. Allerdings ändert sich die Erscheinung der Welle entsprechend der jeweiligen Darstellung. Prinzipiell kann jede Polarisationsbasis mit zwei orthogonalen Polarisationszuständen für die Darstellung einer solchen Welle herangezogen werden. Die Repräsentation der Welle wird mit der Änderung von der Basis $\{\vec{\epsilon}_x, \vec{\epsilon}_y\}$ in die Basis $\{\vec{\epsilon}_a, \vec{\epsilon}_b\}$ verändert. Demzufolge gilt (BÖRNER 1996, HELLMANN 2000):

$$\vec{E} = E_x \vec{\epsilon}_x + E_y \vec{\epsilon}_y = E_a \vec{\epsilon}_a + E_b \vec{\epsilon}_b \quad 2.27$$

$$\vec{E}_{xy} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \vec{E}_{ab} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \end{bmatrix} \quad 2.28$$

Die Umprojektion eines komplexen Vektors mit zwei Elementen von einer Basis in eine andere erfolgt anhand einer 2x2 komplexen Matrix, wobei gilt (HELLMANN 2000):

$$\vec{E}_{xy} = [U_{2 \times 2}] \vec{E}_{ab} \quad 2.29$$

Bei der Umprojektion ist entsprechend dem Energieerhaltungssatz darauf zu achten, dass die Amplitude der Welle unverändert bleibt. Demzufolge muss die Vektortransformationsmatrix $[U_{2 \times 2}]$ einer unitären Matrix entsprechen. Die Transformationsmatrix kann einerseits auf Basis der Parameter der Polarisationsellipse (Gl. 2.30) (FERRO-FAMIL 2000 zit. in HAJNSEK 2001) oder unter Verwendung des komplexen Polarisationsverhältnisses ρ (BÖRNER 1996, HELLMANN 2000) gebildet werden (Gl. 2.31):

$$[U_2] = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \chi & i \sin \chi \\ i \sin \chi & \cos \chi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-i\phi_0} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_0} \end{bmatrix} \quad 2.30$$

$$[U_2] = \frac{1}{\sqrt{1 + \rho\rho^*}} \cdot \begin{bmatrix} e^{i\delta_a} & -\rho^* e^{-i\delta_a} \\ \rho e^{i\delta_a} & e^{-i\delta_a} \end{bmatrix} \quad 2.31$$

Die Parameter in Gl. 2.30 entsprechen jenen der Gl. 2.26. Das in Gl. 2.31 enthaltene komplexe Polarisationsverhältnis ρ wird für den Jones Vektor der ursprünglichen Polarisationsbasis $\{\vec{\epsilon}_x, \vec{\epsilon}_y\}$ berechnet. Der Parameter δ_a ist der Phasenreferenzwinkel der neuen Polarisationsbasis. Er besitzt jedoch in der Radarpolarmetrie keine Bedeutung und wird in der Regel auf Null gesetzt (HELLMANN 2000).

2.2.2.4 Repräsentation des Streuprozesses

Der Rückstreuprozess ist der Vorgang, bei dem die einfallende EM Welle in die rückgestreute Welle transformiert wird. Dabei werden im Regelfall die Eigenschaften der Welle verändert. Da die Parameter der rückgestreuten EM Welle vom Sensor registriert werden und die Eigenschaften der ausgesandten Welle bekannt sind, ist ein Rückschluss auf den Transformationsprozess während der Rückstreuung möglich. Um den Transformationsprozess der Rückstreuung mathematisch zu determinieren, wird eine Matrix herangezogen. Diese Matrix repräsentiert den Transformationsprozess der EM Welle durch den Streuer. Der Aufbau dieser Matrix hängt von einer Vielzahl von Kriterien ab. So ergeben sich die Fragen, ob es sich bei dem Sensor um ein monostatisches oder ein bistatisches System handelt, ob der Streuer deterministisch ist, ob die Eigenschaften des Streuers zeitlich variabel sind und welche Streugeometrie (*Forward Scattering Alignment*, FSA bzw. *Backward Scattering Alignment*, BSA) (BÖRNER et al. 1998) verwendet werden soll. Entsprechend dieser Kriterien wurde eine Vielzahl von Streumatrizen entwickelt. Allerdings kommen in der Radarfernerkundung nicht alle Varianten in Betracht. Als Streugeometrie hat sich das BSA durchgesetzt (BÖRNER et al. 1998) und Sensoren sind fast ausschließlich für den monostatischen Fall verfügbar. Ein deterministischer nicht depolarisierender Streuer kann mit der Streumatrix $[S]$ (*Sinclair Matrix*) beschrieben werden. Sie wird verwendet, wenn die EM Welle in Form der Jones Vektoren dargestellt werden soll. Analog dazu gilt die *Müller Matrix* $[M]$ (auch Kennaugh Matrix) für die Stokes Vektor Repräsentation. Mit dieser Matrix können auch Streuprozesse dargestellt werden, die zu einer partiellen Depolarisation der rückgestreuten Welle führen. Gleiches gilt für die *polarimetrische Kohärenzmatrix* $[C]$ sowie die *polarimetrische Kovarianzmatrix* $[I]$. Beide Matrizen basieren auf dem Konzept des Streuvektors. Der *Streuvektor* kann anstelle der Streumatrix $[S]$ verwendet werden. Er enthält deren vollständige Information.

2.2.2.4.1 Die Streumatrix für Rückwärtsstreuung

Die Streumatrix $[S]$ (Sinclair Matrix) eines Streuers transformiert die monochromatische ebene EM Welle \vec{E}_I einer beliebigen Polarisationsbasis in die gestreute Welle \vec{E}_S :

$$\vec{E}_S = [S]\vec{E}_I \quad 2.32$$

Die Streumatrix ist eine komplexe 2x2 Matrix. Sie enthält Informationen über den Streuer und stellt gewissermaßen die Grundlage der Radarpolarimetrie dar. In der HV-Polarisationsbasis stellt sich die Sinclair Matrix wie folgt dar (KROGAGER & BÖRNER 1996, BÖRNER 1996):

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad 2.33$$

Die einzelnen Elemente der $[S]$ -Matrix sind die komplexen Amplituden $S_{ij} = |S_{ij}|e^{i\phi_{ij}}$ $i, j \in [h, v]$ (HELLMANN 2000). Für $i = j$ erhält man die kopolaren Komponenten, bei $i \neq j$ die kreuzpolaren. Unter Anwendung des Reziprozitätstheorems gilt $S_{hv} = S_{vh} = S_x$. Demzufolge beinhaltet die $[S]$ -Matrix fünf unabhängige Parameter. Dies sind die Amplituden der kopolaren sowie einer kreuzpolaren Komponente und die relativen Phasen (ULABY & ELACHI 1990):

$$[S] = e^{i\phi_0} \begin{bmatrix} |S_{hh}| & |S_x| e^{i(\phi_x - \phi_0)} \\ |S_x| e^{i(\phi_x - \phi_0)} & |S_{vv}| e^{i(\phi_v - \phi_0)} \end{bmatrix} \quad 2.34$$

2.2.2.4.2 Die Müller Matrix für Rückwärtsstreuung

Die Müller Matrix ist eine 4x4 Matrix mit realen Elementen. Sie wird herangezogen, wenn sich die Eigenschaften des Streuers während der Rückstreuung ändern oder wenn sich mehrere unabhängige Streuer in einer Auflösungszelle befinden. Analog zu Gl. 2.32 gilt für die einfallende und reflektierte Welle, in diesem Fall auf Basis der Stokes Vektoren (Punkt 2.2.2.3.1), der folgende Zusammenhang (BÖRNER 1996):

$$\vec{g}_s = [M] \vec{g}_i \quad 2.35$$

Die Müller Matrix besteht aus sechzehn realen Elementen (Gl. 2.36). Diese Elemente sind von der Polarisationsbasis unabhängig. Die absolute Phase geht in der [M]-Matrix verloren.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad 2.36$$

Die Elemente der Müller Matrix lassen sich anhand der Elemente der Streumatrix angeben. Die Berechnung der einzelnen Elemente m_{ij} der [M]-Matrix findet sich in BÖRNER et al. (1998).

2.2.2.4.3 Das Konzept des Streuvektors

Das Konzept des Streuvektors stellt eine Erweiterung der [S]-Matrix dar. Der Streuvektor \vec{k} besitzt vier komplexe Elemente und beinhaltet dieselbe Information über den Streuer wie die Streumatrix. Auf ihm basieren die Polarimetrische Kohärenz- und die Polarimetrische Kovarianzmatrix zur Darstellung nicht-deterministischer Streuer (CLOUDE & POTTIER 1996):

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \rightarrow \vec{k} = \frac{1}{2} \text{Trace}([S] \psi) = [k_0, k_1, k_2, k_3]^T \quad 2.37$$

Dabei steht $\text{Trace}([S])$ für die Summe der diagonalen Elemente S_{HH} und S_{VV} in [S]. Der Operator ψ steht für einen Satz komplexer 2x2 Basismatrizen (CLOUDE 1986 zit. in HELLMANN 2000). Im Prinzip kann jedes Set aus vier orthonormalen 2x2 Matrizen für die Vektorisierung von [S] herangezogen werden. In der Radar polarimetrie haben sich jedoch zwei spezielle Sets für ψ etabliert. Dies ist zum einen die lexikographische Erweiterung (*Borgeaud Basis*) von [S] und zum anderen die *Pauli Basis*, beruhend auf den Pauli Spin Matrizen. Das Parameterset ψ_B der vier orthonormalen 2x2 Matrizen der Borgeaud Basis stellt sich wie folgt dar:

$$\psi_B = \left\{ 2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, 2 \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, 2 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, 2 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\} \quad 2.38$$

Daraus resultiert folgender Streuvektor \vec{k}_B mit den komplexen Elementen aus [S] für die Borgeaud Basis:

$$\vec{k}_B = [S_{hh}, S_{hv}, S_{vh}, S_{vv}]^T \quad 2.39$$

Somit enthält dieser Vektor die Amplituden der Streumatrix und ist direkt aus den Systemmesswerten abzuleiten. Jedoch bleiben die physikalischen Eigenschaften des Streuers unberücksichtigt. Dieser Nachteil wird in der Pauli Basis relativiert. Hier sind die Einzelelemente des Streuvektors eher an physikalische Eigenschaften des Streuers geknüpft. Die Basismatrizen für die Pauli Basis ψ_P haben die folgende Form (CLOUDE 1992):

$$\psi_P = \left\{ \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \right\} \quad 2.40$$

Nach Durchführung der Vektorisierung von [S] anhand der Basismatrizen für die Pauli Basis ψ_P erhält man den Paulivektor \vec{k}_P für die bistatische Anordnung (ungleiche Position von Sender und Empfänger):

$$\vec{k}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh} + S_{vv}, S_{hh} - S_{vv}, S_{hv} + S_{vh}, i(S_{vh} - S_{hv})]^T \quad 2.41$$

Für die monostatische Anordnung (Senderposition = Empfängerposition) werden die beiden vorgestellten Streuvektoren abgeändert. Aufgrund des Reziprozitätstheorems gilt für den Fall der Rückstreuung erneut $S_{hv} = S_{vh} = S_x$. Außerdem enthält der vierte Term des Pauli Vektors keine Information, da diese Form der Rückstreuung (vollständige Umpolarisation der Welle in den jeweils orthogonalen Zustand) hier nicht auftreten kann (HELLMANN 2000). Somit stellen sich die Streuvektoren in der Borgeaud $\vec{k}_{B_{Rück}}$ bzw. der Pauli Basis $\vec{k}_{P_{Rück}}$ für den Rückstreufall wie folgt dar:

$$\vec{k}_{B_{Rück}} = [S_{hh}, \sqrt{2}S_x, S_{vv}]^T \quad 2.42$$

$$\vec{k}_{P_{Rück}} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh} + S_{vv}, S_{hh} - S_{vv}, 2S_x]^T \quad 2.43$$

Die Streuvektoren lassen sich für die monostatische und bistatische Anordnung von der Borgeaud Basis in die Pauli Basis umformen und umgekehrt. Diese Umwandlung erfolgt anhand spezieller unitärer (orthogonaler) Matrizen (BÖRNER et al. 1998).

Die drei Elemente des Streuvektors in der Pauli Basis lassen sich hinsichtlich ihres Rückstreutyps interpretieren. Das erste Element steht für Streuer mit isotroper ungerader Rückstreuung. Hierzu zählt u.a. die Einfachstreuung an einer glatten Oberfläche oder die Dreifachstreuung an einem dreiflächigen Cornerreflektor. Das zweite Element bezeichnet Streuer mit isotroper gerader Rückstreuung. Hier kommt es zu einer Phasenverschiebung von π zwischen beiden Kopolarisationen. In der Realität fällt vor allem die

Zweifachstreuung (*Double Bounce*) an zweiflächigen Reflektoren in dieses Schema. Der Rückstreutypus des dritten Elements des Paulivektors ist ebenfalls isotrop und gerade. Die zweiflächigen Reflektoren sind allerdings mit einem Winkel von 45° zur Horizontalen angeordnet. Diese Form der Rückstreuung wird in der Regel als Volumenstreuung aufgefasst.

2.2.2.4.4 Polarimetrische Kohärenz- und Kovarianzmatrix

Die [S]-Matrix oder der Streuvektor sind geeignet, um die Eigenschaften eines einzelnen Streuers zu beschreiben. Befinden sich mehrere Elementarstreuer innerhalb einer Auflösungszelle, verlieren sie ihre Gültigkeit. Jeder Elementarstreuer müsste durch eine eigene Streumatrix $[S]_e$ beschrieben werden. Allerdings kann in der Realität nicht jeder einzelne Streuer aufgelöst werden. Demzufolge wird für jede Auflösungszelle eine Streumatrix generiert, die sich aus den Streumatrizen $[S]_e$ der Elementarstreuer ergibt. Um trotzdem eine Analyse der Teilstreuer zu ermöglichen und mit statistischen Streueffekten umgehen zu können, wurden die auf Statistik zweiter Ordnung basierende Kovarianzmatrix [C] sowie die Kohärenzmatrix [T] entwickelt (CLOUDE & POTTIER 1996).

Beide Matrizen basieren auf dem Streuvektor. Die polarimetrische Kovarianzmatrix ergibt sich aus dem Streuvektor in der Borgeaud Basis, die polarimetrische Kohärenzmatrix aus jenem in der Pauli Basis. Die Matrizen werden jeweils durch das äußere Produkt aus Streuvektor und dessen konjugierten transponierten Pendant gebildet (CLOUDE 1992):

$$[C] = \langle \vec{k}_B \vec{k}_B^\dagger \rangle, \quad [T] = \langle \vec{k}_P \vec{k}_P^\dagger \rangle \quad 2.44$$

Für den Rückstreufall ergibt sich jeweils eine komplexe 3×3 Matrix. Die Kovarianzmatrix [C] stellt sich wie folgt dar:

$$[C] = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}|^2 \rangle & \langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{HV} S_{HH}^* \rangle & \langle |S_{HV}|^2 \rangle & \langle S_{HV} S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV} S_{HH}^* \rangle & \langle S_{VV} S_{HV}^* \rangle & \langle |S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad 2.45$$

Dabei resultiert jedes Element dieser Matrix aus der Mittelung über mehrere Auflösungszellen. Dasselbe gilt für die polarimetrische Kohärenzmatrix. Die Mittelung rührt aus der Annahme der Konstanz der Zufallskomponente des Streumediums (CLOUDE 1992). Die [T]-Matrix steht mit der Streumatrix in folgendem Zusammenhang:

$$[T] = \begin{bmatrix} \langle |(S_{HH} + S_{VV})|^2 \rangle & \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 2\langle (S_{HH} + S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ \langle (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & \langle |(S_{HH} - S_{VV})|^2 \rangle & 2\langle (S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ 2\langle S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & 2\langle S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 4\langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad 2.46$$

[T]- und [C]-Matrix enthalten dieselbe Information und können ineinander umgewandelt werden. Beide können ebenfalls in die Müller Matrix [M] umgerechnet werden und umgekehrt. Allerdings stellen nach CLOUDE (1992) die [T]- und [C]-Matrix eine bessere Ausgangsposition für eine *Target*-Dekomposition dar.

Vor allem die Kovarianzmatrix besitzt in dieser Hinsicht aufgrund der Identifikation korrelierter Streumechanismen eines Objekts besondere Vorteile.

[T]- und [C]-Matrix besitzen dieselben drei Eigenwerte, jedoch verschiedene Eigenvektoren. Die Eigenwerte sind real, nicht-negativ und verschieden von Null. Ein deterministischer Streuer besitzt in beiden Matrizen nur einen Eigenwert (HELLMANN 2000).

2.2.2.4.5 Polarisierungssynthese

Wie in Abschnitt 2.2.2.3.3 besprochen, ist die Repräsentation einer EM Welle von der gewählten Polarisationsbasis abhängig. Gleiches gilt für die Darstellung des Streuers bzw. die Elemente einer Streumatrix. Polarisierungssynthese bedeutet hier, dass bei Kenntnis der [S]-Matrix die Berechnung der vom Sensor empfangenen Energie für jede beliebige Kombination aus Sende- und Empfangspolarisation möglich ist (KONG 1990). Somit besitzen vollpolarimetrische Systeme (*quadpol*) einen immensen Vorteil gegenüber semipolarimetrischen Sensoren (*dualpol*) oder gar Systemen mit nur einer Polarisation.

Die Änderung der Polarisationsbasis der Streumatrix kann als Transformation der einfallenden sowie der reflektierten EM-Welle von der alten in die neue Polarisationsbasis angesehen werden. Für die Transformation können die selben Matrizen, wie sie in Abschnitt 2.2.2.3.3 vorgestellt wurden, verwendet werden. Analog zur Gl. 2.29 ergibt sich für die Umwandlung der Streumatrix $[S]_{HV}$ in die neue Polarisationsbasis $[S]_{XY}$ das folgende Bild (KROGAGER & BÖRNER 1996):

$$[S]_{XY} = [U]_{2 \times 2}^T [S]_{HV} [U]_{2 \times 2} \quad 2.47$$

Erfolgt die Transformation auf Basis des Polarisationsverhältnisses ρ ergeben sich für den Rückstreufall unter Annahme des Reziprozitätstheorems die Elemente in der neuen Polarisationsbasis aus den Elementen der $[S]_{HV}$ Basis auf folgende Art und Weise (BÖRNER 1996):

$$\begin{aligned} [S]_{AA} &= \frac{1}{1 + \rho\rho^*} [S_{HH} e^{-i2\delta} - 2\rho^* S_{XX} + \rho^{*2} S_{VV} e^{i2\delta}] \\ [S]_{AB} &= \frac{1}{1 + \rho\rho^*} [\rho S_{HH} e^{-i2\delta} + (1 - \rho\rho^*) S_{XX} - \rho^{*2} S_{VV} e^{i2\delta}] \\ [S]_{BB} &= \frac{1}{1 + \rho\rho^*} [\rho^2 S_{HH} e^{-i2\delta} + 2\rho S_{XX} + S_{VV} e^{i2\delta}] \end{aligned} \quad 2.48$$

Für den speziellen Fall der Transformation der Streumatrix von der linearen HV-Basis in die zirkuläre LR-Basis ($\rho := i, \delta := 0$; diese Transformation wurde in dieser Arbeit angewandt) vereinfachen sich die obigen Gleichungen zu (KROGAGER & BÖRNER 1996):

$$\begin{aligned} S_{LL} &= \frac{1}{2} [S_{HH} + 2iS_{XX} - S_{VV}] \\ S_{LR} &= \frac{1}{2} [i(S_{HH} + S_{VV})] \\ S_{RR} &= \frac{1}{2} [-S_{HH} + 2iS_{XX} + S_{VV}] \end{aligned} \quad 2.49$$

Nach der Transformation von der alten in die neue Basis besitzen die Elemente der Streumatrix veränderte Werte. Allerdings haben die Streumatrizen in beiden Polarisationsbasen einige Gemeinsamkeiten. Zum ersten besitzen sie den selben *Span* (Gl. 2.50), welcher die gesamte Energie der EM Welle repräsentiert. Aufgrund des Reziprozitätstheorems gilt zweitens die Identität der kreuzpolarisierten Komponenten. Als dritter Punkt kann die invariante Determinante von $[S]$ angeführt werden. Diese kommt deswegen zustande, da die Transformationsmatrix $[U]_{2 \times 2}$ eine Determinante von Eins aufweist.

$$\text{Span}\{[S(AB)]\} = |S_{AA}|^2 + |S_{AB}|^2 + |S_{BA}|^2 + |S_{BB}|^2 \quad 2.50$$

2.2.2.5 Dekomposition

Die Idee der Dekomposition vollpolarimetrischer Radardaten ist die Zerlegung des komplexen Rückstreusignals in Einzelkomponenten unterschiedlicher Herkunft bzw. Charakteristik. Es findet demnach eine Entmischung des Signals statt. Die einzelnen Komponenten des Rückstreusignals können auf diese Art und Weise bestimmten Streuprozessen zugeordnet werden. Die Dekomposition der Rückstreuinformation setzt in der Regel auf der mathematischen Beschreibung des Streuers (Matrix) auf. Prinzipiell ist die Zerlegung jeder Matrix in Einzelkomponenten möglich. Somit existiert eine Reihe möglicher Dekompositionsansätze, wobei allerdings nicht jedes Verfahren auf die Zerlegung des Signals in einzelne Streuprozesse abzielt (CLOUDE 1992, CLOUDE & POTTIER 1996, BÖRNER et al. 1998).

CLOUDE (1992) entwickelte ein Dekompositionsverfahren auf Basis der Kohärenzmatrix. Dieser liegt dem Streuvektor in der Paulibasis zugrunde, welcher eine Interpretation der Streumechanismen ermöglicht (Abschnitt 2.2.2.4.3). Dabei erfolgt zuerst die Diagonalisierung der $[T]$ -Matrix in die diagonale Eigenwertmatrix $[\Lambda]$ anhand einer unitären Matrix $[U_3]$, deren Spalten die senkrecht aufeinanderstehenden Eigenvektoren von $[T]$ repräsentieren.

$$\langle [T] \rangle = [U_3][\Lambda][U_3]^\dagger = [U_3] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [U_3]^\dagger \quad 2.51$$

$$[U_3] = [\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3]^T$$

Dabei gilt für die realen Eigenwerte $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$. Im nächsten Schritt wird die diagonalisierte Kohärenzmatrix (Eigenwertmatrix) herangezogen, um die ursprüngliche Kohärenzmatrix in die Summe dreier unabhängiger Kohärenzmatrizen $[T_n]$ zu zerlegen. Dabei wird jede Teilmatrix entsprechend des jeweiligen Eigenwertes λ_n gewichtet.

$$[T] = \lambda_1 (\bar{e}_1 \cdot \bar{e}_1^\dagger) + \lambda_2 (\bar{e}_2 \cdot \bar{e}_2^\dagger) + \lambda_3 (\bar{e}_3 \cdot \bar{e}_3^\dagger) = [T_1] + [T_2] + [T_3] = \sum_{n=1}^3 \lambda_n [T_n] \quad 2.52$$

Die drei unitären Matrizen $[T_n]$ beinhalten jeweils einen deterministischen Streuprozess. Der Anteil dieses Streuprozesses an der Gesamtstreuung wird durch den jeweiligen Eigenwert festgehalten. Die Summe der Eigenwerte ergibt die Gesamtenergie, welche vom Streuer Richtung Sensor gelangt. Die Art der Streuung

lässt sich aus den Eigenvektoren herleiten. Die physikalische Signifikanz wird durch die Orthogonalität der Eigenvektoren gewährleistet. Allerdings ergibt sich genau daraus eine Gefahr der Fehlinterpretation der Streumechanismen, da, so TITIN-SCHNAIDER (1999), in der Realität die elementaren Streumechanismen weder orthogonal zueinander noch deterministisch sein müssen.

Aus dieser Dekomposition wurden von CLOUDE & POTTIER (1997) zwei wichtige Parameter mit physikalischer Bedeutung hergeleitet. Dies sind die Entropie H und die Anisotropie \mathcal{A} . Beide Parameter sind basisinvariant (unabhängig von Polarisationsbasis) und geben Auskunft über den Anteil und die Verteilung von Streumechanismen. Beide Parameter können Werte zwischen Null und Eins annehmen. Die Entropie ist ein Maß für das Vorhandensein und den Anteil aller drei Eigenwerte. Bei $H = 0$ wird die gesamte Rückstreuung durch einen Streumechanismus generiert. Die anderen beiden Eigenwerte sind Null. Wenn $H = 1$ besitzen alle Eigenwerte denselben Wert. Erreicht die Entropie mittlere Werte, kann die Anisotropie \mathcal{A} , welche das Verhältnis zwischen dem zweiten und dritten Eigenwert darstellt, zusätzliche Information enthalten. Die Berechnung beider Parameter ist im Folgenden dargestellt:

$$H = \sum_{i=1}^3 -P_i \log_3 P_i, \quad P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad 2.53$$

$$\mathcal{A} = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad 2.54$$

Nimmt \mathcal{A} einen Wert nahe Eins an, spielt der dritte Eigenwert keine Rolle. In der Auflösungszone kommt demnach kein dritter Streumechanismus vor. Geht die Anisotropie gegen Null, existiert ein dritter Streumechanismus. Für $\mathcal{A} = 0$ ist er dem zweiten gleichwertig.

Entropie und Anisotropie werden herangezogen, um die Verteilung der Streumechanismen darzustellen. Die Art der Rückstreuung geht aus ihnen jedoch nicht hervor. Für diese Analyse wird erneut der Streuvektor benötigt. Nach CLOUDE & POTTIER (1995) kann dieser Streuvektor ebenfalls anhand von fünf Winkeln repräsentiert werden:

$$\vec{e} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha)e^{i\phi} \\ \sin(\alpha)\cos(\beta)e^{i\delta} \\ \sin(\alpha)\sin(\beta)e^{i\gamma} \end{bmatrix} \quad 2.55$$

Für die Änderung des α - und β -Winkels dieses Vektors um den Betrag $\Delta\alpha$ bzw. $\Delta\beta$, welche mit der Veränderung des Streumechanismus von \vec{e} in \vec{e}' einhergeht, gelten die folgenden Transformationsmatrizen $[R_\alpha]$ und $[R_\beta]$ für eine Flächenrotation (CLOUDE & POTTIER 1995):

$$\vec{e}' = [R_\alpha] \vec{e} = \begin{bmatrix} \cos \Delta\alpha & -\sin \Delta\alpha & 0 \\ \sin \Delta\alpha & \cos \Delta\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \vec{e} \quad 2.56$$

$$\vec{e}' = [R_\beta] \vec{e} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta\beta & -\sin \Delta\beta \\ 0 & \sin \Delta\beta & \cos \Delta\beta \end{bmatrix} \vec{e}$$

Die Winkel können dabei so interpretiert werden, dass α ($90^\circ \geq \alpha \geq 0^\circ$) für den Rückstreutyp und β ($180^\circ \geq \beta \geq -180^\circ$) für die Orientierung des Streuers zur Ausbreitungsrichtung der Strahlung steht. Die restlichen Winkel ϕ , δ , und γ aus Gl. 2.55 sind Objektphasenwinkel (CLOUDE & POTTIER 1995).

Der mittlere α -Winkel einer Auflösungszelle ergibt sich als gewichtetes Mittel aus den Winkeln α_1 , α_2 und α_3 , die aus den drei Eigenvektoren berechnet werden. Er verkörpert den dominanten Streumechanismus:

$$\bar{\alpha} = P_1\alpha_1 + P_2\alpha_2 + P_3\alpha_3 \quad 2.57$$

P_i ergibt sich aus Gl. 2.53. Auf dieselbe Art und Weise wird die vorherrschende Orientierung β des Ziels ermittelt. Beide Winkel sind voneinander unabhängig.

Ein Vorteil des α -Winkels ist die Möglichkeit, auch nicht-isotrope Streumechanismen darstellen zu können. Die Tatsache, dass die meisten natürlichen Objekte nicht-isotrope Streuer sind, macht folglich diesen Parameter zu einer geeigneten Größe. In Abb. 2.13 ist die Art des Streumechanismus in Abhängigkeit vom Wert des α -Winkels dargestellt. Für $\alpha = 0^\circ$ erhält man isotrope Oberflächenstreuung (bzw. auch ungerade Mehrfachstreuung, wie an einem dreiflächigen Cornerreflektor) mit einer Phasenverschiebung von Null zwischen beiden orthogonalen Polarisationen. Dieser Fall entspricht der ersten Paulimatrix des Streuvektors in der Pauli Basis. Alle Polarisationen werden in gleichem Maße reflektiert und nicht depolarisiert. Dies ändert sich jedoch mit einem steigenden Wert für α . Die Rückstreuintensität ist zunehmend von der Polarisation abhängig. Den Höhepunkt erreicht dieser Trend bei $\alpha = 45^\circ$. In diesem Fall reagieren die Streuer wie gerichtete Dipole mit einer Maximalreflexion, wenn die Schwingung des elektrischen Feldvektors der EM Welle parallel zu den Dipolen ausgerichtet ist. Die Rückstreuung geht gegen Null, wenn Polarisation und Dipol orthogonal zueinander stehen. Im Fall der Dipolstreuung wird die Ausrichtung der Dipole durch den Winkel β verkörpert. Mit weiterer Zunahme von α geht die Polarisationsabhängigkeit zurück. Man erhält eine zunehmend isotropische Doppelreflexion (*Double Bounce*) bzw. geradzahlige Mehrfachreflexion. Bei $\alpha = 90^\circ$ ist diese dann vollständig isotrop mit einer Phasenverschiebung von 180° und entspricht der zweiten Paulimatrix des Streuvektors in der Pauli Basis (HELLMANN 2000).

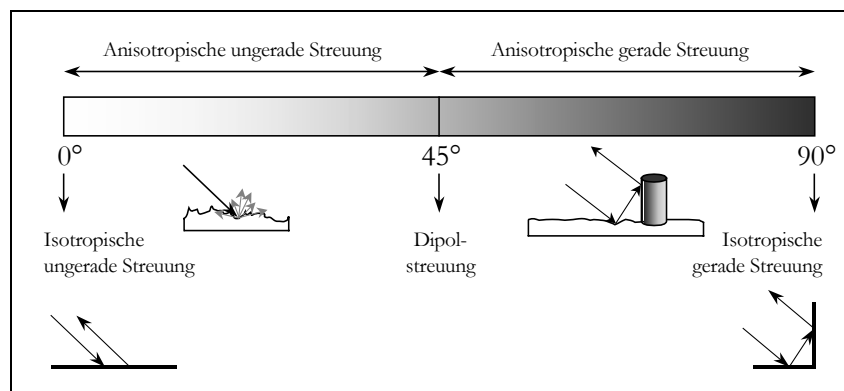


Abb. 2.13: Aus dem α -Winkel abgeleitete Streumechanismen, verändert nach HELLMANN (2000)

2.2.3 Polarimetrische Interferometrie

Methoden der Polarimetrischen Interferometrie finden zwar in dieser Arbeit keine Anwendung, allerdings ist die derzeit in der Forschung vielfach diskutierte Kombination von Interferometrie und Polarimetrie als Fortführung der bereits besprochenen Ansätze zu sehen und soll hier zur Vervollständigung des Themas kurz angesprochen werden.

Die Anfänge der Polarimetrischen Interferometrie befassten sich mit der Untersuchung von Interferogrammen, die anhand unterschiedlicher Polarisierungen hergeleitet wurden (CLOUDE & CORR 2003). Die Phasendifferenzen wurden dann mit Vegetationshöhen korreliert. Je nach Polarisation variiert das Streuzentrum entsprechend der Ausrichtung der Streuer in seiner Lage. Für genauere Analysen der Phasendifferenz wurden später kohärente Streumodelle entwickelt (z.B. SHIMADA et al. 2001). Diese basieren auf der 6×6 Kohärenzmatrix als Messgröße des polarimetrischen interferometrischen SAR (PAPATHANASSIOU 1999):

$$[T_6] = \left\langle \begin{bmatrix} \vec{k}_1 \\ \vec{k}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{k}_1^\dagger & \vec{k}_2^\dagger \end{bmatrix} \right\rangle = \begin{bmatrix} [T_{11}] & [\Omega_{12}] \\ [\Omega_{12}]^\dagger & [T_{22}] \end{bmatrix} \quad 2.58$$

$$[T_{11}] = \langle \vec{k}_1 \cdot \vec{k}_1^\dagger \rangle, \quad [T_{22}] = \langle \vec{k}_2 \cdot \vec{k}_2^\dagger \rangle, \quad [\Omega_{12}] = \langle \vec{k}_1 \cdot \vec{k}_2^\dagger \rangle$$

Dabei stehen k_1 und k_2 für die Streuvektoren der unterschiedlichen Antennenpositionen. $[T_{xx}]$ sind konventionelle polarimetrische 3×3 Kohärenzmatrizen für die jeweilige Sensorposition. Die Matrix $[\Omega_{12}]$ enthält polarimetrische sowie interferometrische Phaseninformationen.

Fortführende Diskussionen und Anwendungen zu diesem Thema finden sich beispielsweise bei BÖRNER & PAPATHANASSIOU (1998a), BÖRNER & PAPATHANASSIOU (1998b), PAPATHANASSIOU (1999), ISOLA & CLOUDE (2001), SHIMADA et al. (2001), CLOUDE & CORR (2003), CORR et al. (2003), HAJNSEK et al. (2003) sowie WOODHOUSE et al. (2003).

2.3 Inversion von Oberflächenparametern

Ein Hauptziel der Radarfernerkundung ist die Ableitung hydrologisch sowie klimatologisch relevanter Oberflächenparameter. Für unbebaute Landoberflächen sind dies im wesentlichen die Oberflächenrauigkeit, die Bodenfeuchte sowie diverse Vegetationsparameter. Jene Oberflächenparameter sind verantwortlich für die Art und Intensität der Radarrückstreuung.

Problematisch bei der Messung dieser Parameter ist der gemeinsame Einfluss aller Umweltparameter auf das Rückstreusignal. Die Entmischung der Gesamtinformation anhand mehrerer Radarparameter (mehrere Polarisierungen oder Frequenzen) stellt eines der Hauptinteressen dieses Forschungsgebietes dar. Für diesen Arbeitsschritt steht bereits eine Vielzahl von Modellen zur Verfügung. Das Spektrum reicht dabei von einfachen Korrelationsmodellen über empirische und semiempirische Ansätze bis hin zu mathematischen Verfahren. Eine aktuelle Entwicklung stellen die polarimetriebasierten Modelle dar. Im Allgemeinen besitzt der folgende Zusammenhang zwischen Modellkomplexität und Anwendbarkeit Geltung. Je empirischer ein Modell, desto weniger ist es auf andere Gebiete übertragbar. Je theoretischer ein Modell, desto eingeschränkter ist es in seinem Definitionsbereich. Das *Integral Equation Method* Model (IEM) stellt hier einen guten Kompromiss dar.

Im Folgenden wird zunächst auf die zu untersuchenden Umweltparameter eingegangen. Dabei stehen Messung und numerische Repräsentation im Vordergrund (Abschnitt 2.3.1). Anschließend werden die bedeutsamsten Rückstreumodelle vorgestellt (Abschnitt 2.3.2) und z.T. Möglichkeiten für deren Inversion erläutert.

2.3.1 Messung und Darstellung der Oberflächenparameter

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Oberflächenrauigkeit und die Bodenfeuchte bzw. auf die dielektrischen Eigenschaften des Bodens. Der Aufnahmezeitpunkt vor Beginn der Vegetationsperiode bietet diesbezüglich gute Voraussetzungen. Vegetationsmodelle wurden nicht verwendet.

2.3.1.1 Oberflächenrauigkeit

Als Oberflächenrauigkeit wird die Höhenvariation einer Oberfläche im Verhältnis zu einer Bezugshöhe bezeichnet. Im Bereich der Radarfernerkundung kommen hier vegetationsfreie Bodenoberflächen, Eisflächen oder Gesteinsoberflächen in Betracht.

Ob eine Oberfläche glatt oder rau erscheint, ist wellenlängenabhängig. Als Rauigkeitskriterien stehen daher mehrere wellenlängenabhängige Ansätze zur Verfügung. Die gebräuchlichsten sind das Rayleigh Kriterium (Gl. 2.59) sowie das Fraunhofer Kriterium (Gl. 2.60). Beide Kriterien geben eine Maximaldifferenz zwischen einem oberen und unteren Punkt der Oberfläche (Abb. 2.14) in Abhängigkeit vom lokalen Einfallswinkel θ an, für jene die Oberfläche bei der verwandten Wellenlänge λ gerade noch glatt erscheint. In diesem Fall wird die einfallende Strahlung spiegelnd reflektiert und die Polarisierungseigenschaften bleiben vollständig erhalten.

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta} \quad 2.59$$

$$h < \frac{\lambda}{32 \cos \theta} \quad 2.60$$

Das Fraunhofer Kriterium, welches deutlich strengere Anforderungen an eine glatte Oberfläche stellt, wurde von ULABY et al. (1986) vorgeschlagen. Aus einer Reihe von Experimenten ging hervor, dass das Rayleigh Kriterium in der Realität nicht genügt, um glatte Oberflächen zu definieren. Fraunhofer- und Rayleigh Kriterium definieren eine raue Oberfläche letztlich über die maximal zulässig Phasendifferenz zwischen zwei EM Wellen, von denen eine am oberen und die andere am unteren Punkt der Oberfläche reflektiert wird.

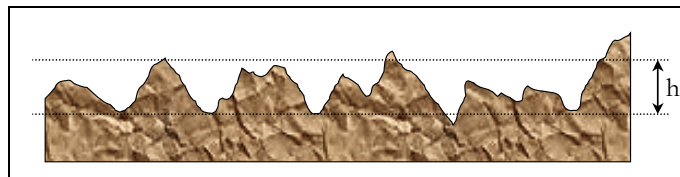


Abb. 2.14: Querschnitt einer rauhen Oberfläche mit Höhendifferenz h

Eine Reihe von Arbeiten befassen sich mit der Frage, wie die Rauigkeit einer Oberfläche mathematisch dargestellt werden kann. In den meisten Fällen wird die Oberfläche um eine Dimension reduziert. Es wird lediglich ein Profilschnitt betrachtet. Hintergründe dafür sind zum einen die Kompatibilität der Rauigkeitsdaten zu den Radarrückstreumodellen und zum anderen die technischen Anforderungen an die dreidimensionale Vermessung der Rauigkeit. Allerdings existieren bereits Messsysteme, die diesen Anforderungen genügen. So entwickelten MCDONALD et al. (1999) ein auf „Stereo Vision“ basierendes Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung einer Oberfläche. LE TOAN & DAVIDSON (1998) untersuchten die Daten eines 3D-Laserprofilers.

Derzeit erfolgt die Aufnahme von Rauigkeitsdaten zumeist jedoch nur in zwei Dimensionen. Eine einfache Möglichkeit hierfür stellen die Kontaktverfahren dar. Dazu zählen die sogenannten Nagelbretter (auch Nadelbretter) (z.B. VAN OEVELEN & HOEKMAN 1999). Hier wird die Oberfläche durch eine Vielzahl parallel angeordneter Metallstifte gleicher Länge abgetastet. Die obere Seite der Stifte spiegelt die Höhenvarianz der Oberfläche wider. Die Anordnung der Stifte wird fotografisch festgehalten. Anschließend wird der Verlauf der Stiftoberkanten abdigitalisiert. Eine ähnliche Funktionsweise besitzen die Maschenbretter (oder Gitterbretter). Diese werden in den Boden eingedrückt und stellen den Hintergrund für das zu fotografierende Rauigkeitsprofil dar (z.B. BINDLISH & BARROS 2000). Das auf diesen Platten aufgebrachte Gitternetz dient später als Hilfe bei der Digitalisierung des Profils. Nachteile der Kontaktverfahren sind die etwaige Rauigkeitsverfälschung durch den Kontakt der Geräte mit der Oberfläche sowie der hohe Aufwand der Datenaufbereitung. Diese Schwachpunkte umgehen kontaktfreie Verfahren. Anhand von Laserprofilern ist es möglich, die Höhenvarianz einer Oberfläche kontaktfrei sowie in hoher Auflösung abzutasten und zugleich digital aufzuzeichnen (DAVIDSON et al. 2000). Ein kontaktfreies elektronisches Verfahren wurde bereits 1989 von BEAUDOIN et al. vorgestellt.

Die anhand eines der genannten Verfahren ermittelte Rauigkeit kann in eine zufällige und eine periodische Komponente zerlegt werden (DOBSON & ULABY 1998). Vor allem bei landwirtschaftlich genutzten Flächen ist die periodische Komponente in Form der Reihenstruktur augenscheinlich.

Die Höhenvariation des Profils wird durch die RMS-Höhe s angegeben. Die RMS-Höhe, welche die Standardabweichung der Höhenvariation entlang des Profils bezeichnet, sagt jedoch nichts über die Verteilung der Höhenschwankungen aus. Diese Information kann anhand der Autokorrelationsfunktion $\rho(\xi)$ mit der dazugehörigen Autokorrelationslänge l festgehalten werden (DOBSON & ULABY 1998):

$$\rho(\xi) = \frac{\int z(x)z(x + \xi)dx}{\int z^2(x)dx} \quad 2.61$$

Diese Funktion ist ein Maß für die Korrelation zweier identischer um den Betrag ξ versetzter Rauigkeitsprofile. Dabei steht $z(x)$ für die Höhe an einem bestimmten Punkt x . Die Autokorrelationsfunktion kann näherungsweise durch eine Gaußfunktion bzw. eine exponentielle Funktion ausgedrückt werden:

$$\rho(\xi) = \exp\left(-\left(\frac{\xi}{l}\right)^n\right) \quad 2.62$$

Für $n = 1$ besitzt Gl. 2.62 exponentiellen Charakter, bei $n=2$ handelt es sich um eine Gaußfunktion (SHI et al. 1997). In einer Vielzahl von Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass hinsichtlich der Autokorrelation für die meisten Rauigkeitsprofile der exponentielle Ansatz geeigneter ist (BERTUZZI et al. 1992, SMACCHIA et al. 1994, SHI et al. 1997, MCDONALD et al. 1999, SATALINO et al. 1999, BINDLISH & BARROS 2000, ZRIBI & DECHAMBRE 2002). Lediglich für sehr raue Oberflächen oder bei deutlichen Reihenstrukturen ist die Gaußfunktion passender (OH et al. 1992, ALTESE et al. 1996). Anhand der Autokorrelationsfunktion kann die Autokorrelationslänge l ermittelt werden. Definitionsgemäß entspricht l jenem Profilverstärker ξ , bei dem die Autokorrelation den Wert e^{-1} annimmt ($e = \text{Eulersche Zahl} \approx 2,71828$).

Hinsichtlich der Autokorrelation haben LE TOAN et al. (1998) sowie DAVIDSON et al. (2000) eine Abhängigkeit von der beprobten Profillänge festgestellt. So ändert sich die Autokorrelationsfunktion einschließlich der Autokorrelationslänge mit der Verlängerung des Profils bis zu einem bestimmten Punkt. Ab dieser Profillänge bleibt l konstant. Um sichere Werte für die Autokorrelation zu gewährleisten, so die Autoren, muss diese Mindestprofillänge angestrebt werden. Diese variiert allerdings mit der Rauigkeit.

Es hat sich gezeigt, dass die Beschreibung der Rauigkeit natürlicher Oberflächen anhand der vorgestellten monoskaligen Parameter s und l nicht immer ausreichend ist (LE TOAN et al. 1998, MATTIA et al. 2000). Natürliche Oberflächen sind zumeist durch eine Überlagerung periodischer Strukturen unterschiedlichster Skalierung gekennzeichnet. Die Beschreibung muss folglich durch multiskalige Modelle erfolgen. Gute Ergebnisse wurden bereits mit den Ansätzen der multiskaligen Rauigkeitsanalyse, dem Fraktalen Oberflächenmodell sowie der Dekomposition des $1/f$ Power Spektrums erzielt. Allerdings steht die Beantwortung der Frage, welche Skalen für die Radarrückstreuung relevant sind, noch aus (LE TOAN et al. 1998, MCDONALD et al. 1999, DAVIDSON et al. 2000).

2.3.1.2 Dielektrische Bodeneigenschaften

Die dielektrischen Eigenschaften werden durch die komplexe Dielektrizitätskonstante ϵ , welche einen realen ϵ' (Durchlässigkeit des Materials) sowie einen imaginären ϵ'' Anteil (Absorption durch das Medium) besitzt, ausgedrückt. Die komplexe Dielektrizitätskonstante wirkt demnach als Steuergröße für die Reflexion bzw. Refraktion, die Absorption sowie die Änderung der Ausbreitungsrichtung einer EM Welle (VAN OEVELEN 2000). Für bestimmte Stoffe ist die Dielektrizitätskonstante, die experimentell bestimmt wurde, aus entsprechenden Tafeln zu entnehmen. Böden stellen allerdings ein Stoffgemisch dar. In diesem Fall resultiert die Dielektrizitätskonstante aus der stofflichen Zusammensetzung des Bodens. Die wesentlichen

Bestandteile sind mineralische Partikel, organische Anteile, Bodenluft sowie Bodenwasser. Das Bodenwasser besitzt aufgrund der hohen Dielektrizitätskonstante von Wasser ($\epsilon' = 80$) den größten Einfluss auf die dielektrischen Eigenschaften des Bodens. Allerdings spielen im Fall eines hohen Salzgehaltes oder bei gehäuftem Auftreten elektrisch leitender Minerale (z.B. Eisenoxide) auch die mineralischen Komponenten eine nicht zu unterschätzende Rolle (DALTON & VAN GENUCHTEN 1986, TAYLOR et al. 1996). Im Allgemeinen kann jedoch, so ULABY (1986), für einen trockenen Boden eine Konstante $2 \leq \epsilon' \leq 4$ angenommen werden.

Die Dielektrizitätskonstante eines Bodens nimmt mit steigender Bodenfeuchte zu. Die Funktion für ϵ' bzw. ϵ'' in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte ist allerdings für jede Bodenart verschieden. Zudem muss die Wellenlänge der EM Welle berücksichtigt werden. Dies wurde unter anderem durch HALLIKAINEN et al. (1985), DOBSON et al. (1985) und DOBSON & ULABY (1986) experimentell nachgewiesen (Abb. 2.15). Der Anstieg der Kurven ist zunächst sehr flach. Für einen sehr geringen Bodenwassergehalt ist der Anteil des nicht fest gebundenen und somit dielektrisch wirksamen Wassers gering. Ein weiterer Anstieg der Bodenfeuchte bewirkt dann einen raschen Anstieg von ϵ' und ϵ'' .

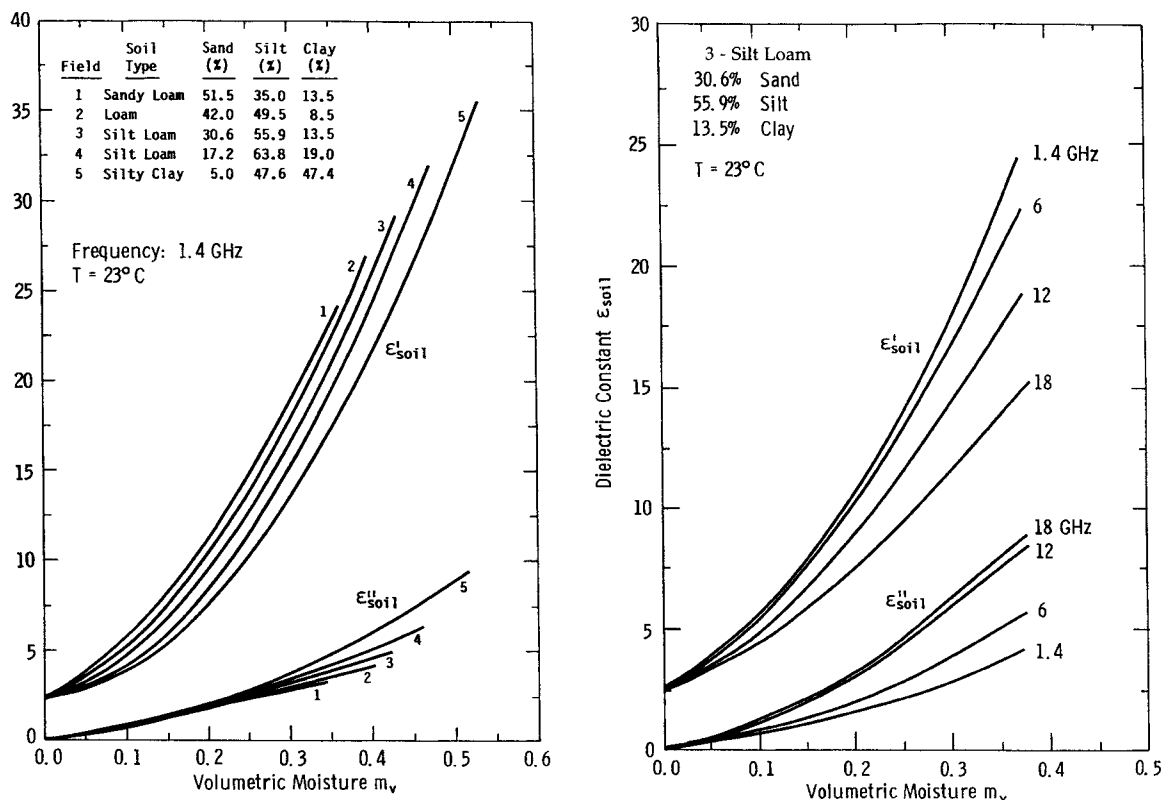


Abb. 2.15: Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und ϵ für verschiedene Bodenarten und Frequenzen, HALLIKAINEN et al. (1985)

Somit lässt sich für jeden Boden ein empirischer Zusammenhang zwischen der Dielektrizitätskonstante und der Bodenfeuchte finden. Neben der Bodenart sind jedoch auch der Anteil an organischem Material (MAHR & HORN 1991) sowie die Bodentemperatur (PEPIN et al. 1995) für die Herleitung der Korrelationsfunktion zu berücksichtigen.

Die Messung der Dielektrizitätskonstante kann auf Basis der *Time Domain Reflectometry* (TDR) erfolgen. Dieses Verfahren basiert auf der Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit eines elektromagnetischen Pulses von der elektrischen Kapazität und somit der Dielektrizitätskonstante eines Mediums

(HEIMOVAARA 1993). Der Impuls läuft, wie in Abb. 2.16 dargestellt, entlang der Metallstäbe der Sonde. Am unteren Ende der Stäbe wird die Welle reflektiert und kehrt zu ihrem Ausgangspunkt zurück. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des EM Pulses wird durch den die Stäbe umgebenden Boden bestimmt. Da die Laufzeiten sehr kurz sind (etwa 4 Nanosekunden), muss eine höchst präzise Zeitmessung stattfinden (IMKO MICROMODULTECHNIK GMBH 2003). Die Dielektrizitätskonstante lässt sich dann anhand der folgenden Gleichung berechnen:

$$V_{EM-Puls} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} \quad 2.63$$

Die Geschwindigkeit des Pulses $V_{EM-Puls}$ ergibt sich aus der Stablänge s der TDR-Sonde und der Laufzeit t ($V_{EM-Puls} = 2s/t$). Die Lichtgeschwindigkeit c sowie die magnetische Permeabilität μ_r sind Konstanten (μ_r kann für nicht magnetische Stoffe Null gesetzt werden) (IMKO MICROMODULTECHNIK GMBH 2003).

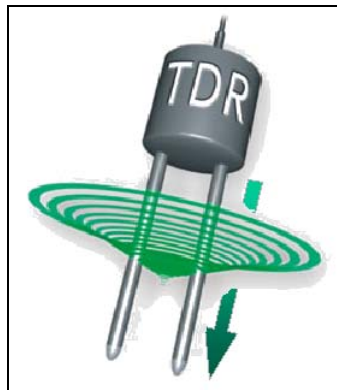


Abb. 2.16: Funktionsweise des *Time Domain Reflectometry* Verfahrens, verändert nach IMKO MICROMODULTECHNIK GMBH (2003)

Die Umrechnung in volumetrische Bodenfeuchte m_v kann dann entsprechend der oben vorgestellten Zusammenhänge erfolgen. Jedoch werden dabei nicht alle relevanten Bodenparameter berücksichtigt. Mit der modellbasierten Berechnung von m_v aus ϵ' bzw. der Kalibrierung der TDR-Messungen befasst sich eine Vielzahl von Untersuchungen (z.B. MAHR & HORN 1991, DASBERG & HOPMANS 1992, ROTH et al. 1992, DIRKSEN & DASBERG 1993, HEIMOVAARA 1993, JACOBSON & SCHJØNNING 1993, MAHESHWARLA et al. 1995, PEPIN et al. 1995, BOHL 1996, DATHE & DIEKKRÜGER 1996, MALLANTS et al. 1996). Ziel der meisten dieser Arbeiten ist die Etablierung eines Zusammenhangs zwischen m_v und ϵ' . Bei dessen Herleitung werden messbare Bodeneigenschaften wie die Korngrößenverteilung, das Porenvolumen, die Temperatur sowie der Anteil organischen Materials berücksichtigt. Die Berechnung der volumetrischen Bodenfeuchte erfolgt dann letztlich auf Basis eines Polynoms dritter Ordnung (Gl. 2.64). Die Parameter a , b , c und d ergeben sich aus den Bodeneigenschaften.

$$m_v = a + b\epsilon' + c\epsilon'^2 + d\epsilon'^3 \quad 2.64$$

Ein wesentlicher Vorteil der *Time Domain Reflectometry* in der Radarfernerkundung ist, dass die Dielektrizitätskonstante des Bodens direkt und *in situ* gemessen wird. Sämtliche Fehler, welche bei der Umrechnung von Bodenfeuchte in die Dielektrizitätskonstante auftreten können, werden somit ausgeschlossen. Für die Rückstreuereigenschaften des Bodens ist dessen Dielektrizitätskonstante relevant, nicht ausschließlich dessen Bodenfeuchte. Außerdem wird ϵ' im Gegensatz zu m_v in der Mehrzahl der Rückstreumodelle verwen-

det. Erst wenn die Dielektrizitätskonstante auf Basis der Radarrückstreuung sicher ermittelt wurde, ist die Berechnung der Bodenfeuchte anhand ϵ' unter Berücksichtigung der Bodenparameter sinnvoll.

Während bei der *Time Domain Reflectometry* die Bodenfeuchte indirekt aus der gemessenen Dielektrizitätskonstante bestimmt wird, erfolgt bei gravimetrischen Verfahren eine direkte Erhebung dieses Parameters. Im Gelände werden hierzu Bodenproben mit einem vorgegebenen Volumen entnommen und eingewogen. Durch die Trocknung dieser Proben wird ihnen der überwiegende Teil des Wassers entzogen. Eine anschließende zweite Wägung bildet die Grundlage für die Berechnung der Gewichts-differenz und somit die Ermittlung des Wasseranteils. Für eine exakte Beschreibung dieses Verfahrens ist die DIN 19682-5 heranzuziehen (siehe auch DIN 19683-12 & DIN 18121-1). Das Resultat der gravimetrischen Bodenfeuchtebestimmung ist der Massenanteil des Bodenwassers an der Gesamtmasse der Bodenprobe. Im Gegensatz dazu steht die Einheit der Bodenfeuchte, die mittels *Time Domain Reflectometry* ermittelt wurde. Hier wird der volumetrische Anteil des Wassers am Bodenvolumen angegeben. Volumetrische und gravimetrische Bodenfeuchte sind nicht ohne weiteres ineinander umzurechnen. Für diesen Schritt ist die Dichte des Bodens (ρ_B) zu bestimmen. Allerdings stört jede Bodenentnahme auch dessen Gefüge und somit die Dichte. Daher ist dieses Verfahren fehlerbehaftet. Unter der Annahme der Verfügbarkeit der Bodendichte ließe sich die volumetrische Bodenfeuchte m_v anhand der gravimetrischen Werte m_g wie folgt ermitteln:

$$m_v = \frac{m_g \cdot \rho_B}{\rho_W} \quad 2.65$$

Dabei steht ρ_W im Nenner für die Dichte von Wasser (DIN 19683-12).

2.3.1.3 Vegetationsparameter

Zwar werden in dieser Arbeit keine Radarrückstreuemodelle für Vegetation verwendet, jedoch stellt die Vegetation eine der bedeutendsten Einflussgrößen auf den Prozess der Radarrückstreuung dar. Aus diesem Grund erfolgt eine kurze Darstellung der wichtigsten Vegetationsparameter.

In einfachen unkohärenten Rückstreuomodellen wird die Vegetation als eine den Boden überdeckende isotrop streuende Schicht mit bestimmten dielektrischen Eigenschaften angesehen (z.B. ATTEMA & ULABY 1978). Entsprechend einfach gestaltet sich die Messung der für solche Modelle notwendigen Vegetationsparameter. Zu messen sind hier die Biomasse bzw. der Pflanzenwassergehalt für eine vorgegebene Fläche sowie die Vegetationshöhe. Anhand der Biomasse und der Vegetationshöhe lässt sich die Biomassendichte der den Boden überdeckenden Schicht berechnen.

Andere Vegetationsmodelle unterteilen die Vegetationsschicht in mehrere Teilschichten. Beispielsweise untergliedern ULABY et al. (1990) die Biomasse eines Waldes in zwei Ebenen. Die obere Ebene entspricht dem Kronendach, die untere Ebene den Stämmen. Hier ist die Biomasse für die jeweilige Ebene getrennt zu ermitteln.

Mittels kohärenter Vegetationsmodelle wird versucht, die Streuprozesse an der Vegetation so zu simulieren, dass jedem Streuprozess ein bestimmter Teil der Pflanze zugeordnet werden kann (CLOUDE & CORR 2003). So wird ein Baum häufig in die Komponenten Stamm, Äste und Blätter zerlegt (z.B. BÖRNER & PAPATHANASSIOU 1998). Die Ausrichtung sowie die Ausprägung der jeweiligen Komponenten ist dann von Interesse. Beispielsweise besitzt ein Laubblatt andere Rückstreuungseigenschaften als ein Nadelblatt. Entsprechend der Anforderungen der Modelle mehren sich die relevanten Vegetationseigenschaften. Wichtige

Größen sind Verteilung und Dichte der einzelnen Pflanzen, Stiel- bzw. Stammdurchmesser, Anordnung und Durchmesser der Zweige und Äste sowie Form und Anordnung der Blätter. Außerdem ist der Wassergehalt (bzw. die Dielektrizitätskonstante) jeder separat betrachteten Komponente der Pflanze zu untersuchen. Die kohärenten Vegetationsmodelle beziehen sich vornehmlich auf große Pflanzen wie Bäume. Die Vegetationsstruktur ist hier zu inhomogen, als dass einfache unkohärente Rückstreumodelle brauchbare Ergebnisse liefern könnten.

2.3.2 Rückstreumodelle für Oberflächenparameter

2.3.2.1 Modelle auf Basis der Intensitäten

Die Mehrzahl der Radarrückstreumodelle verwendet ausschließlich die Amplitudenwerte der Radardaten. Zwar werden die Intensitäten verschiedener Polarisierungen berücksichtigt, die Phaseninformation bzw. polarimetrische Parameter finden jedoch keinen Eingang. Im Folgenden wird eine Auswahl derartiger Modelle vorgestellt.

2.3.2.1.1 Das Fresnel Gesetz als eine Grundlage der Radarrückstreumodellierung

Das Fresnel Gesetz beschreibt die Reflexionseigenschaften und die Durchlässigkeit eines Mediums für elektromagnetische Wellen in Abhängigkeit von der Dielektrizitätskonstante ε . Des Weiteren wirken sich die Polarisation der EM Welle und der lokale Einfallswinkel θ auf diese Eigenschaften aus. Die Fresnel Reflexivität Γ_p für ein homogenes Bodenpaket mit glatter Oberfläche wird für eine horizontale bzw. vertikale Polarisation anhand des folgenden Zusammenhangs bestimmt (DOBSON & ULABY 1998):

$$\Gamma_h = \left| \frac{\cos\theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}} \right|^2 \quad 2.66$$

$$\Gamma_v = \left| \frac{\varepsilon \cos\theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}}{\varepsilon \cos\theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}} \right|^2$$

Die Fresnel Reflexivität gibt an, welcher Teil der einfallenden Strahlung innerhalb einer Einheitsfläche reflektiert wird. Aus der Reflexivität Γ_p ergibt sich die Fresnel Durchlässigkeit T_p wie folgt (DOBSON & ULABY 1998):

$$T_p = 1 - \Gamma_p \quad x \in h, v \quad 2.67$$

Sie beschreibt das Verhältnis zwischen der Energiedichte, die in den Boden übertragen wurde, zur Energiedichte der einfallenden EM Welle. Das Fresnel Gesetz stellt die Grundlage einiger semiempirischer sowie theoretischer Modellansätze dar (z.B. OH et al. 1992).

2.3.2.1.2 Theoretische Rückstreumodelle

Anhand theoretischer Rückstreumodelle wird versucht, die Natur der Rückstreuung elektromagnetischer Wellen schemenhaft nachzustellen. Grundlage hierfür sind ausschließlich mathematisch sowie physikalisch fundierte Zusammenhänge, eine empirische Komponente besteht nicht. Allerdings existiert nach wie vor kein theoretisches Modell, das imstande ist, die komplexen Vorgänge der Streuung von EM Wellen für das gesamte Rauigkeitsspektrum zu simulieren. Es bestehen lediglich Näherungen, die einen eingeschränkten Definitionsbereich besitzen. Dies sind zum einen die *Kirchhoffsche Annäherung* (KA) für sehr raue Oberflächen sowie das *Small Perturbation Model* (SPM) für glatte Oberflächen. Wie unter Punkt 2.3.1.1 besprochen wurde, ist die Rauigkeit wellenlängenabhängig. Um die Rauigkeitsparameter s und l hinsichtlich der Wellenlänge zu normieren, wurde der Faktor k (Wellenzahl) eingeführt (DOBSON & ULABY 1998):

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad 2.68$$

Der Definitionsbereich verschiedener Modelle hinsichtlich der Rauigkeit kann somit unabhängig von der Wellenlänge mittels ks und kl angegeben werden. Die *Kirchhoffsche Annäherung* gilt für eine Autokorrelationslänge $kl > 6$. Die RMS-Höhe hingegen darf einen maximalen Wert nicht überschreiten. Im Modell wird die tatsächliche Oberfläche durch Tangenten, die jeweils einen bestimmten Abschnitt der Oberfläche repräsentieren, simuliert. Die Länge einer Tangente muss dabei deutlich größer als die Wellenlänge sein. Der vertikale Abstand der Berührungspunkte zwischen Tangente und Oberfläche zweier benachbarter Tangenten hingegen muss deutlich unterhalb der Wellenlänge liegen. Für jede Tangente wird spiegelnde Reflexion angenommen. Somit kann hier die Fresnel Reflexivität Γ_p zum Einsatz kommen (VAN OEVELEN 2000).

Für monostatische Systeme, d.h. Sender und Empfänger befinden sich am selben Ort, wurden aus der KA unter Berücksichtigung weiterer einschränkender Annahmen das *Geometric Optics Model* (GOM) sowie das *Physical Optics Model* (POM) abgeleitet. Die nachstehende Abb. 2.17 fasst die Gültigkeitskriterien hinsichtlich der Oberflächenrauigkeit für die Modelle SPM, GOM und POM zusammen (ULABY et al. 1986, ENGMAN & WANG 1987, OH et al. 1992, DOBSON & ULABY 1998).

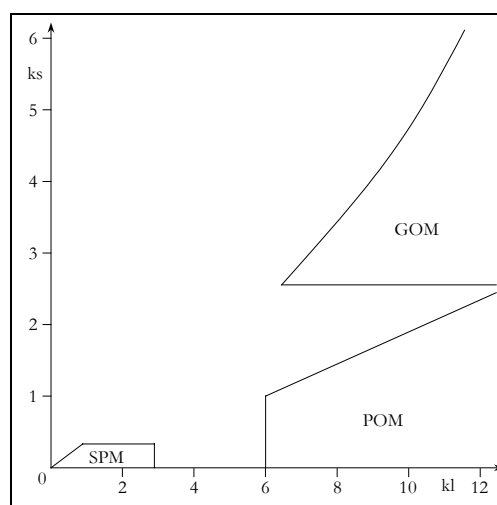


Abb. 2.17: Gültigkeitskriterien theoretischer Modelle hinsichtlich ks und kl , nach OH et al. (1992)

Das SPM kann für glatte Oberflächen mit $ks < 0,3$ sowie $kl < 3$ angewendet werden. Zudem muss der Anstieg m der Oberfläche stets kleiner 0,3 sein. Diese strikten Einschränkungen haben zur Folge, dass dieses Modell lediglich in Kombination mit großen Wellenlängen (L-Band, P-Band) anwendbar ist (ENGMAN & WANG 1987, SHI et al. 1995, DOBSON & ULABY 1998).

Der kopolarisierte Rückstreuoeffizient $\sigma_{pp}^0(\theta)$ kann prinzipiell in eine kohärente und eine nicht-kohärente Komponente zerlegt werden. Allerdings tritt die kohärente Komponente nur in unmittelbarer Nähe des Nadirs auf und kann somit bei den gebräuchlichen SAR vernachlässigt werden. Die nicht-kohärente Komponente wird bei Verwendung einer Gaußfunktion zur Beschreibung der Oberfläche wie folgt berechnet (ULABY et al. 1986, TAYLOR et al. 1996):

$$\sigma_{pp}^0(\theta) = 4k^4 s^2 l^2 \cos^4 \theta |\alpha_{pp}|^2 \exp[-(kl \sin \theta)^2] \quad 2.69$$

Dabei entspricht $|\alpha_{pp}|^2$ im Fall der horizontalen Kopolarisation der Fresnel Reflexivität Γ_b aus Gl. 2.66. Für die vertikale Kopolarisation gilt (ULABY et al. 1986, ENGMAN & WANG 1987):

$$\alpha_{vv} = (\varepsilon - 1) \frac{\sin^2 \theta - \varepsilon(1 + \sin^2 \theta)}{(\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta})^2} \quad 2.70$$

Natürliche Oberflächen lassen sich zumeist besser durch eine Autokorrelationsfunktion exponentieller Natur beschreiben. In diesem Fall wird die Gl. 2.69 folgendermaßen abgewandelt (DOBSON & ULABY 1998, ENGMAN & WANG 1987):

$$\sigma_{pp}^0(\theta) = 4k^4 s^2 l^2 \cos^4 \theta |\alpha_{pp}|^2 \left[1 + 2(kl \sin \theta)^2\right]^{\frac{3}{2}} \quad 2.71$$

Die hier dargestellten Gleichungen für das SPM stellen eine Lösung erster Ordnung dar. Bei diesem Ansatz wird eine kreuzpolarisierte Komponente von Null vorhergesagt. Es existiert ebenso ein Ansatz zweiter Ordnung mit der Möglichkeit, die Kreuzpolarisation zu berechnen (ULABY et al. 1986, ENGMAN & WANG 1987, DOBSON & ULABY 1998, VAN OEVELEN 2000):

$$\sigma_x^0(\theta) = \pi k^4 s^4 \cos^2 \theta \frac{[(\varepsilon - 1)(R_{hh} - R_{vv})]^2}{2} f(W) \quad 2.72$$

Dabei steht $f(W)$ für das Rauigkeitsspektrum. Dieser Ansatz des erweiterten SPM sagt außerdem eine Abhängigkeit des Kopolarisationsverhältnisses von der Rauigkeit voraus (VAN ZYL & KIM 2001). Näheres hierzu findet sich in ULABY et al. (1986).

Das SPM ist vom Konzept her ein Bragg Modell. Eine glatte Oberfläche wird durch Störungen in der Größenordnung der Wellenlänge durchzogen. Diese Störungen können in sogenannte *Spektrale Fourier Komponenten* zerlegt werden. Die zufällige raue Oberfläche wird somit in Komponenten unterschiedlicher Skalen zerlegt. Die gesamte Rückstreuung ergibt sich aus der Summe der Rückstreuung der einzelnen Komponenten. Den größten Einfluss haben jene Komponenten, welche das Bragg Resonanz Kriterium erfüllen (VAN OEVELEN 2000). Detaillierte Ausführungen zur Bragg Rückstreuung finden sich in HENDERSON & LEWIS (1998).

Das *Physical Optics Model* (POM) stellt eine Lösung der KA für Oberflächen mittlerer Rauigkeit dar. Dafür wurde die vektorbasierte KA in einen skalaren Ansatz transformiert. Die Gültigkeitskriterien für das POM lauten $kl > 6$, $P > 2,76s\lambda$ und $m < 0,25$. Damit werden in erster Linie die Bedingungen für die Darstellung der Oberfläche in Form von Tangenten festgelegt. Der kopolarisierte nicht-kohärente Rückstreukoeffizient ist durch das POM wie folgt festgelegt (ENGMAN & WANG 1987, DOBSON & ULABY 1998):

$$\sigma_{pp}^0(\theta) = k^2 \cos^2 \Theta \Gamma_p(\theta) \exp\left[-(2ks \cos \theta)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2ks \cos \theta)^{2n}}{n!}\right] \cdot I \quad 2.73$$

Dabei entspricht Γ_b erneut der Fresnel Reflexivität Γ_b aus Gl. 2.66. Der Parameter I wird durch die Autokorrelationsfunktion bestimmt. Somit ergibt sich I im Falle einer Gaußfunktion wie folgt (ULABY et al. 1986, DOBSON & ULABY 1998):

$$I = \frac{l^2}{n} \exp\left[-\frac{(kl \sin \theta)^2}{n}\right] \quad 2.74$$

Soll die Autokorrelationsfunktion exponentieller Natur sein, gilt die folgende Gleichung (ULABY et al. 1986, DOBSON & ULABY 1998):

$$I = \frac{nl^2}{\left[n^2 + 2(kl \sin \theta)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad 2.75$$

Eine Lösung der Gl. 2.73 ist für den Fall $n = \infty$ nicht gegeben. Allerdings, so DOBSON & ULABY (1998), ist eine Aufsummierung bis $n = 6$ (bzw. $n = 10$ nach ULABY et al. 1986) in der Praxis völlig ausreichend.

Das *Geometric Optics Model* (GOM) gilt für sehr raue Oberflächen. Die Gültigkeitskriterien für das GOM lauten $kl > 6$, $P > 2,76s\lambda$ und $ks \cos \theta > 1,5$. Für alle Einfallswinkel gilt: beide Kopolarisationen sind gleich, die Kreuzpolarisation ist gleich Null. Die Gleichheit der Kopolarisationen basiert auf der Tatsache, dass die Fresnel Reflexivität $\Gamma(0)$ für einen lokalen Einfallswinkel von 0° berechnet wird. Außerdem wird Mehrfachstreuung ausgeschlossen, wodurch keine Kreuzpolarisation auftritt. Der Rückstreukoeffizient für beide Kopolarisationen berechnet sich nach (ENGMAN & WANG 1987, SHI et al. 1991, DOBSON & ULABY 1998):

$$\sigma_{pp}^0 = \frac{\Gamma(0) \exp\left[-\frac{\tan^2 \theta}{2m^2}\right]}{2m^2 \cos^4 \theta} \quad 2.76$$

Der Parameter m steht für den Anstieg der RMS-Oberfläche. Nach DOBSON & ULABY (1998) liefert das Modell für lokale Einfallswinkel bis 60° gute Ergebnisse. Allerdings besteht in der Modellannahme, dass keine Kreuzpolarisation auftritt, ein erheblicher Schwachpunkt des Ansatzes. Entsprechendes gilt für das POM.

Obwohl anhand der vorgestellten theoretischen Modelle durchaus brauchbare Ergebnisse erzielt werden können, liegt deren Nachteil in der starken Einschränkung ihrer Anwendung aufgrund des engen Gültigkeitsbereiches (Abb. 2.17). Selbst bei Verwendung aller drei Modelle existiert ein großer Bereich im k_s - k_l Raum, der von keinem Modell abgedeckt wird. Zudem ist die Tatsache, dass anhand der KA Modelle keine Kreuzpolarisation simuliert werden kann, nicht befriedigend (ENGMAN & WANG 1987, SHI et al. 1991, OH et al. 1992, RAO et al. 1993, DUBOIS et al. 1994, SMACCHIA et al. 1994). Wie diesen Nachteilen beigegeben werden kann, wird in den folgenden zwei Abschnitten dargestellt.

2.3.2.1.3 Verknüpfung der mathematischen Rückstreumodelle – *Integral Equation Method*

Das IEM (*Integral Equation Method*) Modell basiert auf der Verflechtung des KA und des SPM. Es wurde von A.K. Fung entwickelt und 1994 umfassend publiziert (FUNG 1994). Einige vereinfachende Annahmen führten zu einem nahezu uneingeschränkten Definitionsbereich hinsichtlich der Oberflächenrauigkeit. Trotz alledem stellt es nach wie vor eine mathematische Lösung des Rückstreuproblems dar. FUNG (1994) entwickelte verschiedene Versionen des IEM. In dieser Arbeit kommt das *Integral Equation Method* Modell für den Rückstreufall mit einfacher Streuung (*Single Scattering IEM*) zur Anwendung. Mit dieser Version kann die Rückstreuung für den Fall der Kopolarisation ermittelt werden.

Die breite Anwendbarkeit sowie die mathematische Fundierung machten das IEM zu einem der Untersuchungsschwerpunkte in der Radarrückstreumodellierung. In zahlreichen Arbeiten konnten beachtliche Ergebnisse mit diesem Modell erzielt werden (z.B. SMACCHIA et al. 1994, ALTESE et al. 1996, FUNG et al. 1996, DAWSON et al. 1997, HSIEH et al. 1997, HOEBEN & TROCH 1998, VAN OEVELEN & HOEKMAN 1999, SATALINO et al. 1999, BINDLISH & BARROS 2000, SATALINO et al. 2001a). Zudem bauen einige empirische Modelle auf dem IEM auf (z.B. CHEN et al. 1995, SHI et al. 1997).

Für die Version des IEM für den Rückstreufall (monostatisches System) mit einfacher Streuung wird der Term der multiplen Streuung vernachlässigt (FUNG 1994). Der Koeffizient σ_{pp}^0 für die einfache Rückstreuung ergibt sich zu:

$$\sigma_{pp}^0 = \frac{k^2}{2} \exp(-2k_z^2 s^2) \sum_{n=1}^{\infty} s^{2n} |I_{pp}^n|^2 \frac{W^n(-2k_x, 0)}{n!} \quad 2.77$$

Dabei ergeben sich die Parameter k_z , k_x sowie I_{pp}^n nach Gl. 2.78. $W^n(-2k_x, 0)$ steht für das Rauigkeitsspektrum der Oberfläche. Dieses ergibt sich mittels Fourier Transformation n-ten Grades aus der für s normierten Autokorrelationsfunktion (siehe SPM unter 2.3.2.1.2).

$$k_z = k \cos \theta \quad k_x = k \sin \theta \quad 2.78$$

$$I_{pp}^n = (2k_z s)^n f_{pp} \exp(-s^2 k_z^2) + \frac{k_z [F_{pp}(-k_x, 0) + F_{pp}(k_x, 0)]}{2}$$

Die Parameter f_{pp} sowie F_{pp} sind polarisationsabhängig und werden für die horizontale $[hh]$ sowie die vertikale Kopolarisation $[vv]$ wie folgt berechnet:

$$f_{hh} = \frac{-2R_h}{\cos\theta} \quad f_{vv} = \frac{2R_v}{\cos\theta} \quad 2.79$$

$$F_{hh}(-k_x, 0) + F_{hh}(k_x, 0) = \frac{2\sin^2\theta(1+R_h)^2}{\cos\theta} \left[(1-\mu_r^{-1}) + \frac{\mu_r\epsilon' - \sin^2\theta - \mu_r\cos^2\theta}{\mu_r^2\cos^2\theta} \right]$$

$$F_{vv}(-k_x, 0) + F_{vv}(k_x, 0) = \frac{2\sin^2\theta(1+R_v)^2}{\cos\theta} \left[(1-\epsilon'^{-1}) + \frac{\mu_r\epsilon' - \sin^2\theta - \epsilon'\cos^2\theta}{\epsilon'^2\cos^2\theta} \right]$$

Für die beiden Variablen R_h und R_v wird der Fresnelsche Reflexionskoeffizient der jeweiligen Polarisation eingesetzt (siehe Gl. 2.66). FUNG (1994) schränkt die Gültigkeit des IEM wie folgt ein:

$$(1) \quad (ks)(kl) < 1,2\sqrt{\epsilon'} \quad 2.80$$

$$(2) \quad (ks)(kl) < 1,6\sqrt{\epsilon'}$$

Wird die horizontale Oberflächenrauigkeit anhand einer Gaußfunktion beschrieben, gilt das erste Kriterium in Gl. 2.80. Handelt es sich dabei um eine Funktion exponentieller Natur, sind die Vorgaben weniger streng, dann gilt das zweite Kriterium in Gl. 2.80. Ein weiteres Kriterium lautet $ks < 3$. Für das L-Band ergibt sich daraus eine RMS-Höhe von maximal 12 cm.

Da bei dieser IEM-Version Mehrfachstreuung vernachlässigt wird, kommt es bei vermehrtem Auftreten von Volumenstreuung zu einer Unterschätzung des Rückstreukoeffizienten. Eine Möglichkeit, diesen Nachteil zu umgehen stellt die polarimetrische Zerlegung des Rückstreusignals in die verschiedenen Streuprozesse dar. Für die Auswertung der Daten mit dem *Single Scattering* IEM wird dann lediglich die Komponente der Oberflächenstreuung berücksichtigt (HAJNSEK et al. 1999).

2.3.2.1.4 Semiempirische und empirische Rückstreumodelle

Während die in den vorigen Punkten beschriebenen Modelle mathematischer bzw. theoretischer Natur sind, beinhalten die nun folgenden Modelle eine mehr oder weniger große empirische Komponente. Basis der meisten semiempirischen Rückstreumodelle ist jedoch trotz alledem das Fresnel Gesetz. Empirische Modelle setzen Radar- und Oberflächenparameter in einen theoretisch nicht fundierten Zusammenhang. Die Regeln dieser Modelle basieren zumeist auf einfachen bzw. multiplen Regressionsanalysen (z.B. BERTUZZI et al. 1992).

Nachfolgend werden die Rückstreumodelle von OH et al. (1992), DUBOIS et al. (1995), CHEN et al. (1995) sowie SHI et al. (1997) vorgestellt. Während in den beiden zuletzt genannten Arbeiten Modelle entwickelt wurden, die auf dem IEM basieren, haben OH et al. (1992) ein semiempirisches Rückstreumodell entwickelt, welches das Fresnel Gesetz integriert. Das Modell von DUBOIS et al. (1995) ist empirischer Natur und basiert auf einem äußerst umfangreichen Felddatensatz.

Das Modell von OH et al. (1992) wurde von Y. Oh, K. Sarabandi und F.T. Ulaby entwickelt. Die empirische Komponente basiert auf Scatterometerdaten, die in drei Frequenzen aufgezeichnet wurden (L-, C- und X-Band). Diese haben sie mit den Oberflächenparametern RMS-Höhe und Dielektrizitätskonstante über die Fresnel Reflexivität Γ_0 im Nadir in Beziehung gebracht. Die Oberflächenrauigkeit wurde z.T. mit einem *Laserprofilier* gemessen, die Ermittlung von ε' basierte auf einem Mikrowellenverfahren. Für das Kreuzpolarisationsverhältnis q fanden OH et al. (1992) den folgenden Zusammenhang:

$$q = \frac{\sigma_{hv}^0}{\sigma_{vv}^0} = 0,23\sqrt{\Gamma_0}[1 - \exp(-ks)] \quad 2.81$$

$$\Gamma_0 = \left| \frac{1 - \sqrt{\varepsilon'}}{1 + \sqrt{\varepsilon'}} \right|^2$$

Das Kopolarisationsverhältnis p steht mit den Oberflächenparametern s und ε' laut OH et al. (1992) im nachstehenden Zusammenhang:

$$\sqrt{p} = \sqrt{\frac{\sigma_{hh}^0}{\sigma_{vv}^0}} = 1 - \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^{3\Gamma_0^{-1}} \exp(-ks) \quad 2.82$$

Basierend auf diesen Gleichungen wurden die folgenden Regeln abgeleitet, welche die Oberflächenparameter in eine direkte Beziehung zu den Ko- und Kreuzpolarisationen setzen:

$$\sigma_{hh}^0(\theta, \varepsilon', ks) = g\sqrt{p} \cos^3 \theta [\Gamma_h(\theta) + \Gamma_v(\theta)] \quad 2.83$$

$$\sigma_{vv}^0(\theta, \varepsilon', ks) = \frac{g \cos^3 \theta}{\sqrt{p}} [\Gamma_h(\theta) + \Gamma_v(\theta)]$$

$$\sigma_{hv}^0(\theta, \varepsilon', ks) = q\sigma_{vv}^0(\theta, \varepsilon', ks)$$

$$g = 0,7[1 - \exp(-0,65(ks)^{1,8})]$$

Mit g wurde ein weiterer empirischer Parameter eingeführt, um die Beziehungen zwischen Oberflächenparametern und Radarrückstreuung aufrecht zu erhalten.

Die empirische Komponente innerhalb des Modells verwehrt dessen Anwendung außerhalb des Validierungsbereiches, obgleich OH et al. (1992) auch jenseits dieser Grenzen sinnvolle Ergebnisse nachweisen konnten. Das Modell ist für die folgenden Parametergrenzen definiert: $20^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$; $0,09 \leq m_r \leq 0,31$; $0,1 \leq ks \leq 6$ sowie $2,5 \leq kl \leq 19,7$. Somit existieren auch Vorgaben für l , obwohl dieser Parameter nicht in die Modellgleichungen integriert wurde.

Bei der Analyse sehr glatter Oberflächen im Bereich kleiner Einfallswinkel (Nadirnähe) wird die Radarrückstreuung vom Modell unterschätzt. In diesen Fällen besitzt die Rückstreuung einen hohen kohärenten Anteil, den das Modell nicht berücksichtigt. Bei sehr glatten Oberflächen sollte der Einfallswinkel größer 30° sein.

Für die Inversion des Modells bezüglich ε' wurden die Modellgleichungen kombiniert. Anhand der Rückstreuoeffizienten für die jeweiligen Polarisationen können p und q berechnet werden. Die folgende Gleichung (2.84) gilt es dann zu lösen. Das Ergebnis für ε' führt in Kombination mit Gl. 2.82 zur RMS-Höhe.

$$\left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^{3\Gamma_0^{-1}} \left[1 - \frac{q}{0,23\sqrt{\Gamma_0}}\right] + \sqrt{p} - 1 = 0 \quad 2.84$$

P.C. **Dubois**, J. van Zyl und T. Engman haben ein ebenfalls auf Scatterometerdaten basierendes Radar-rückstreumodell entwickelt (DUBOIS et al. 1995). Dieses Modell ist vollständig empirisch und kann für einen weiten Bereich von Parametern angewandt werden ($30^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$; $k_s \leq 2,5$; $m_v \leq 0,35$ sowie $2,5 \leq kl \leq 20$). Die Vorgaben für die Rauigkeit implizieren die Verwendung großer Wellenlängen. Die Modellgleichungen sind dennoch für Frequenzen zwischen 1,5 und 11 GHz gültig. Als einen Vorteil dieses Modells sehen die Autoren, dass keine Kreuzpolarisation benötigt wird. Um mit Vegetation bestandene Flächen auszumaskieren, muss die Kreuzpolarisation dann dennoch herangezogen werden. Es gilt:

$$\frac{\sigma_{hv}^0}{\sigma_{vv}^0} > -11dB \quad 2.85$$

Ist diese Bedingung erfüllt, ist die Vegetation zu dicht für ein ausreichendes Bodenfeuchtesignal. Gleichzeitig werden Bereiche mit einer zu hohen Oberflächenrauigkeit ausgeschlossen. Dies gilt jedoch nicht für Areale mit periodischer Reihenstruktur. Derartige Erscheinungen werden vom Modell nicht berücksichtigt und sind ebenfalls auszuschließen.

Das Modell berechnet den Rückstreuquerschnitt beider Kopolarisationen in Abhängigkeit vom lokalen Einfallswinkel θ , dem Realteil der Dielektrizitätskonstante ε' , der RMS-Höhe s sowie der Frequenz λ . Die Autokorrelationslänge bleibt wie bei OH et al. (1992) unberücksichtigt:

$$\sigma_{hh}^0 = 10^{-2,75} \frac{\cos^{1,5} \theta}{\sin^5 \theta} 10^{0,028\varepsilon' \tan \theta} (ks \sin \theta)^{1,4} \lambda^{0,7} \quad 2.86$$

$$\sigma_{vv}^0 = 10^{-2,35} \frac{\cos^3 \theta}{\sin^3 \theta} 10^{0,046\varepsilon' \tan \theta} (ks \sin \theta)^{1,1} \lambda^{0,7}$$

Für die Inversion des Modells werden beide Gleichungen kombiniert und hinsichtlich ε' oder s numerisch gelöst. Ein Lösungsansatz findet sich in VAN ZYL & KIM (2001).

Um die Qualität des Modells zu testen, zogen DUBOIS et al. (1995) Radarbilder flugzeug- und shuttlegetragener Sensoren heran und invertierten diese anhand des Modells in Bodenfeuchte und RMS-Höhe. Die guten Ergebnisse sind jedoch kritisch zu betrachten, da die Daten als Zeitreihen ausgewertet wurden. Somit blieben alle Parameter bis auf die Bodenfeuchte nahezu konstant. Das eigentliche Gewicht der in diesem Fall konstanten Parameter wird ausgeklammert. Für derartige Experimentkonfigurationen liefern einfache Regressionsmodelle ebenfalls exzellente Resultate. Eine weitreichende Validierung über den gesamten Gültigkeitsbereich aller Parameter wurde nicht durchgeführt.

Unter der Prämisse, dass das *Single Scattering* IEM die Radarrückstreuung in Abhängigkeit der eingehenden Parameter korrekt simuliert, entwickelten K.S. **Chen**, S.K. Yen & W.P. Huang ein einfaches Regressionsmodell (CHEN et al. 1995). Dieses basiert auf der Analyse eines immensen Datensatzes aus zweitausend Parameterkombinationen, für welche mittels des IEM die Rückstreukoeffizienten berechnet wurden. Anhand dieser Simulationen wurde quasi indirekt nach einem elementarerem mathematischen Ausdruck für das IEM gesucht. Anstelle der beiden Kopolarisationen verwendeten sie das Kopolarisationsverhältnis, um den Einfluss der Oberflächenrauigkeit zu minimieren. Außerdem weisen sie darauf hin, dass die Sensitivität des Modells hinsichtlich der Oberflächenrauigkeit im Bereich niedriger Frequenzen weiter zurückgeht und daher große Wellenlängen zu bevorzugen sind. Das finale lineare Regressionsmodell berücksichtigt keine Rauigkeitsparameter. Anhand des Kopolarisationsverhältnisses $\sigma^0_{(hh)/(vv)}$, des lokalen Einfallswinkels θ sowie der Frequenz f kann die Bodenfeuchte m_v berechnet werden:

$$\ln m_v = C_1 \sigma^0_{(hh)/(vv)} + C_2 \theta + C_3 f + C_4 \quad 2.87$$

Den empirischen Koeffizienten C_x sind die folgenden Zahlenwerte zuzuordnen: $C_1 = -0,09544$; $C_2 = -0,00971$; $C_3 = 0,02924$ und $C_4 = -1,74678$. Die Validierung des Modells durch die Autoren führte zu guten Ergebnissen. Allerdings schränkt die Tatsache, dass keine Rauigkeitsparameter berücksichtigt werden, die Anwendbarkeit hinsichtlich der Invertierung von Radardaten in Oberflächenparameter deutlich ein. In Kombination mit anderen Rückstreumodellen könnte es jedoch aufgrund der rauigkeitsunabhängigen Kalkulation der Bodenfeuchte die Inversion von Radardaten erleichtern. Vorauszusetzen ist allerdings eine noch ausstehende umfassende Validierung des Modells.

Auf vergleichbare Art und Weise zu CHEN et al. (1995) haben J. **Shi**, J. Wang, A.Y. Hsu, P.E. O'Neill und T. Engman ein auf Simulationen basiertes Rückstreumodell entwickelt (SHI et al. 1997). Diese Simulationen wurden ebenfalls anhand des IEM durchgeführt. Jedoch werden von diesen Autoren auch Rauigkeitsparameter berücksichtigt. Um die Inversion zu vereinfachen, kombinieren sie die RMS-Höhe mit der Autokorrelationsfunktion. Der neue Rauigkeitsparameter S_R ergibt sich folgendermaßen: $S_R = (k_s)^2 W$. Dabei wird W auf Basis einer Fourier Transformation anhand der bekannten Autokorrelationsfunktion berechnet.

Das Rückstreumodell von SHI et al. (1997) stellt einen Hybriden aus theoretischen Ansätzen und empirischen Komponenten dar. Aufgrund der Einschränkung des Wellenlängenbereiches auf das L-Band war es möglich, das Fresnel Gesetz bzw. das SPM im Rückstreumodell, siehe Parameter a_{pps} , zu berücksichtigen. In ihrem Ansatz berechnen die Autoren zu Beginn die Dielektrizitätskonstante der Oberfläche:

$$10 \log 10 \left[\frac{|\alpha_{vv}|^2 + |\alpha_{hh}|^2}{\sigma_{vv}^0 + \sigma_{hh}^0} \right] = a_{vh}(\theta) + b_{vh}(\theta) 10 \log 10 \left[\frac{|\alpha_{vv}| |\alpha_{hh}|}{\sqrt{\sigma_{vv}^0 \sigma_{hh}^0}} \right] \quad 2.88$$

wobei

$$\alpha_{hh} = \frac{\varepsilon' - 1}{\left(\cos \theta + \sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \theta} \right)^2}$$

$$\alpha_{vv} = (\varepsilon - 1) \frac{\sin^2 \theta - \varepsilon(1 + \sin^2 \theta)}{(\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta})^2}$$

$$a_{vh}(\theta) = \exp(-12,37 + 37,206 \sin(\theta) - 41,187 \sin^2(\theta) + 18,898 \sin^3(\theta))$$

$$b_{vh}(\theta) = 0,649 + 0,659 \cos(\theta) - 0,306 \cos^2(\theta)$$

Für die ermittelte Dielektrizitätskonstante kann dann anhand der folgenden Gleichung der Rauigkeitsparameter S_R berechnet werden:

$$10 \log 10 \left[\frac{|\alpha_{pp}|^2}{\sigma_{pp}^0} \right] = a_{pp}(\theta) + b_{pp}(\theta) 10 \log 10 \left[\frac{1}{S_R} \right] \quad 2.89$$

wobei

$$a_{vv}(\theta) = -6,901 + 5,492 \tan(\theta) - 1,051 \log(\sin(\theta))$$

$$b_{vv}(\theta) = 0,515 + 0,896 \sin(\theta) - 0,475 \sin^2(\theta)$$

Für die durch SHI et al. (1997) festgelegten Wertebereiche der einfließenden Parameter ergaben sich nur geringfügige Abweichungen zwischen ihrem Modell und dem IEM. Die anschließende Validierung des Modells anhand realer Radardaten führte ebenfalls zu recht guten Ergebnissen. Allerdings ist auch hier analog zur Arbeit von DUBOIS et al. (1995) anzumerken, dass die Validierung z.T. anhand von Zeitserien erfolgte, was den Einfluss der Rauigkeit auf die Validierung reduziert respektive ausschaltet.

Neben den vorgestellten vier semiempirischen und empirischen Rückstreumodellen existiert eine Reihe weiterer vergleichbarer Modelle bzw. Inversionsverfahren, die hier nicht im Detail vorgestellt werden sollen. So stellen beispielsweise ZRIBI & DECHAMBRE (2002) ein empirisches Modell vor, bei dem analog zu SHI et al. (1997) die Inversion dadurch vereinfacht wird, dass beide Rauigkeitsparameter kombiniert werden. Allerdings stehen die Aussagen der Autoren hinsichtlich des Verhältnisses zwischen s und l konträr zu den Untersuchungen von LE TOAN et al. (1998) sowie DAVIDSON et al. (2000).

BERTUZZI et al. (1992) entwickelten ein auf der KA basierendes Inversionsverfahren für die Bestimmung von Bodenfeuchte. Dieser Ansatz verfolgt die Idee, das Radarrückstreusignal hinsichtlich der Parameter θ und s zu normieren. Da l bei diesem Ansatz vernachlässigt wird, kann schlussendlich der Rückstreukoeffizient direkt mit der Bodenfeuchte in Verbindung gebracht werden. Allerdings wurde dieses Inversionsverfahren nur für einen sehr engen Einfallswinkel- und Rauigkeitsbereich validiert.

LIN et al. (1994) formulierten einen empirischen Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und Radarrückstreuung für ein grasbedecktes Gebiet. Dieser festgestellte Zusammenhang basiert auf einem multiplen Regressionsverfahren (ACE), das zur Ermittlung der optimalen Transformation der Modellparameter in Rückstreuwerte herangezogen wurde. Datenlücken im Parameterset wurden durch ein existierendes semiempirisches Modell ergänzt. Die Oberflächenrauigkeit blieb bei diesem Ansatz unberücksichtigt. Weitere empirische Arbeiten sind beispielsweise jene von ULABY & BATLIVALA (1976), BRADLEY & ULABY (1981), DOBSON & ULABY (1986), BRUCKLER et al. (1988), ROMBACH et al. (1993), MAUSER et al. (1994), WEVER & HENKEL (1995) oder SCHNEIDER & OPPELT (1998).

2.3.2.2 Verwendung der Radarpolarimetrie für die Radarrückstreumodellierung

Alle unter Punkt 2.3.2.1 diskutierten Radarrückstreumodelle bringen die Oberflächenparameter mit der Intensität der Radarrückstreuung in Verbindung. Zwar besitzt der Großteil der theoretischen sowie semiempirischen Modelle die Eigenschaft, nur Einfachstreuung zu simulieren, die Information der polarimetrischen Phase (Objektphase) bleibt allerdings unberücksichtigt. Mit der Erschließung dieser Informationsquelle für die Extrahierung von Oberflächenparametern befassen sich einige neue Ansätze der Radarpolarimetrie. Besonders die Tatsache, dass der Streuprozess von der Geometrie des Streuobjektes abhängig ist, spricht für die Zweckmäßigkeit der Polarimetrie hinsichtlich der Extrahierung der Oberflächenrauigkeit (HAJNSEK et al. 1999, CLOUDE et al. 2000, HAJNSEK et al. 2001a, b, HAJNSEK et al. 2003a, b).

Hinzu kommt die Möglichkeit, die Streumatrix in ihre Komponenten zu zerlegen und in diesem Zusammenhang Einfachstreuung von Mehrfachstreuung zu separieren. Die Intensität der Einfachstreuung wird dann als Input für diejenigen unter Punkt 2.3.2.1 behandelten Radarrückstreumodelle verwendet, die für Einfachstreuung entwickelt wurden (z.B. SHI et al. 1997).

2.3.2.2.1 Einsatz polarimetrisch vorverarbeiteter Daten für die Rückstreumodellierung

SHI et al. 1997 verwenden für die Validierung ihres Rückstreumodells vollpolarimetrische Daten. Diese Tatsache eröffnete ihnen die Möglichkeit, den Anteil der Mehrfachstreuung sowie des Systemrauschens aus dem Gesamtsignal zu eliminieren und lediglich mit der *Single Scattering* Komponente zu arbeiten. Dieser Ansatz brachte simulierte und gemessene Werte in einen besseren Zusammenhang. Um den Anteil der Einfachstreuung aus der Streumatrix zu extrahieren, führten sie eine Eigenvektordekomposition durch. Als Ergebnis stehen drei Kovarianzmatrizen zur Verfügung, wobei jede einen Streumechanismus repräsentiert. Dabei ist Oberflächenstreuung in der ersten Kovarianzmatrix $[C_1]$ zu finden. HAJNSEK et al. (1999) erreichten durch diese Methodik einen Zuwachs der für das Oh- und das Dubois-Modell gültigen Auflösungszellen (Zunahme des Flächenanteils, für den die Modellbedingungen eingehalten werden). Eine deutliche Verbesserung der Modellergebnisse hingegen wurde nicht erreicht. Ursächlich hierfür könnte sein, dass die empirische Komponente beider Modelle, obwohl die Prämisse der Einfachstreuung bestand, auf Basis eines Datensatzes mit allen Streuanteilen abgeleitet wurde.

Der Teil der Einfachstreuung kann ebenfalls anhand der Kohärenzmatrix $[T]$ berechnet werden. Analog zur Kovarianzmatrix repräsentiert die erste Kohärenzmatrix $[T_1]$ die Komponente der Oberflächenstreuung. Die entsprechenden Rückstreukoeffizienten ergeben sich nach HAJNSEK (2001) wie folgt:

$$\sigma_{hh}^0 = 10 \cdot \log_{10} \frac{[t_{11} + t_{14} + 2\Re(t_{12})] \sin \theta}{2 \cdot 10^6} \quad 2.90$$

$$\sigma_{vv}^0 = 10 \cdot \log_{10} \frac{[t_{11} + t_{14} - 2\Re(t_{12})] \sin \theta}{2 \cdot 10^6}$$

$$\sigma_{hv}^0 = 10 \cdot \log_{10} \frac{t_{16} \sin \theta}{2 \cdot 10^6}$$

Die Komponenten t_{ij} stehen für die jeweiligen Elemente der ersten Kohärenzmatrix. Die Extrahierung der *Single Scattering* Komponente aus vollpolarimetrischen SAR Daten für die Lösung theoretischer Rückstreumodelle erster Ordnung stellt eine Alternative zur Lösung der theoretischen Ansätze höherer Ord-

nung dar. Allerdings muss eine exakte polarimetrische Kalibrierung der SAR-Daten gegeben sein (ZINK & KIETZMANN 1995, HAJNSEK et al. 1999).

2.3.2.2.2 Erweitertes Bragg Scattering Modell auf Basis des SPM

Das SPM zeichnet sich innerhalb seines Gültigkeitsbereiches durch eine gute Performance aus. Allerdings ist es aufgrund seiner restriktiven Rauheitsvorgaben nur sehr eingeschränkt anwendbar. Um diese Restriktionen zu lockern, haben sich beispielsweise S.R. Cloude, I. Hajnsek, K.P. Papathanassiou, E. Pottier, A. Moreira sowie J.-L. Alvarez-Perez mit der Erweiterung des SPM befasst (CLOUDE et al. 2000, HAJNSEK et al. 2003a, b). Das Resultat ist ein Modell, das aus einem Bragg Rückstreuterm und einer Rauheitskomponente besteht. Die Rauheit wird als rotationssymmetrische Störung der Oberfläche simuliert. Dafür wird die Bragg Kohärenzmatrix um den Winkel β (Winkel zwischen Oberfläche und Streufläche) gedreht. Dieses Modell berücksichtigt kreuzpolarisierte Rückstreuung sowie Depolarisationseffekte. SCHULER et al. (2002) weisen auf eine Reihe ähnlicher „Zwei-Skalen“ Bragg Modelle hin. CLOUDE et al. (2000) formulierten ihr Modell wie folgt:

$$[T] = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \sin c(2\beta_1) & 0 \\ C_2 \sin c(2\beta_1) & C_3(1 + \sin c(4\beta_1)) & 0 \\ 0 & 0 & C_3(1 - \sin c(4\beta_1)) \end{bmatrix} \quad 2.91$$

wobei

$$\begin{aligned} C_1 &= |R_S + R_P|^2 \\ C_2 &= (R_S + R_P)(R_S^* - R_P^*) \\ C_3 &= \frac{1}{2} |R_S - R_P|^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_S &= \alpha_{hh} \\ R_P &= \alpha_{vv} \end{aligned} \quad \text{siehe SPM, Gl. 2.69}$$

$$\sin c(x) = \frac{\sin(x)}{x}$$

In dieses Modell gehen die Parameter ε' , θ , und β_1 ein. Dabei wird β_1 durch k_s bestimmt. Die Autokorrelationslänge bleibt unberücksichtigt.

Fortführend konnten die Autoren für die Polarimetrischen Parameter Alphawinkel α , Entropie H sowie Anisotropie A eine theoretische Abhängigkeit von Oberflächenparametern herleiten. So wird die Anisotropie A lediglich von der Oberflächenrauheit bestimmt, hinsichtlich der dielektrischen Eigenschaften ist sie nicht sensitiv. Im Gegensatz dazu werden α und H durch ε' , β_1 , und θ gesteuert. Anhand der in Gl. 2.91 festgehaltenen Zusammenhänge können für jedes Set aus Polarisationsparametern die entsprechenden Oberflächenparameter ermittelt werden. Die RMS-Höhe wird anhand des linearen Zusammenhangs direkt aus der Anisotropie ermittelt, die Dielektrizitätskonstante ergibt sich aus der Kombination von Entropie und Alphawinkel (CLOUDE et al. 2000, HAJNSEK et al. 2003b).

2.3.2.2.3 Polarimetrische Kohärenz und Oberflächenrauigkeit

Nachdem MATTIA et al. (1997) einen Zusammenhang zwischen der Polarimetrischen Kohärenz und der Oberflächenrauigkeit nachweisen konnten, haben sich SCHULER et al. (2001 & 2002) in ihren Arbeiten einer eingehenderen Untersuchung dieser Thematik anhand von Labordaten (*anechoic chamber*) und SAR Daten eines flugzeuggetragenen Sensors (*AIR SAR*) gewidmet. Sie wählten ebenfalls die zirkulare Polarisationsbasis und berechneten die Polarimetrische Kohärenz $|\rho_{RLL}|$ zwischen beiden Kopolarisationen:

$$\rho_{RLL} = \frac{\langle S_{RR} \cdot S_{LL}^* \rangle}{\sqrt{\langle S_{RR} S_{RR}^* \rangle \langle S_{LL} S_{LL}^* \rangle}} \quad 2.92$$

Erwartungsgemäß stellten sie eine Abnahme von $|\rho_{RLL}|$ mit zunehmender RMS-Höhe fest. Ab einer Überschreitung von $\kappa_s = 1$ ($|\rho_{RLL}| \approx 0,15$) traten starke Depolarisationseffekte auf, die zu einer Zufallsverteilung der Phase in beiden Polarisationen führten.

Die dielektrischen Eigenschaften der Oberfläche wirken sich nicht auf die Polarimetrische Kohärenz aus. Dies deckt sich mit der Modellaussage des Erweiterten *Bragg Scattering* Modells (Punkt 2.3.2.2.2) (HAJNSEK et al. 2003b). SCHULER et al. (2001 & 2002) stellen den empirischen Zusammenhang zwischen $|\rho_{RLL}|$ und κ_s anhand einer Exponentialfunktion dar:

$$|\rho_{RLL}| = \exp(a_0 + a_1(\kappa_s) + a_2(\kappa_s)^2 + a_3(\kappa_s)^3 + a_4(\kappa_s)^4) \quad 2.93$$

Den empirischen Koeffizienten a_k sind die folgenden Zahlenwerte zuzuordnen: $a_0 = -0,0034$; $a_1 = -1,26$; $a_2 = -1,07$; $a_3 = 1,464$ und $a_4 = -0,387$. Aufgrund der Abhängigkeit der Polarimetrischen Kohärenz vom lokalen Einfallswinkel (v.a. für große azimutale Hangneigungen) gilt dieser Zusammenhang nur für $\theta \approx 57^\circ$ – für diesen Bereich wurden die Daten erhoben.

Aus einer Reihe theoretischer Ansätze leiten SCHULER et al. (2002) außerdem die folgende Beziehung zwischen den Rauigkeitsparametern s und l sowie dem lokalen Einfallswinkel θ her. Der Einfluss des lokalen Einfallswinkels auf $|\rho_{RLL}|$ wird hiermit verdeutlicht.

$$|\rho_{RLL}| = e^{-16 \frac{s^2}{l^2 \sin^2 \theta}} \quad 2.94$$

Verbesserte Korrelationen mit κ_s erreichten die Autoren für den Realteil der Polarimetrischen Kohärenz $\text{Re}[\rho_{RLL}]$. Die Einflüsse der Vegetation sind hier reduziert, da unsymmetrisch reflektierende Objekte wie Pflanzen nur einen geringen Einfluss auf $\text{Re}[\rho_{RLL}]$ besitzen.

Außerdem führten die Verfasser einen Vergleich zwischen $|\rho_{RLL}|$ und der Anisotropie \mathcal{A} hinsichtlich der Sensitivität für κ_s durch. Für in Azimut symmetrische Streuer (die Kohärenzmatrix ist dann diagonal) sind beide Ansätze gleich. Unterschiede ergeben sich, sofern die Streuer eine unsymmetrische azimutale Komponente besitzen. So stellten SCHULER et al. (2002) fest, dass vor allem für kleine RMS-Höhen ($\kappa_s < 0,5$) die Polarimetrische Kohärenz deutlich besser mit κ_s korreliert ist.

2.4 Klassifikationsansätze für SAR Daten

Klassifikation in der Fernerkundung bedeutet die Zusammenfassung von Pixels ähnlicher Signatur zu bestimmten Klassen. Art und Zahl der Klassen werden vom Nutzer festgelegt. Da auch in dieser Arbeit Klassifikationsverfahren zum Einsatz kamen, soll hier kurz auf die wichtigsten Methoden und aktuelle Ansätze eingegangen werden.

Optische Fernerkundungsdaten liefern andere Informationen als Radardaten. Die Reflexion des Sonnenlichts findet an der Oberfläche des jeweiligen Objektes statt. Unterschiede in der Reflexion des Lichts sind auf molekularer Ebene zu suchen. Die Sensitivität der Mikrowellen bezüglich der geometrischen Struktur sowie der dielektrischen Eigenschaften der Streuer hingegen führt zur Betonung anderer Landoberflächenparameter. Dieser Hintergrund ist bei der Klassifikation von Radardaten nicht aus den Augen zu verlieren. Während mit optischen Daten unter Umständen mehrere Wasserklassen aufgrund der Wasserbestandteile (z.B. Algen, gelöste Stoffe, Schwebfracht) unterschieden werden können, sind bei Radardaten Wellengang oder Variationen im Salzgehalt (bei passiven Systemen) von entscheidender Bedeutung. Während die Trennung verschiedener Waldklassen mit optischen Daten auf dem entsprechenden Verlauf der Spektralkurve der jeweiligen Art basiert, resultiert die Möglichkeit der Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelwald auf Radardatenbasis aus der unterschiedlichen Form und Anordnung der Elementarstreuer wie Äste, Zweige und Blätter.

Auf SAR-Daten können im Prinzip dieselben Klassifikationsalgorithmen (Punkt 2.4.1) angewandt werden, die für optische Daten entwickelt wurden. Für die Verwendung polarimetrischer Daten inklusive der Polarisationsparameter wurden jedoch spezielle Klassifikatoren entwickelt (Punkt 2.4.2), um die gesamte Bandbreite an Informationen auszuschöpfen.

Auf den Prinzipien der modernen SAR-Fernerkundung basierend wird ein weites Spektrum an Daten für die Klassifikation bereitgestellt. Neben den Intensitäten für verschiedene Wellenlängen und Polarisationen können aus der komplexen Streumatrix eine Reihe weiterer Parameter extrahiert werden. Beispielsweise bieten sich die Polarisationsparameter aus der Eigenwertdekomposition an. Stehen multitemporale SAR-Daten zur Verfügung, kann die Kohärenz eine Erweiterung der Datenbasis darstellen. Die Verteilung der einzelnen Pixels innerhalb dieser Bilder stellt in Form der Textur eine sekundäre Informationsquelle dar.

Die Klassifikation von Bilddaten kann pixelbasiert oder auf Basis von Bildsegmenten erfolgen. Die Segmentierung der Bilddaten erfolgt mittels statistischer Verfahren, die nebeneinander liegende Pixels ähnlicher Eigenschaften zu festen Segmenten in einer vorgegebenen Skala aggregieren. Für die Klassifikation von Radardaten bietet sich eine Segmentierung der Bilddaten an. Auf diese Weise wird die negative Auswirkung des Speckle auf das Ergebnis eliminiert.

Die Zuweisung der Pixels oder Segmente zu einer bestimmten Klasse kann überwacht oder unüberwacht erfolgen. Bei der überwachten Klassifikation werden die Klasseneigenschaften zuvor vom Nutzer definiert. Jedes zu klassifizierende Element wird einer der vorgegebenen Klassen zugeordnet. Die Klassenbildung bei der unüberwachten Klassifikation erfolgt auf Basis der statistischen Verteilung der Bildelemente. Die zumeist iterativ arbeitenden Algorithmen suchen nach *Clustern* (Punktwolken) aus Pixels ähnlicher Eigenschaften. Anhand der Signatur der Zentren dieser *Cluster* erfolgt die Zuweisung der Bildelemente. Da sich nach jeder Iteration auch die Zentren der Punktwolken verschieben, erfolgt die Klassenzuweisung in jedem Durchlauf erneut. Bei einigen Verfahren wird die Zahl der Klassen vom Anwender bestimmt. Die inhaltliche Bedeutung der Klassen muss im Nachhinein interpretiert werden.

2.4.1 Standardklassifikationsalgorithmen

Die überwachte Klassifikation kann anhand verschiedener Algorithmen erfolgen. Die Ergebnisse der verschiedenen Ansätze sind zwar vergleichbar, weisen jedoch Unterschiede auf. Im Folgenden werden einige der gängigsten Verfahren kurz vorgestellt.

Dem *Minimum Distance* Ansatz liegen die Mittelwerte der jeweiligen Objektklassen zugrunde. Die Mittelwerte werden dabei für jeden Kanal berechnet. Für jedes Bildobjekt mit dem entsprechenden Merkmalsvektor \vec{x}_i wird der Abstand zum Klassenschwerpunkt \vec{z}_i des jeweiligen Kanals ermittelt und jener Klasse mit dem geringsten Gesamtabstand zugewiesen. Dieser Abstand wird in der Regel durch die Euklidische Distanz d_i ausgedrückt (RICHARDS 1986):

$$d_i(\vec{x}_i, \vec{z}_i) = \sqrt{\sum_i (\vec{x}_i - \vec{z}_i)^2} \quad 2.95$$

Die Verteilung der Merkmalsvektoren einer Klasse um das jeweilige Klassenzentrum wird bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt. Somit besteht die Möglichkeit, dass bei einer hohen Streuung von \vec{x}_i um den Klassenschwerpunkt einige Bildobjekte nicht dieser, sondern fälschlicherweise einer benachbarten Klasse aufgrund einer hier geringeren Distanz zugewiesen werden.

Der *Maximum Likelihood* Ansatz soll diesem Mangel Abhilfe schaffen. Hier wird davon ausgegangen, dass die Merkmalsvektoren einer Objektklasse um deren Klassenschwerpunkt normalverteilt sind. Anhand verschiedener statistischer Kenngrößen wird dann jedes Bildelement mit den jeweiligen Merkmalsvektoren der Klasse mit der größten Wahrscheinlichkeit zugewiesen. Die Funktion für die Wahrscheinlichkeitsdichte (*probability density function* – pdf) lautet (PALUBINSKAS 1996):

$$p_i(\vec{x}_i, \vec{z}_i) = \frac{p(w)_i}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} |C_i|^{\frac{1}{2}}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{1}{2}\right)(\vec{x}_i - \vec{z}_i)^T C_i^{-1} (\vec{x}_i - \vec{z}_i)\right) \quad 2.96$$

Der Parameter n steht für die Zahl der Kanäle, i weist auf die jeweilige Klasse hin und C_i ist die Kovarianzmatrix der Klasse i . Für den Fall, dass die Merkmalsvektoren tatsächlich einer Gaußverteilung folgen, ist dieser Klassifikationsansatz das optimale Verfahren (PAOLA & SCHOWENGERDT 1995a). LEE et al. (1994) fanden jedoch, dass polarimetrische Multilook-SAR-Daten in Form der komplexen Kovarianzmatrix einer komplexen Wishartverteilung folgen und passten Gl. 2.96 entsprechend an.

Einem anderen Prinzip der Klassifikation von Daten folgen *Schwellenwert-Algorithmen* bzw. *Box-Klassifikatoren*. Hier werden vom Nutzer Schranken für die Merkmalsausprägung eines Merkmalsvektors für jede Klasse festgelegt. Nur wenn der Merkmalsvektor eines Objektes die Bedingungen einer Klasse erfüllt, wird er dieser zugeordnet. Erfüllt er die Bedingungen keiner Klasse, bleibt er unklassifiziert (VAN ZYL 1989). Darin liegt nicht zuletzt ein Vorteil dieses Verfahrens. Bildobjekte einer spezifischen Landbedeckung, für die jedoch keine Klasse definiert wurde, werden nicht unkontrolliert einer anderen Klasse zugewiesen. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, *a priori* Wissen in die Klassifikation einfließen zu lassen, wenn die Klassenschranken nicht ausschließlich anhand von Trainingsgebieten definiert werden (CLOUDE & POTTIER 1997). So können beispielsweise im Entropie-Alpha-Merkmalsraum von vorn her ein Regionen festgelegt werden, die bestimmten Landbedeckungen entsprechen (Abb. 2.18).

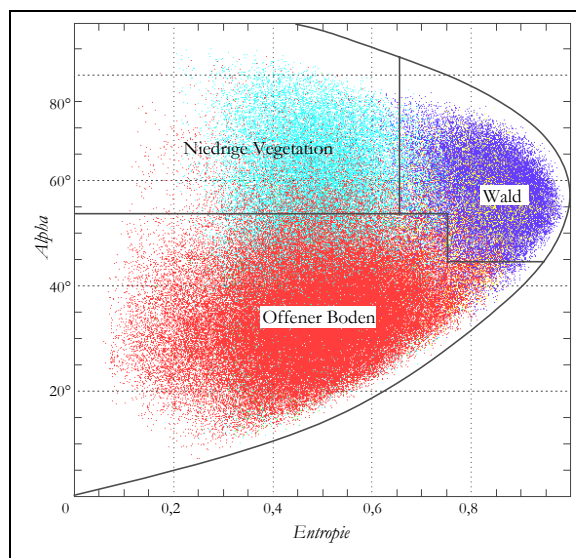


Abb. 2.18: Klassenspezifische Schwellenwerte im H - α -Merkmalsraum

Beispielsweise ist bekannt, dass die Klasse „Offener Boden“ (bei geringer bis mittlerer Rauigkeit) hauptsächlich durch Oberflächenstreuung gekennzeichnet ist. Demzufolge ist mit niedrigen H - und α -Werten zu rechnen. Im Gegensatz dazu steht die Klasse Wald. Hier sind alle Streuprozesse, jedoch in erster Linie Volumenstreuung, gegenwärtig. Hohe Werte für H und α sind die Folge. Wo allerdings die genauen Grenzen der Klassen liegen, ist ohne eine detaillierte Bildanalyse nicht bekannt (HELLMANN 2000).

Bei der *Hierarchischen Klassifikation* werden ebenfalls Schwellenwerte verwendet, was die Verwendung von *a priori* Wissen ermöglicht (MADHOK & LANDGREBE 2002). In mehreren Entscheidungslevels werden die Daten in zwei oder mehrere Klassen separiert, welche dann ebenfalls wieder unterteilt werden können. PIERCE et al. (1994) unterscheiden in jedem Level zwei Klassen anhand einer Booleschen Abfrage. Diese Abfrage basiert jeweils auf einer Auswahl aus den zur Verfügung stehenden Kanälen, wobei die zweckmäßigsten Kanäle für die jeweilige Abfrage herangezogen werden. Wenn die Hauptklassen einmal klassifiziert wurden, bleiben sie bis in die detaillierteren Levels erhalten. Je nachdem, ob in den oberen Levels Fehler aufgetreten sind oder nicht, kann dies als Vor- oder Nachteil angesehen werden.

2.4.2 Entwicklungstrends bei der Klassifikation von Fernerkundungsdaten

In einer Vielzahl von Studien wurde die Eignung *Neuronaler Netze* bezüglich der Klassifikation von Fernerkundungsdaten untersucht (z.B. RYAN et al. 1991, YOSHIDA & OMATU 1994, BEZDEK 1995, BLONDA et al. 1995, BRUZZONE et al. 1995, FOODY & MCCULLOCH 1995, PAOLA & SCHOWENGERDT 1995a-c, SCHAALÉ et al. 1995, ITO & OMATU 1998, HELLMANN et al. 1999). Künstliche Neuronale Netze sind mathematische Strukturen, die dem menschlichen Zentralnervensystem nachempfunden worden sind. Sie bestehen aus einzelnen topologisch angeordneten und verknüpften Neuronen. Die einzelnen Neuronen bzw. Knoten sind geeignet, einfache Prozesse auszuführen. Im Ganzen ist das Neuronale Netz in der Lage, komplexe Aufgaben, für die es generiert wurde, zu lösen. Neuronale Netze sind lernfähig, anpassungsfähig und sie können parallel mehrere Prozesse ausführen (RYAN et al. 1991). Bei dem häufig verwendeten *Multilayer Perceptron* (MLP) (Abb. 2.19), einem speziellen Typ eines Neuronalen Netzes, sind die Neuronen in Schichten (*Layer*) angeordnet (SERPICO & ROLI 1995).

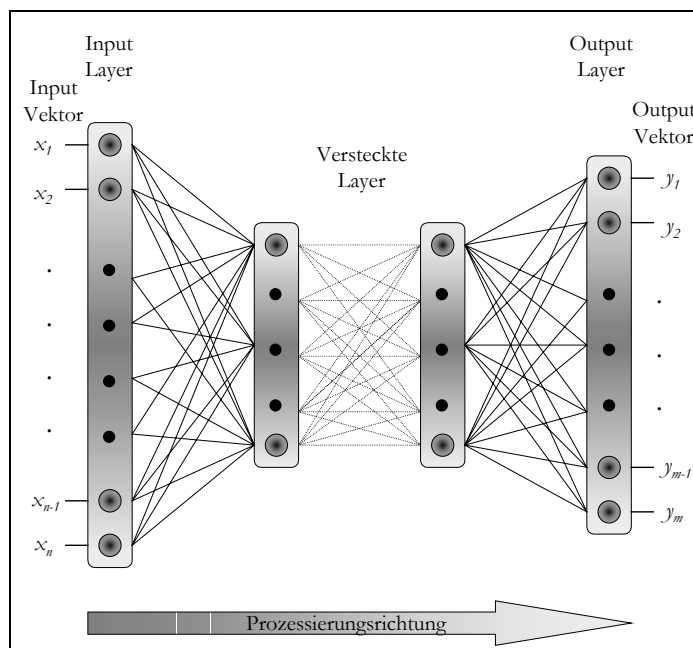


Abb. 2.19: Multilayer Perceptron,
nach HELLMANN (2000)

Die Verbindung zwischen zwei Neuronen wird über eine Wichtungsfunktion gesteuert. Die zwischen beiden Neuronen übertragene Signalstärke wird durch den Wichtungsfaktor bestimmt. Dieser wird während der Trainingsphase (Lernphase) des Neuronalen Netzes angepasst. Hat ein Neuron einen Input von den vorgeschalteten Neuronen erhalten, wird über die Aktivierungsfunktion jener Outputwert des Neurons bestimmt, den es an die nachgeschalteten Neuronen weitergibt (RYAN et al. 1991). Als Aktivierungsfunktion kommt jede differenzierbare mathematische Funktion in Frage. Deren Komplexität richtet sich nach der zu lösenden Aufgabe (SERPICO & ROLI 1995). Am häufigsten kommt die sigmoidale Funktion zur Anwendung (PAOLA & SCHOWENGERDT 1995b).

Ein untrainiertes Neuronales Netz besitzt keine Funktion. Erst nach der Trainings- bzw. Lernphase kann es die Funktion ausführen, für die es trainiert wurde. Andere Aufgaben kann es dann nicht mehr übernehmen. Um ein Neuronales Netz zu trainieren, kann eine Reihe verschiedener Trainingsstrategien zum Einsatz kommen. Beispiele hierfür sind der *Backpropagation* Algorithmus, der *Fastlearning* Algorithmus, das *dynamische Lernen*, das *sequentielle Training* oder das *Radial Basis Learning* (AMAR et al. 1995, PAOLA & SCHOWENGERDT 1995b), wobei der *Backpropagation* Algorithmus die gebräuchlichste Methode ist. Hinsichtlich der Klassifikation von Fernerkundungsdaten sind für dieses Training wie bei anderen überwachten Klassifikationsansätzen Trainingsgebiete erforderlich.

Einen Vorteil Neuronaler Netze gegenüber *Maximum Likelihood* Klassifikatoren sehen KIM et al. (1995) in der Flexibilität der Netze hinsichtlich der Verteilungsfunktion der Daten. Diese muss im Vorfeld nicht bekannt sein und darf für die verschiedenen Datenlayer variieren. Dies spricht vor allem für Neuronale Netze bei der Auswertung multisensoraler Daten. Allerdings bringen MLPs auch einige Probleme mit sich. So spielt zwar die Komplexität des Netzes (Zahl der Schichten und Neuronen) für die zu lösende Aufgabe eine entscheidende Rolle, sie kann jedoch nur versuchsweise ermittelt werden. Einen Lösungsansatz bieten hier SERPICO & ROLI (1995) mit ihrem „Strukturierten Neuronalen Netz“. Weitere Probleme sind das „Übertrainieren“ des Netzes sowie das Auffinden und Verharren an lokalen Minima der Fehlerfunktion, obgleich das globale Minimum entscheidend ist (HELLMANN 2000). Des Weiteren besteht eine gewisse Inkonsistenz der Ergebnisse aufgrund der zufälligen initialen Wichtungen (PAOLA & SCHOWENGERDT 1995b).

Ein weiterer Forschungsgegenstand im Gebiet der Klassifikation von Fernerkundungsdaten ist die Implementierung von *Fuzzy Logic* in den Klassifikationsprozess (RIGNOT et al. 1992, DU & LEE 1996, BASTIN 1997, BINAGHI et al. 1997, DINESH et al. 1997, HELLMANN et al. 1999). Mit *Fuzzy Logic* (eingeführt von ZADEH 1965) kann das Problem der scharfen Parametergrenzen im Rahmen der Klassenzuweisung umgangen werden. Dies ist nach DU & LEE (1996) der adäquate Weg der Klassifikation, da jedes Bildelement (bzw. Pixel) stets eine Mischung mehrerer Klassen darstellt. Ob ein Bildelement zu einer Klasse gehört oder nicht, muss nicht mehr anhand eines fixen Schwellenwertes festgelegt werden. Die scharfen Klassengrenzen in Abb. 2.18 werden durch Übergänge ersetzt. Die Klassenzuweisung wird durch ein *Fuzzy Set* geregelt (Abb. 2.20). Dieses Set kann beispielsweise wissensbasiert oder anhand eines unüberwachten Daten-Clustering (z.B. *fuzzy c-means*, DU & LEE 1996, BASTIN 1997, DINESH et al. 1997) generiert werden. Der Zugehörigkeitsgrad (*membership degree*) für die Klassen A-D in Abb. 2.20 wird in Abhängigkeit der Signatur des jeweiligen Fernerkundungsparameters durch das *Fuzzy Set* festgelegt. Für den Fall, dass ein Bildelement aufgrund seines Parameterwertes eindeutig einer bestimmten Klasse zugeordnet werden kann, ist der Zugehörigkeitsgrad maximal [1]. Verändert sich der Wert dieses Parameters, wird die Zugehörigkeit des Bildelements zu dieser Klasse weniger wahrscheinlich – der Zugehörigkeitsgrad nimmt ab. Ab einem bestimmten Signaturwert gehört das Bildelement definitiv nicht zur entsprechenden Klasse und der Zugehörigkeitsgrad ist Null (BASTIN 1997).

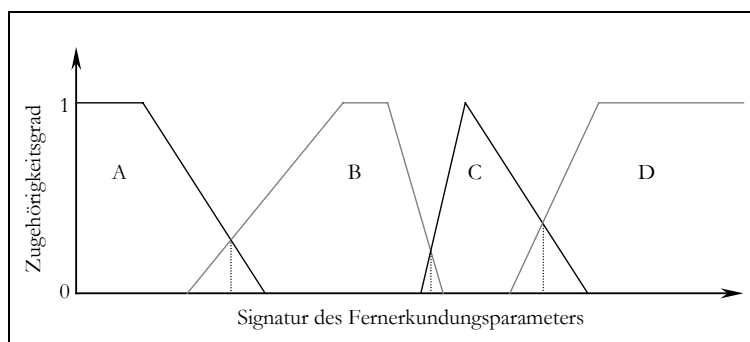


Abb. 2.20: Fuzzy Set für die Signatur eines Fernerkundungsparameters, nach DU & LEE (1996)

Während der Klassifikation wird für jedes Bildelement der Zugehörigkeitsgrad zu einer bestimmten Klasse anhand des *Fuzzy Sets* berechnet. Stehen mehrere Fernerkundungsparameter zur Verfügung, können die *Fuzzy Sets* über logische Verknüpfungen miteinander kombiniert werden (PALUBINSKAS et al. 1995). Im Resultat besitzt jedes Bildelement einen bestimmten Zugehörigkeitsgrad für jede Klasse. Hierin liegt der Unterschied und Vorteil zu den herkömmlichen Klassifikationsansätzen. Diese weisen jedes Bildelement genau einer Klasse zu - die Wahrscheinlichkeit für die Zuweisung zu einer anderen Klasse geht verloren. Da diese Informationen bei *Fuzzy* Klassifikatoren erhalten bleiben, stehen sie für die weitere Bearbeitung der Klassifikation bereit. Wurde beispielsweise ein Bildelement falsch klassifiziert, kann der Zugehörigkeitsgrad für andere Klassen (z.B. Klasse des nächst niedrigeren Zugehörigkeitsgrades) abgefragt werden (PALUBINSKAS et al. 1995, DU & LEE 1996, HELLMANN 2000).

Der Schritt der sogenannten *Defuzzifizierung* überführt die anhand der *Fuzzy* Klassifikation gewonnenen Informationen in das gewünschte Klassifikationsergebnis. Gewöhnlich werden die Bildelemente jener Klasse mit dem größten Zugehörigkeitsgrad zugeschrieben (PALUBINSKAS et al. 1995). BASTIN (1997) nutzt den Klassenzugehörigkeitsgrad eines Pixels, um die Information in Mischpixels zu separieren. Er geht dabei davon aus, dass die Klassenanteile, aus denen sich das Mischpixel zusammensetzt, mit dem Klassenzugehörigkeitsgrad der entsprechenden Klassen korreliert. Nähere Informationen zum Thema *Fuzzy Logic* sind ZADEH (1965) zu entnehmen.

2.5 Hydrologisch relevante Forschungsansätze der SAR Fernerkundung

Diese Arbeit befasst sich mit der hydrologisch orientierten Auswertung von Radardaten eines aktiven SAR. Unter dieser Prämisse wurden die Möglichkeiten der Extrahierung von Informationen aus derartigen Daten in den vorangegangenen Abschnitten erläutert. Jedoch stehen aus hydrologischer Sicht noch einige wichtige Fragen offen. So ist beispielsweise die gewonnene Information hinsichtlich der Bodenfeuchte nur dann korrekt interpretierbar, wenn die Eindringtiefe der Mikrowellen in den Boden bekannt ist (Punkt 2.5.1). Unter der Annahme, dass das Rückstreusignal lediglich Aussagen über die Feuchte des Oberbodens zulässt, bleibt die Frage, inwieweit dieser Parameter in der Hydrologie relevant ist bzw. wie von der oberen Bodenfeuchte auf tiefere Bereiche des Bodenprofils geschlossen werden kann (Punkt 2.5.2).

Weiterhin hat sich gezeigt, dass ein wesentliches Problem bei der Auswertung von aktiven Radardaten bezüglich der Bodenfeuchte darin besteht, die Mischinformation aus Rauigkeit und Bodenfeuchte unter Berücksichtigung des lokalen Einfallswinkels aufzusplitten. Erschwerend kommt noch hinzu, dass das Signal schon durch eine dünne Vegetationsschicht erheblich verändert wird. Unter dieser Voraussetzung soll hier kurz die Bedeutung und Eignung passiver Radardaten für die Gewinnung hydrologisch relevanter Parameter vorgestellt werden (Punkt 2.5.3). In diesem Zusammenhang wird nachfolgend ein weiteres auf SAR-Technologie basierendes System, das VHF-SAR, vorgestellt (Punkt 2.5.4).

2.5.1 Analyse der Eindringtiefe von Mikrowellen in dielektrische Medien

Mikrowellen besitzen die Fähigkeit, Medien mit einer geringen Dielektrizitätskonstante nahezu verlustfrei zu durchdringen. In Stoffen mit großen Dielektrizitätskonstanten wird die Radarstrahlung jedoch zum Teil absorbiert und somit abgeschwächt. Dabei steigt die Abschwächung mit zunehmender Dielektrizitätskonstante. Als Eindringtiefe δ_p bezeichnet man jenen Weg, den die EM Welle innerhalb des entsprechenden Mediums zurückgelegt haben muss, um einen Intensitätsverlust von $(1 - e^{-1}) \cdot 100\%$ zu erfahren. Die Eindringtiefe ist von der Wellenlänge λ abhängig und berechnet sich wie folgt (ULABY et al. 1982):

$$\delta_p \cong \frac{\lambda \sqrt{\epsilon'}}{2\pi\epsilon''} \quad 2.97$$

Diese Gleichung gilt für homogene Medien ohne Volumenstreuung und kann somit nur als Näherung für Böden verwendet werden. Bei Volumenstreuung wird δ_p vermindert. Für ein ϵ nahe Null kann die Eindringtiefe mehrere Meter betragen (L-Band). Bei feuchten Böden hingegen beträgt δ_p wenige Zentimeter. Die Beziehung zwischen Eindringtiefe und Bodenfeuchte wird in Abb. 2.21 (Bodenart Lehm) gezeigt.

Die Eindringtiefe bietet zwar einen Anhaltspunkt dafür, aus welchem Tiefenbereich des Bodenprofils Feuchteinformationen zu erwarten sind. Jedoch ist zu beachten, dass die Radarstrahlung im Idealfall denselben Weg zurück durch das dielektrische Medium nimmt, um als Informationsträger am Sensor einzutreffen. Dabei erfolgt eine weitere Abschwächung der Intensität. Demnach ist die sensorrelevante Eindringtiefe (*Sensing Depth*) deutlich geringer als δ_p (BRUCKLER et al. 1988, VAN OEVELEN 2000). ULABY et al. (1996) schätzen die *Sensing Depth* für das L-Band auf 5 cm. Folglich enthält das vom Sensor empfangene Signal Informationen über die Feuchte der oberen 5 cm des Bodenprofils. Detailliertere Untersuchungen zu dieser Thematik liefern BRUCKLER et al. (1988). Anhand von Profilen mit unterschiedlichen Feuchtegradienten und variierendem mittleren Wassergehalt stellten sie fest, dass die *Sensing Depth* nicht nur von

der mittleren Feuchte des Profils abhängig ist. Bei einer deutlichen Zunahme der Bodenfeuchte mit der Profiltiefe findet die Reflexion der Radarstrahlung ebenfalls innerhalb des Bodenprofils statt. In ihrer Untersuchung betrachteten sie die oberen zehn Zentimeter der Bodenprofile mit einer Auflösung von einem Zentimeter. Schließlich kommen BRUCKLER et al. (1988) zu dem Ergebnis, dass die *Sensing Depth* bei ihrer Untersuchung (C-Band) zwar zwischen einem und zehn Zentimetern schwankt, im Mittel jedoch bei etwa fünf Zentimetern liegt. Allerdings ist hier festzuhalten, dass die volumetrische Bodenfeuchte der oberen Zentimeter der meisten Profile deutlich unter 20% lag.

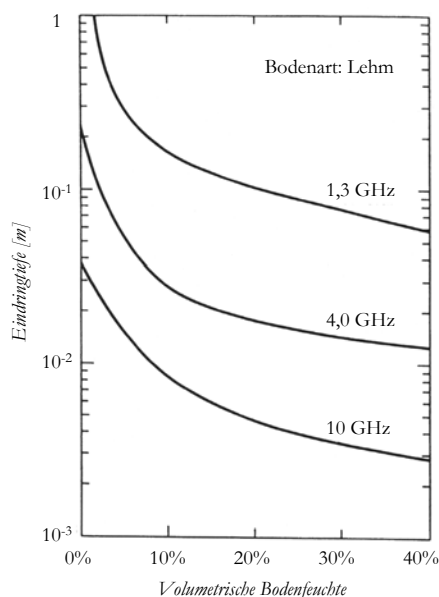


Abb. 2.21: Eindringtiefe von Mikrowellen in Abhängigkeit der Bodenfeuchte, verändert nach DOBSON & ULABY (1998)

Steht die Ergründung der Bodenfeuchte aus tieferen Bereichen des Bodenprofils im Mittelpunkt des Interesses, ergibt sich mit der Applikation der auf dem Fresnel Gesetz basierenden Rückstreumodelle ein weiteres Problem. Diese Modelle berücksichtigen ausschließlich einfache Streuprozesse. Multiple Streuprozesse wie Volumenstreuung oder Mehrfachreflexionen werden nicht simuliert. Somit beschränkt sich deren Anwendung auf das Auftreten von spiegelnder Reflexion in Form der Oberflächenstreuung. Die Rückstreuung erfolgt dabei an der Grenzschicht zweier unterschiedlicher dielektrischer Medien, im Falle der Bodenfeuchteerkennung also an der Oberkante des Bodenprofils. Inwieweit die auf diese Weise hergeleitete Oberbodenfeuchte mit der Feuchte tieferer Bereiche des Bodenprofils in Verbindung steht, wird im folgenden Punkt erläutert.

2.5.2 Extrapolation der Oberbodenfeuchte in den Wurzelraum

Die oberflächennahe Bodenfeuchte ist ein entscheidender Umweltparameter. Sie steuert Prozesse wie Infiltration, Oberflächenabfluss sowie Evaporation und reguliert das Verhältnis zwischen spürbarer und latenter Wärme. Somit stellt dieser Parameter einen wertvollen Input für ereignisbasierte hydrologische Modelle, für Hochwasservorhersagemodelle, für die Erosionsmodellierung sowie für Stofftransportmodelle dar. Zudem besitzt er ausschlaggebenden Charakter in Klima- und globalen Zirkulationssimulationen (GRAYSON & WESTERN 1998).

Nichts desto trotz ist vor allem für vegetationsbestandene Gebiete die Bodenfeuchte im Wurzelraum der Pflanzen von großem Interesse. Deren direkte Messung ist in der Praxis jedoch recht aufwändig. Viele Feldmessverfahren beschränken sich daher auf die Bestimmung der Oberbodenfeuchte. Indirekte Verfahren wie die aktive Mikrowellenfernerkundung sind lediglich in der Lage, die Bodenfeuchte der oberen Zentimeter des Profils herzuweisen. Die Aussicht, anhand größerer Wellenlängen Informationen aus tieferen Bereichen des Bodenprofils zu gewinnen, hat sich nur bedingt bestätigt. Längere Mikrowellen dringen zwar tiefer in den Boden ein, werden aber dort zum Großteil absorbiert. Der Boden stellt für große Wellenlängen ein homogenes Medium dar, die Volumenstreuung ist reduziert (siehe Punkt 2.5.4). Zudem erscheinen die Oberflächen glatter, was ebenfalls zu einer Abnahme des Rückstreusignals führt. Das SNR für Flächen mit wenig Vegetation erlaubt zumeist keine sinnvolle Auswertung der Daten (HAJNSEK et al. 2001a). Abhilfe könnten hier eventuell bistatische Systeme schaffen.

Oberflächennahe Feuchte und die Bodenfeuchte im Wurzelraum sind zwar über Diffusionsprozesse miteinander verknüpft (CALVET et al 2001). Dennoch bedeutet dies nicht, dass beide Parameter direkt korreliert sein müssen (CAPEHART & CARLSON 1997). Es existiert indes eine Reihe von Ansätzen, diese Verknüpfung anhand von Modellen nachzuempfinden (JACKSON 1980, PREVOT et al. 1984, BRUCKLER & WITONO 1989, GEORGAKAKOS & BAUMER 1996, CAPEHART & CARLSON 1997, HOUSER et al. 1997 & 1998, CALVET et al 2001, WALKER & HOUSER 2001).

Einen elementaren und praktikablen Ansatz verfolgt JACKSON (1980). Er geht davon aus, dass das Bodenfeuchteprofil, sofern es ungestört bleibt, einen Gleichgewichtszustand (*equilibrium*) anstrebt. Voraussetzungen sind isotherme Konditionen sowie Kenntnis der Bodentextur. Hintergrund seiner Methode ist die Tatsache, dass Wasser entsprechend des hydraulischen Potenzials fließt und sich Differenzen im Potenzial ausgleichen, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist (*equilibrium profile*, Abb. 2.22). Ist dieser Zustand erreicht, kann anhand der Oberbodenfeuchte auf die Feuchte in tieferen Bereichen geschlossen werden. Da der Gleichgewichtszustand jedoch fast ständig durch Prozesse wie Niederschlag oder Evapotranspiration gestört wird, ist dieses Verfahren nur bedingt anwendbar. JACKSON (1980) empfiehlt in diesem Zusammenhang für die Messung der Oberbodenfeuchte den Zeitrahmen der frühen Morgenstunden.

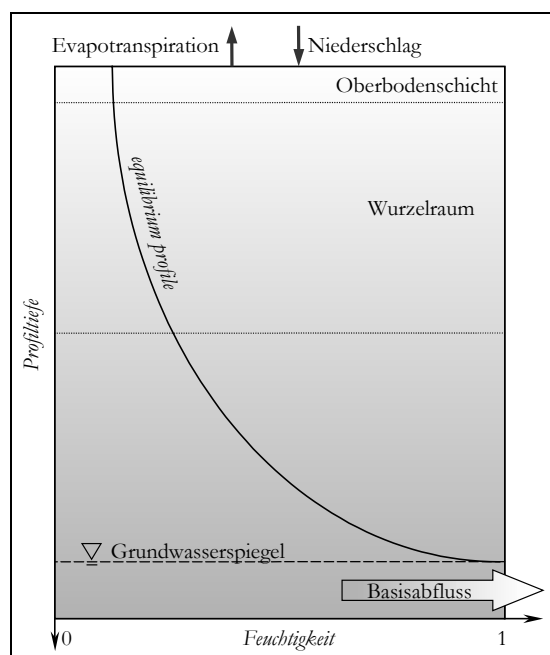


Abb. 2.22: Bodenfeuchteprofil im Gleichgewichtszustand, verändert nach WALKER & HOUSER (2001)

Für die Validierung seines Verfahrens zieht JACKSON (1980) synthetische Daten eines physikalisch basierten Bodenwasser-Bewegungsmodells heran. Dabei stellt er fest, dass für seinen Ansatz die Bodenfeuchte der oberen 10 cm bekannt sein sollte, um sichere Aussagen über die Feuchte in tieferen Bereichen treffen zu können.

PREVOT et al. (1984) haben versucht, anhand eines auf den *Richards*-Gleichungen basierenden Bodenwassertransfermodells auf die Feuchte im Wurzelraum zu schließen. Die Oberbodenfeuchte ermittelten sie anhand eines C-Band Scatterometers. Ihr Bodenprofil unterteilten sie aufgrund der unterschiedlichen hydraulischen Charakteristik in zwei Ebenen. Für die Validierung des Modelloutputs wurden Messdaten herangezogen.

Als maßgeblich erwies sich die Wahl der Dauer eines Zeitschrittes. Da diese zu grob gewählt wurden, konnten die Auswirkungen von Niederschlagsereignissen nicht korrekt erfasst werden. Für feinere Zeitschritte fehlten allerdings die nötigen Scatterometerdaten. Zudem bereitete die Erfassung der Bodencharakteristik sowie deren räumliche Variabilität große Schwierigkeiten. Trotz der Probleme konnten PREVOT et al. (1984) für Perioden ohne Niederschläge anhand der oberflächennahen Feuchte auf die Bodenfeuchte im Wurzelraum ohne große Fehler schließen. Um Niederschlagsereignisse mit einbeziehen zu können, hätte der zeitliche Abstand zwischen den Scatterometermessungen reduziert werden müssen.

HOUSER et al. (1997) verwenden ein auf dem TOPMODEL basierendes Land-Atmosphären-Transfer-Schema (TOPLATS), um das Verhältnis zwischen Oberbodenfeuchte und der Feuchte im Wurzelraum zu simulieren. Die Messwerte der Oberbodenfeuchte basieren auf passiven Mikrowellendaten (*Push Broom Microwave Radiometer*). Um die Oberbodenfeuchtedaten effektiv in das Modell zu integrieren, wurden verschiedene Datenassimilationstechniken getestet.

Zwar konnte das Modell hinsichtlich der oberflächennahen Bodenfeuchte akzeptable Ergebnisse liefern, doch gerade nach Starkregenereignissen wich die simulierte Bodenfeuchte des Wurzelraums von den tatsächlichen Messwerten deutlich ab. Mögliche Ursachen, so HOUSER et al. (1997), können die wie bei PREVOT et al. (1984) zu großen Zeitabstände zwischen den Messungen während der Niederschlagsereignisse sowie die nicht berücksichtigte Inhomogenität der Wurzelzone sein.

Einen ähnlichen Modellansatz verwenden CALVET et al. (2001). Über Zeitreihen der Oberbodenfeuchte versuchen sie mit ihrem Modell ISBA (*Interactions between Soil, Biosphere and Atmosphere*) auf den Wassergehalt der Wurzelzone zu schließen. Die Oberbodenfeuchte ermitteln sie anhand eines L-Band Radiometers. Dabei stellen sie fest, dass hinsichtlich des Parameters Oberbodenfeuchte für Trockenperioden ein Assimilationszeitraum (Modelllaufzeit) von drei Tagen genügt. Um sichere Werte für die Bodenfeuchte des Wurzelraumes während Niederschlagsperioden zu erlangen, sollte ein Assimilationszeitraum von etwa zehn Tagen angestrebt werden. Weiterführende Angaben hinsichtlich dieses Verfahrens finden sich in CALVET & NOILHAN (2000).

CAMILLO & SCHMUGGE (1983) konzentrieren sich in ihrer Arbeit auf den Einfluss der Wurzelichte als Steuerparameter auf die Saugspannung. Nach ihren Erkenntnissen ist die Saugspannung für eine bestimmte Bodenart in jeder beliebigen Profiltiefe von der Zahl der aktiven Wurzeln abhängig. Bei Kenntnis der Bodentextur ist somit ein Schluss von der volumetrischen Bodenfeuchte einer willkürlichen Profiltiefe auf die gesamte Bodenwassermenge im Wurzelraum möglich. Den Zusammenhang zwischen Wurzelichte und Profilfeuchte stellen CAMILLO & SCHMUGGE (1983) anhand eines numerischen Modells dar. Voraussetzung ihres Ansatzes ist ein hinreichend trockener Boden, bei dem auf Diffusion beruhende Wasserbewegungen im Vergleich zum Wasserkonsum der Pflanzen eine untergeordnete Rolle spielen.

Die bislang vorgestellten Ansätze zeigen Schwierigkeiten hinsichtlich der Simulation der Feuchte im Wurzelraum in der Folge von Niederschlagsereignissen. Ein weiteres Problem, welches von CAPEHART & CARLSON (1997) umfangreich analysiert wurde, ist die sogenannte Entkopplung der Oberflächenfeuchte von der Feuchte in tieferen Bereichen des Bodenprofils. Dieser Zustand kann nach längeren Trockenperioden vor allem bei nicht bewachsenen Flächen auftreten. Dabei trocknet der Oberboden derartig aus, dass seine hydraulische Durchlässigkeit reduziert wird. Die Folge dessen ist ein Ausbleiben des Gleichgewichtszustandes des Bodenfeuchteprofils aufgrund der stark verlangsamten ausgleichenden Fließbewegungen des Bodenwassers. Von der Oberflächenfeuchte kann nicht auf tiefere Bereiche geschlossen werden. Die Ausprägung dieser Erscheinung ist abhängig vom Bodentyp. Besonders grobkörnige Böden zeigen deutliche Entkopplungseffekte.

Zur Arbeit von CAPEHART & CARLSON (1997) sei hier anzumerken, dass die entkoppelte obere Bodenschicht maximal 50 mm mächtig ist, zumeist ist sie jedoch deutlich dünner. Dennoch verhindert dieser Entkopplungseffekt den Schluss auf die Bodenfeuchte anhand der Oberflächentemperatur. Mikrowellen hingegen sind in der Lage, diese geringmächtige, trockene Schicht zu durchdringen und enthalten somit Informationen über die Feuchte aus einem Profilschnitt unterhalb des entkoppelten Bereiches.

2.5.3 Passives versus aktives Radar

Jeder Körper mit einer Temperatur größer Null Kelvin emittiert elektromagnetische Strahlung. Deren Bandbreite erstreckt sich über das gesamte elektromagnetische Spektrum und beinhaltet ebenfalls den Bereich der Mikrowellen. Passive Mikrowellenradiometer nutzen diese natürliche Mikrowellenstrahlung der Erdoberfläche. Diese wird in Form der sogenannten *Brightness Temperatur* T_B gemessen. Für Mikrowellen mit einer Wellenlänge größer 5 cm gilt der folgende Zusammenhang zwischen T_B , der Bodentemperatur T_{Boden} und dem Emissionsvermögen e der Bodenoberfläche (ENGMAN & GURNEY 1991):

$$T_B = e \cdot T_{\text{Boden}} \quad 2.98$$

Dabei wird das Emissionsvermögen e durch die dielektrischen Eigenschaften des Bodens und somit zum Großteil durch die Bodenfeuchte gesteuert. Es gilt der folgende Zusammenhang: je höher die Bodenfeuchte, desto geringer ist e . Diese Beziehung ist annähernd linear. Weiterhin von Bedeutung sind Vegetation, Oberflächenrauhigkeit und Bodentextur (Bodenart und -dichte). Eine hohe Rauigkeit (RMS-Höhe) bedeutet eine hohe Oberflächenemission einschließlich einer Dämpfung des Bodenfeuchtesignals. Allerdings kann der Rauigkeitseffekt durch eine simple Korrektur minimiert werden (CHOUDHURY et al. 1979, THEIS et al. 1986). Die Autokorrelationslänge besitzt keinen messbaren Einfluss auf T_B (VAN OEVELEN 2000). Vegetation führt ebenfalls zur Dämpfung der Bodenfeuchteinformation sowie zur Verminderung der *Sensing Depth* (LAYMON et al. 1998). Zudem emittiert sie eine geringe Menge Mikrowellenstrahlung. Jedoch sind die Vegetationseffekte deutlich kleiner als bei aktiven Systemen (HEAFNER & PAMPALONI 1992). CALVET et al. (2001) stellten fest, dass im L-Band die Bodenfeuchte bis zu einer feuchten Biomasse von 5 kg/m² die maßgebliche Steuergröße für T_B ist. Die Tatsache, dass der Einfluss der Vegetation linear mit deren Biomasse steigt, macht die Korrektur der Daten hinsichtlich dieser Störgröße ebenfalls zu einer lösbaren Aufgabe (ENGMAN & GURNEY 1991, JACKSON & SCHMUGGE 1991). JACKSON (1993) stellt in diesem Zusammenhang ein Verfahren vor, mit dem eine operationelle Auswertung passiver Mikrowellendaten hinsichtlich der Bodenfeuchte ermöglicht wird. Nachdem die *Brightness Temperatur* bezüglich der Bodentemperatur normiert wurde, erfolgt die Korrektur des Vegetationseinflusses

ses anhand eines Emissionsmodells für Vegetation nach JACKSON & SCHMUGGE (1991). Anschließend wird der Effekt der Oberflächenrauigkeit eliminiert. Dafür kommt der Algorithmus von CHOUDHURY et al. (1979) zum Einsatz. Die folgende Inversion der korrigierten *Brightness Temperatur* in die Dielektrizitätskonstante basiert auf dem Fresnel Gesetz und berücksichtigt somit den lokalen Betrachtungswinkel. Die Umrechnung der Dielektrizitätskonstante in Bodenfeuchte erfolgt unter Berücksichtigung der Bodentextur anhand des empirischen Modells von WANG & SCHMUGGE (1980).

Für die Bodenfeuchte zeigen besonders große Wellenlängen eine außerordentliche Sensitivität, während die störenden Einflüsse zurücktreten (LAKSHMI et al. 2001, PALOSCIA et al. 2001). In Bezug auf die *Sensing Depth* gelten die unter Punkt 2.5.1 vorgestellten Zusammenhänge (LAYMON et al. 1998). So konnten JACKSON et al. (1995b) für das S-Band eine mittlere *Sensing Depth* von 2 cm nachweisen, während sie für das L-Band 5 cm ermittelten.

Aufgrund der Tatsache, dass die *Brightness Temperatur* vor allem bei großen Wellenlängen maßgeblich durch die Oberflächenfeuchte gesteuert wird sowie die Störeinflüsse der Vegetation und der Rauigkeit geringer sind als bei aktiven Systemen, scheinen passive Systeme eher für Bodenfeuchteanwendungen geeignet zu sein. Allerdings erwächst aus der sehr geringen Intensität der natürlichen Mikrowellenstrahlung der Nachteil, dass bei herkömmlichen Sensoren nur mit geringen Auflösungen und sehr niedrigen Flughöhen (z.B. 150 m in JACKSON & O'NEILL 1987) gearbeitet werden kann. So liegen die Dimensionen einer Auflösungszelle bei flugzeuggetragenen Systemen in der Größenordnung von $50 \times 50 \text{ m}^2$, bei satellitengetragenen Sensoren beträgt die Kantenlänge eines Pixels mehrere Kilometer. Allerdings existieren bereits Ansätze, bei denen, analog zum SAR, anhand einer synthetischen Apertur das Auflösungsvermögen verbessert wird (HEAFNER & PAMPALONI 1992). JACKSON et al. (1995a) evaluieren basierend auf einer umfangreichen Untersuchung den Prototypen eines solchen Systems (ESTAR - *Electronically Scanned Thinned Array Radiometer*) hinsichtlich der Eignung für die Bodenfeuchtebestimmung. Bei einer Flughöhe von 2.200 m ist noch eine Bodenauflösung von 200 m möglich. Bei satellitengetragenen Systemen könnte so eine Auflösung von ein bis zwei Kilometern zustande kommen (JACKSON et al. 1995a). Trotz weiterer Verbesserungen wird das Erreichen des Auflösungsvermögens aktiver Radarsysteme jedoch nicht möglich sein.

Ein weiteres Problem der passiven Mikrowellenfernerkundung stellt die künstliche, durch den Menschen generierte Mikrowellenstrahlung dar, welche die Intensität der natürlichen Strahlung übertrifft. Dieser Umstand reduziert die Verwendung des Mikrowellenspektrums auf wenige Bereiche (HEAFNER & PAMPALONI 1992).

Der Vorteil von passiven gegenüber aktiven Mikrowellensensoren in Bezug auf die hohe Sensitivität für Bodenfeuchte und die geringere Empfindlichkeit für Oberflächenrauigkeit und Vegetation scheinen passive Radiometer für die Bodenfeuchteerkundung zu prädestinieren. In diesem Zusammenhang steht auch die Verfügbarkeit einfacher Korrekturmodelle für Vegetation und Oberflächenrauigkeit. Dem entgegen steht jedoch das Problem der geringeren Auflösung, die bislang die Verwendung von Flugzeugen als Plattform für die meisten hydrologischen Fragestellungen vorgibt. Dennoch können aus der Kombination aktiver und passiver Systeme immense Vorteile erwachsen. So entwickelten z.B. HUANG & JIN (1995) auf diese Art und Weise einen einfachen Ansatz, um ohne *a priori* Wissen auf Bodenfeuchte und Rauigkeit zu schließen.

2.5.4 Das VHF-SAR – SAR-Technologie für hydrologisch relevante Parameter

Mit dem VHF-SAR befindet sich ein weiteres auf der SAR-Technologie basierendes Sensorsystem für die Fernerkundung in Entwicklung. Das besondere Potenzial dieser Systeme basiert auf der Verwendung sehr großer Wellenlängen (VHF – *Very High Frequency*, Radioband im EM Spektrum). So operiert das schwedische CARABAS-II mit Wellenlängen von 3 bis 15 Metern (ULANDER et al. 1999). Das SASAR aus Südafrika arbeitet mit einer Wellenlänge von 2,1 Metern (LORD & INGGS 2000, LORD et al. 2001). Aus dieser extremen Systemkonfiguration erwachsen spezielle systemimmanente Eigenschaften, die für die Extrahierung hydrologisch relevanter Parameter herangezogen werden können. Aufgrund der großen Wellenlänge dringt die Mikrowellenstrahlung sehr tief in Medien ein bzw. durchdringt sie vollständig. Diese Eigenschaft ist zum einen von militärischem Interesse. Zum anderen ist die Tatsache, dass beispielsweise das Kronendach eines Waldes nahezu verlustfrei durchdrungen wird, für naturwissenschaftliche Anwendungen von Bedeutung (FRANSSON et al. 1998, SMITH & ULANDER 1998, ULANDER et al. 2000).

VHF-SAR Daten liefern fast ausschließlich für Wald brauchbare Ergebnisse. Bei nahezu allen anderen Landbedeckungen liegt die Rückstreuintensität unterhalb des Eigenrauschens des Systems. Wenige Ausnahmen bilden z.B. künstliche Objekte wie große Gebäude, Metallzäune oder Hochspannungsleitungen (LORD et al. 2001). Aufgrund der großen Wellenlänge kommen nur wenige Objekte als Streuer in Frage. Da mit recht hohen Auflösungen von bis zu $3 \times 3 \text{ m}^2$ (FRANSSON et al. 1998) gearbeitet wird, befinden sich nur wenige Streuobjekte innerhalb einer Auflösungszelle, wodurch nahezu kein Speckle auftritt (ISRAELSSON et al. 1997). Ist innerhalb einer Auflösungszelle kein Streuer vorhanden, wird ein Teil der Strahlung spiegelnd vom Sensor fort reflektiert, der andere dringt in den Boden ein und wird absorbiert. Volumenstreuung tritt nicht auf, der Boden erscheint für die langen Mikrowellen homogen.

Ein spezifisches Problem, das ebenfalls durch die großen Wellenlängen zustande kommt, ist der starke Störeinfluss durch Radio Frequenz Interferenzen (RFI) (ULANDER et al. 1999, LORD & INGGS 2000). Dieser ist zwar aus dem P-Band bekannt, allerdings besitzt er beim VHF-SAR eine andere Dimension. Die durch Telekommunikation, TV, FM-Radio oder Flugfunk hervorgerufenen Störungen überschreiten zumeist die Signalstärke des VHF-SAR (LORD & INGGS 2000). Ohne eine Korrektur dieser Signalverfälschungen ist keine Interpretation der Daten möglich. Dafür wird während der Befliegung das Störsignal gesondert aufgezeichnet, um es anschließend mit speziellen Filtern aus dem VHF-SAR Bild zu eliminieren (ULANDER et al. 1999, LORD & INGGS 2000).

Die Rückstreuung des Signals innerhalb von Wald erfolgt ausschließlich an Baumstämmen oder dicken Ästen. Die Signalstärke nimmt mit der Biomasse eines Baumes und der Baumdicke zu. Dieses Prinzip gilt ebenfalls für kurzwelligere SAR-Sensoren. Jedoch ist das Signal hinsichtlich der Biomasse umso schneller gesättigt, je kürzer die Wellenlänge ist. Während selbst im P-Band die Sättigung des Signals schon bei ca. 50 t/ha (SMITH & ULANDER 1998) eintritt, konnte bislang keine Sättigung für das VHF-SAR nachgewiesen werden. ULANDER et al. (2002) haben beispielsweise in ihrer Untersuchung mit Stammvolumen von bis zu 700 m³/ha gearbeitet, ohne einen Sättigungstrend zu erkennen. Hinzu kommt eine deutlich höhere Sensitivität des VHF-SAR für diesen Parameter. Abb. 2.23 (folgende Seite) zeigt die Empfindlichkeit des Rückstreukoeffizienten für eine Stammvolumenzunahme von nahe Null auf 200 m³/ha.

Das C-Band zeigt diesbezüglich eine sehr geringe Sensitivität. Der Rückstreukoeffizient ändert sich lediglich um knapp 2 dB. Mit Abnahme der Radarfrequenz hingegen steigt die Sensitivität für die oben beschriebene Stammvolumenzunahme. Beim VHF-SAR (CARABAS) ändert sich der Rückstreukoeffizient um bis zu 15 dB.

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass für Laub- und Nadelwald vergleichbare Ergebnisse zu erwarten sind. Bei Laubwald ist allerdings ein höherer Rückstreuteil für Äste zu erwarten (ISRAELSSON et al. 1997, ULANDER et al. 2002). Für die Modellierung der Rückstreuung in Abhängigkeit vom Stammvolumen wurden bereits Konzepte vorgeschlagen (SMITH & ULANDER 1998, FRANSSON et al. 1998, ULANDER et al. 2002).

FRANSSON et al. (1998) korrelierten in ihren Untersuchungen die Rückstreuintensität nicht ausschließlich mit der Biomasse bzw. dem Stammvolumen, sondern auch mit der mittleren Baumhöhe sowie dem mittleren Stammdurchmesser verschiedener Schläge. Für die beiden zuletzt genannten Parameter konnten sie die höchsten Korrelationen ($R^2 \approx 0,9$) mit der Rückstreuintensität nachweisen. Zwar sind Zusammenhänge zwischen den einzelnen Bauparametern zu erwarten, dennoch sprechen diese Ergebnisse für das hohe Potenzial des VHF-SAR.

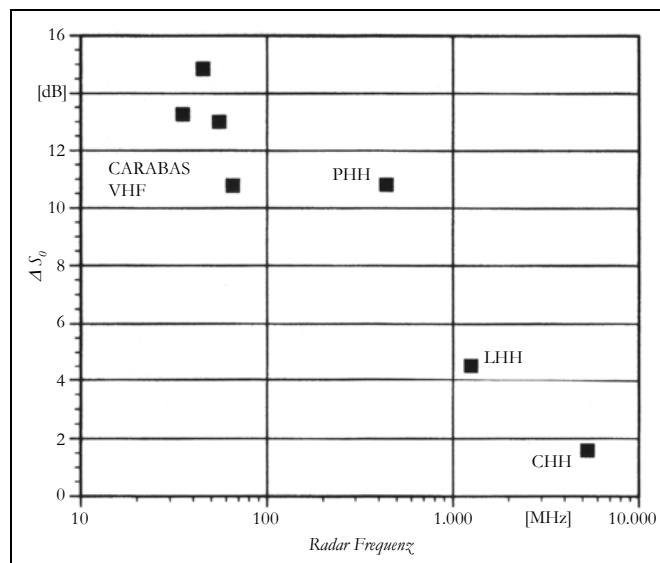


Abb. 2.23: Änderung des Rückstreusignals mit der Zunahme des Stammvolumens für verschiedene Frequenzen, verändert nach Israelsson et al. (1997)

Neben den Waldparametern besitzt das Relief unter Wald einen starken Einfluss auf das Rückstreusignal (FRANSSON et al. 1998). Dem Sensor zugewandte Hänge weisen eine deutlich höhere Rückstreuung auf. Dieser Umstand verdeutlicht ebenfalls das starke Durchdringungsvermögen langer Mikrowellen. Bei kürzeren Wellenlängen wird der Hauptanteil der Rückstreuung durch die Streuung im Kronendach gebildet und der Reliefeinfluss ist deutlich geringer. Um den Reliefeinfluss für die waldorientierte Datenauswertung berücksichtigen zu können, muss ein DGM herangezogen werden (LORD et al. 2001).

Die dielektrischen Eigenschaften der Bodenoberfläche sind für die Rückstreuintensität ebenfalls von Bedeutung. SMITH & ULANDER (1998) beobachteten eine Zunahme des Rückstreukoeffizienten mit der Bodenfeuchte. Da ein Großteil der Rückstreuung durch Doppelreflexion über den Rückstreupfad Stamm-Boden (bzw. umgekehrt) bewirkt wird, ist bei steigender Bodenfeuchte auch eine Zunahme der Oberflächenstreuung zu erwarten, wodurch sich das erhöhte Rückstreusignal begründet. In diesem Zusammenhang ließe sich auch unter dichtem Wald die Bodenfeuchte bestimmen. Allerdings existieren dazu noch keine Untersuchungen. Fraglich ist, wie die Bodenfeuchteinformation ohne *a priori* Wissen von der Information der Biomasse getrennt werden kann.

Eine weitere interessante Anwendung des VHF-SAR ist die SAR-Interferometrie zur Generierung von Höhenmodellen. Auf diese Weise ließe sich ein DGM ohne großen Vegetationseinfluss erstellen. LORD et al. (2001) & WILKINSON et al. (2001) haben sich mit dieser Problematik befasst. Erste Untersuchungen bestätigten, dass das Rückstreusignal für diese Aufgabenstellung ausschließlich bei Waldflächen ausreichend ist. Somit ist die Phase nur für Waldflächen messbar. Dies zeigt sich auch in der Auswertung der Kohärenz zwischen zwei *Repeat-Pass*-Aufnahmen. Damit stehen die Ergebnisse für das VHF-SAR im Gegensatz zu kurzwelligeren Systemen, bei denen für Wald im *Repeat-Pass*-Modus eine geringe Kohärenz gemessen wird. Die für das VHF-SAR agierenden Streuer sind im Verlauf der Zeit weniger veränderlich als jene der kurzwelligeren Systeme. Die von LORD et al. (2001) & WILKINSON et al. (2001) erzeugten Interferogramme lassen auf das Relief des mit Wald bestandenen Gebietes schließen. Allerdings ergaben sich Probleme aus der ungenügenden Bewegungskompensation und einer daraus resultierenden mangelhaften Koregistrierung des interferometrischen Datensatzes. Dessen ungeachtet konnte die Fähigkeit des VHF-SAR für die Erzeugung eines Höhenmodells unter Wald belegt werden. Eine größere Flughöhe sowie eine bessere Bewegungskompensation könnten zur Ausräumung der bisherigen Probleme beitragen.

2.6 Resümee & Forschungsbedarf

Insbesondere während der letzten zehn Jahre wurden in der Radarfernerkundung enorme Fortschritte erzielt. Zahlreiche Rückstreumodelle ermöglichen eine fundierte Anwendung von SAR-Daten im Hinblick auf die Messung biophysikalischer Oberflächenparameter. Die interferometrische Datenauswertung für die Erstellung von digitalen Höhenmodellen wurde weitestgehend operationalisiert. Die Auswertung der Objektphase im Rahmen der Polarimetrie bietet eine Fülle potenzieller Anwendungsmöglichkeiten. Die Erschließung neuer Ansätze für die fortschrittliche Auswertung von SAR-Daten, wie die Differenzielle sowie die Polarimetrische Interferometrie, erweitert das bisherige Potenzial dieses Forschungsgebietes. Neue Technologien wie das VHF-SAR oder passive Systeme mit synthetischer Apertur bauen das Anwendungsspektrum der Mikrowellenfernerkundung aus. Entsprechend des Standes der Entwicklung der jeweiligen Technologie treten die Forschungsdefizite in unterschiedlichen Ebenen auf. Auf gründlich erforschten Zusammenhängen basierende Methoden können durch Detailstudien und eine umfangreiche Validierung häufig zur Operationalisierung geführt werden, während es bei der Erschließung neuer Verfahren an Grundlagenwissen fehlt. Dieses Gefüge ist auch bei der folgenden Zusammenstellung des Forschungsbedarfs erkennbar. Anzumerken ist, dass nur ein Teil der Forschungsdefizite im Rahmen dieser Arbeit behandelt werden kann. Entsprechend ist Punkt 2.7 der Darstellung der Zielsetzung sowie des methodischen Vorgehens gewidmet.

- Die Oberflächenrauigkeit ist einer der bedeutendsten biophysikalischen Parameter der aktiven SAR-Fernerkundung. Dennoch existieren nach wie vor Unklarheiten darüber, wie die dreidimensionale Struktur einer Oberfläche in SAR-relevante, mathematische Kenngrößen zerlegt werden kann. Hier ist einerseits die Skalenfrage (LE TOAN et al. 1998, MCDONALD et al. 1999, DAVIDSON et al. 2000), und andererseits die Frage nach der Aufnahme-richtung des Rauigkeitsprofils im Verhältnis zur Ausbreitungsrichtung der EM Welle zu klären. Theoretische Rückstreumodelle (SPM, GOM, POM) berücksichtigen die Rauigkeit (s & l) in Ausbreitungsrichtung der EM Welle. Für polarimetrische Ansätze wie das Erweiterte *Bragg Scattering* Modell von CLOUDE et al. (2000) ist die Rauigkeitskomponente (s) senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Radarstrahlung relevant. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die monoskaligen Parameter s und l für die Beschreibung einer Oberfläche nicht immer ausreichend sind. Multiskalige Modelle dieser Oberflächen könnten hier die Alternative sein (LE TOAN et al. 1998, MATTIA et al. 2000). Zu klären ist, welche Methodik die beste Eignung besitzt und welche Voraussetzungen bei der Erhebung der Daten zu erfüllen sind.
- Häufig steht bei der Inversion von SAR-Daten in Oberflächenparameter die Bodenfeuchte im Mittelpunkt des Interesses. Für die Validierung müssen die Modellergebnisse mit den Messwerten in Beziehung gesetzt werden. Hierbei kann eine Vielzahl von Problemen auftreten. Lokale Variationen der Bodenfeuchte, Unsicherheiten bei der Messung oder die notwendige Mittelung (Speckle etc.) der Resultate der Inversion über mehrere Pixels beinhalten ein enormes Potenzial an Fehlern. Selbst bei hochaufgelösten SAR-Daten (um $2 \times 2 \text{ m}^2$) ist es kaum möglich, Geländemessung und Modellergebnis eines Messpunktes direkt in Verbindung zu setzen. Besteht eine Beziehung zwischen beiden Datenreihen, wird sie erst bei Verwendung einer Vielzahl von Messpunkten entlang eines Messprofils mit Feuchtegradient evident. Die Rolle der Fehler geht zugunsten des Zusammenhangs zurück. Um die Fehler zu minimieren, muss die Zahl der Stichproben pro Messpunkt erhöht und die beprobte Fläche erweitert werden. Für hochaufgelöste Radardaten ist diese Vorgehensweise vertretbar. Zu prüfen ist, inwieweit solche Maßnahmen tatsächlich zu

einer Reduzierung von zufälligen Fehlern führen und wo das Optimum betreffs der Größe der Messfläche sowie der Stichprobenzahl liegt. Bei Systemen mit mittlerer oder geringer Auflösung ist ein direkter Vergleich zwischen Geländemessung und Modellergebnis nicht möglich. Hier werden statistische Regionalisierungsverfahren oder hydrologische Modelle eingesetzt, um die Punktmessungen zu interpolieren. Ein weiteres Problem bei der Validierung der Modellergebnisse besteht in der funktionellen Abhängigkeit der *Sensing Depth* von den dielektrischen Eigenschaften des Bodens (siehe Punkt 2.5.1). Die Variationen der *Sensing Depth* sind dabei nicht unerheblich. Die Messtiefe im Gelände hingegen ist in der Regel unabhängig von der Bodenfeuchte. Ändert sich die Bodenfeuchte mit zunehmender Profiltiefe, wird die Beziehung zwischen Modell- und Messergebnis gestört. Die Messung der Bodenfeuchte mittels Radarverfahren würde diese Schwierigkeiten umgehen. Dennoch ist zu prüfen, welche Dimensionen der durch die variierende *Sensing Depth* hervorgerufene Fehler besitzt.

- Ein dritter Forschungsschwerpunkt der SAR-Fernerkundung liegt in der Extrahierung von Pflanzenparametern. Einfache, nicht kohärente Modelle bringen die Radarrückstreuung mit einzelnen Pflanzenparametern wie der Biomasse in Verbindung. Die zumeist empirischen Ansätze funktionieren nach der Parametrisierung nur für wenige Pflanzentypen mit einer ähnlichen Struktur. Kohärente Modelle berücksichtigen den strukturellen Aufbau der Pflanzen bei der Berechnung der Rückstreuung. Dafür werden die Pflanzenbestandteile mehr oder weniger simplifiziert. Während die Streuprozesse an großen Pflanzen wie Bäumen bekannt sind und hier auch eine Reihe kohärenter Modelle existiert, ist noch Grundlagenforschung notwendig, um die Streuprozesse bei Feldfrüchten hinreichend zu verstehen. Erst im Anschluss ist die Entwicklung kohärenter Modelle möglich. Für die Grundlagenforschung spielen die *Anechoic Chambers* eine entscheidende Rolle.
- Mit dem VHF-SAR wurde ein Radarsystem entwickelt, das neben der militärischen Bedeutung ein hohes Potenzial ziviler Anwendungsmöglichkeiten birgt. Die Forschung befindet sich hier noch in den Anfängen, operationelle Anwendungen existieren noch nicht. Das VHF-SAR wird sich in erster Linie auf waldspezifische Anwendungen konzentrieren. Hierzu zählen die Messung der Biomasse, die Erstellung digitaler Geländemodelle unter Wald und eventuell die Bestimmung der Feuchte des Waldbodens. Als Nebeneffekt der enormen Wellenlängen und der hohen Auflösung sind VHF-SAR Szenen meist frei von Speckle. In jeder Auflösungszelle befindet sich in der Regel maximal ein Streuer (Baum). Die Intensität der Rückstreuung ist primär vom Durchmesser des Stammes und somit der Biomasse abhängig. Störende Einflüsse wie Volumenstreuung durch die Baumkrone sind nicht existent. Dies wird die Entwicklung von Rückstreumodellen erleichtern. Eine polarimetrische Datenbasis ist jedoch nicht zu erwarten, VHF-SAR Systeme arbeiten bislang nur in der horizontalen Kopolarisation. Die Messung der vertikalen Kopolarisation bzw. der Kreuzpolarisation ist technisch nicht ohne weiteres zu realisieren. Zusätzlicher Input für die Modelle könnte allerdings durch eine interferometrische Befliegung generiert werden.

- Neben dem VHF-SAR bietet der Ansatz der passiven Radarfernerkundung eine zusätzliche Erweiterung des Spektrums der Mikrowellenfernerkundung. Passive Systeme zeichnen die natürliche Mikrowellenemission der Erde auf. Diese wird in erster Linie von der Bodenfeuchte gesteuert. Im Gegensatz zu aktiven Systemen sind die Einflüsse von Rauigkeit und Vegetation gering. Es existieren bereits einfache Modelle für die Inversion der Mikrowellenemissionen in Bodenfeuchte. Forschungsgegenstand für die nahe Zukunft sollte es ein, theoretisches Wissen in diese Modelle zu integrieren. Eines der Hauptprobleme der passiven Radarfernerkundung ist die geringe geometrische Auflösung der Daten. In ersten Versuchen wurden zwar bereits passive Systeme mit synthetischer Apertur erprobt, dennoch besteht hier Bedarf an weiterer Forschung.
- Die Auswertung interferometrischer, im *Single Pass* Modus aufgezeichneter Daten im Hinblick auf die Erstellung eines digitalen Höhenmodells erfolgt im Großen und Ganzen operationell. Die erzeugten Modelle sind hochwertig, aktuell und besitzen zumeist eine hohe räumliche Auflösung. Probleme ergeben sich lediglich für Bereiche mit einer Rückstreuung nahe Null. Dies betrifft fast ausschließlich Wasserflächen. Je nach verwendeter Frequenz besitzt die Vegetation einen mehr oder weniger deutlichen Einfluss auf die Lage der Streuzentren. Entsprechend ist die Vegetationshöhe mehr oder weniger im Höhenmodell enthalten. Nachzuweisen ist dies in erster Linie bei Waldflächen. Eine fundierte Untersuchung der Abhängigkeit der Lage des Streuzentrums von der Wellenlänge als auch von den Waldparametern wurde bislang nicht geliefert. Das Potenzial für die Bestimmung von Baumhöhen durch die Verwendung mehrerer Frequenzen wurde noch nicht hinreichend erforscht.
- Mit dem *Integral Equation Method Model* existiert ein theoretisches Rückstreumodell für vegetationsarme Bodenoberflächen, dessen Definitionsbereich für Rauigkeit, Bodenfeuchte und Lokalen Einfallswinkel eine nahezu uneingeschränkte Anwendung gestattet. Schwierigkeiten bereitet lediglich dessen Inversion. Lösungsansätze wie *Lookup Tables* oder Neuronale Netze führen meist nicht zu eindeutigen Resultaten. Durch die Erweiterung des Dateninputs mittels *a priori* Information kann das Problem der Unterbestimmung des invertierten Modells beseitigt werden. Diese *a priori* Information kann ebenfalls den SAR-Daten entstammen. Denkbar ist, sofern polarimetrische Daten zur Verfügung stehen, die Verwendung der Objektphase für die Extrahierung eines Oberflächenparameters.
- Anhand der Eigenwertdekomposition nach Cloude kann aus der komplexen Streumatrix eine Reihe physikalisch interpretierbarer Parameter berechnet werden. Diese Parameter werden in verschiedenen Arbeiten theoretisch interpretiert. Meist fehlt jedoch der Bezug zu realen Daten. Eine praxisbezogene Interpretation unter Einbeziehung existierender Probleme steht noch aus. Dies schließt eine umfassende empirische Analyse der Abhängigkeit der Polarisationsparameter von Oberflächenparametern sowie des Lokalen Einfallswinkels ein. In diesem Zusammenhang ist das Potenzial polarimetrischer Parameter betreffs der Extrahierung von Oberflächenparametern abzuschätzen. Die Synthese theoretischen Wissens und empirischer Datenauswertung in Form übertragbarer Modelle kann die polarimetrische Information für die Ableitung biophysikalischer Größen verfügbar machen. Derartige bereits existierende Modelle (CLOUDE et al. 2000, HAJNSEK et al. 2003b) sind einer praxisnahen Validierung zu unterziehen.

- Die zirkulare polarimetrische Kohärenz $|\rho_{RRLL}|$ steht in klarer Beziehung zur Rauigkeit. Dies konnte durch SCHULER et al. (2001 & 2002) anhand eines gewissenhaft durchgeführten Experiments unter Laborbedingungen belegt werden. Insbesondere der Realteil dieser komplexen Größe zeichnet sich durch hohe Korrelationen mit der RMS-Höhe aus, während hier der Vegetationseinfluss reduziert ist. Die theoretische Formulierung dieses Zusammenhangs könnte die zirkulare polarimetrische Kohärenz als zuverlässige Basis für die Berechnung der Oberflächenrauigkeit etablieren. Geländemessungen wären allenfalls für die Validierung notwendig.
- Neben der Rolle der polarimetrischen Information für die Ableitung von Oberflächenparametern wird in einer Vielzahl von Arbeiten deren Potenzial für Klassifikationsanwendungen diskutiert. Hauptargument für die Polarisationsparameter ist die Unabhängigkeit vom Datensatz. Die physikalische Beschaffenheit der Oberfläche ist für deren Ausprägung relevant. Unter dieser Prämisse wurde versucht, übertragbare Klassifikatoren zu entwickeln, die anhand der stattfindenden Streuprozesse die entsprechenden Pixels einer definierten Klasse zuweisen. Die Übertragbarkeit ist bislang nicht nachgewiesen. Zudem ergeben sich Probleme für Bildbereiche mit unzureichender polarimetrischer Information. In diesem Zusammenhang ist festzustellen, dass bisherige Klassifikationsansätze von SAR-Daten sich entweder mit der Rückstreuintensität oder mit der polarimetrischen Information befassen. Dabei kann die Rückstreuintensität gerade bei unzureichender polarimetrischer Phase einen immensen Informationszugewinn leisten. Zudem sollte, insofern eine gewissenhafte radiometrische Kalibrierung der SAR-Intensitäten durchgeführt worden ist, der Rückstreuquerschnitt der Streuobjekte ebenfalls unabhängig vom Datensatz sein. Folglich ist davon auszugehen, dass die Möglichkeit der Entwicklung eines allgemeingültigen Schemas für die Klassifikation eines polarimetrischen SAR-Datensatzes in Basisklassen besteht. Polarimetrische und radiometrische Information sind gegenseitig ergänzend einzubringen.

2.7 Zielsetzung und methodisches Vorgehen

Der obige Abschnitt fasst die Eckpunkte des für diese Arbeit relevanten Forschungsstandes zusammen und weist auf bestehende Defizite hin. Ein Teil des Forschungsbedarfs wird in dieser Abhandlung ausgearbeitet. Im folgenden werden die Etappenziele der Arbeit kurz vorgestellt sowie das methodische Vorgehen komprimiert erläutert.

- Um die Arbeiten überregional einordnen und bewerten zu können, erfolgt eine ausführliche Beschreibung des Untersuchungsgebietes. Betrachtet werden Geologie, Böden, Landnutzung und Klima. Außerdem werden die bisherigen Forschungsaktivitäten im Einzugsgebiet der Talsperre Zeulenroda zusammengefasst. Im Anschluss werden die zur Verfügung stehenden Daten vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Erläuterung der Erhebungsmethoden dieser Daten. Die Art und Weise der Datenerhebung ist für die späteren Untersuchungen relevant.
- Im nachfolgenden Schritt werden die Daten vorverarbeitet und analysiert. Betreffs der SAR-Daten bedeutet dies die Berechnung der Sigma Null Werte, die Dekomposition nach Pauli sowie nach Cloude, die Basistransformation in die zirkuläre RL-Basis, die Berechnung der polarimetrischen Kohärenz etc. Eine anschließende umfangreiche Interpretation der SAR-Daten und der damit einhergehenden Erkenntnisse bildet die Voraussetzung für das weitere Vorgehen. Die Felddaten werden hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft und entsprechend ihrer späteren Verwendung transformiert.
- Eine Fragestellung dieser Arbeit ist die baumhöhenpezifische Lage des Streuzentrums im X-Band. Eine visuelle Analyse des interferometrischen Höhenmodells hat gezeigt, dass sich Waldgebiete aufgrund der Baumhöhen von der Umgebung abheben. Um die Lage des jeweiligen Streuzentrums zu lokalisieren, findet ein Vergleich der gemessenen Baumhöhen mit der aus dem Höhenmodell ermittelten Höhendifferenz an Waldkanten statt. Letztlich wird evaluiert, inwieweit die Genauigkeit des interferometrischen Höhenmodells und jene eines digitalisierten Geländemodells des Landesvermessungsamtes ausreichend ist, um anhand der Kombination beider Modelle die Höhe von Waldbereichen und Gebäuden zu extrahieren.
- Im Rahmen der Klassifikation der Landbedeckung soll die Bedeutung der polarimetrischen Information für eine bessere Klassentrennung geklärt werden. Als objektives Kriterium der Klassentrennbarkeit anhand der verschiedenen SAR-Parameter wird ein Trennungssindex zurate gezogen. Außerdem erfolgt die Durchführung der Klassifikation ohne sowie mit Einbeziehung der polarimetrischen Information. Im weiteren Verlauf ist die Übertragbarkeit eines bestehenden Klassifikators für Polarisationsparameter zu prüfen. Dieses auf *Fuzzy Logic* basierende Verfahren wurde von HELLMANN (2000) anhand eines vergleichbaren Datensatzes entwickelt. Die Einschätzung der Übertragbarkeit auf dieses Untersuchungsgebiet wird sich an den Ergebnissen der Klassifikation orientieren. Die bis zu diesem Punkt gewonnenen Erkenntnisse fließen in ein zusammenfassendes und wissensbasiertes Klassifikationsschema ein. Mit diesem Schema soll ein auf ähnliche Datensätze übertragbarer Klassifikationsalgorithmus zur Verfügung gestellt werden. Schrittweise erfolgt zunächst die Auswahl der geeigneten SAR-Parameter. Anschließend wird für jede Klasse die klassentypische Ausprägung sämtlicher SAR-Parameter untersucht. Hierbei ist darauf zu achten, dass nicht der theoretische, sondern der tatsächliche Wertebereich des jeweiligen Parameters Berücksichtigung findet. Die Ausweisung der verschiedenen Klassen erfolgt in mehreren Schritten unter Verwendung der jeweils geeignetsten SAR-Parameter.

- Die praxisbezogene Interpretation der radiometrischen und polarimetrischen Information stellt einen der Schwerpunkte dieser Arbeit dar. Die Sensitivität der unterschiedlichen SAR-Größen wird für jeweils einen Oberflächenparameter mittels Korrelationsanalysen untersucht. Hierbei muss versucht werden, den Einfluss der jeweils anderen Oberflächenparameter so gering wie möglich zu halten. Besonderes Augenmerk wird auf den Zusammenhang zwischen Rauigkeit und Polarimetrischer Kohärenz gelegt.
- Zentrales Thema dieser Abhandlung ist die Modellierung der Radarrückstreuung sowie die modellbasierte Inversion der SAR-Daten in Bodenfeuchte und Oberflächenrauigkeit. Eine Basis für die erfolgreiche Durchführung dieses Schrittes ist in der umfassenden Korrelationsanalyse des vorherigen Punktes zu sehen. Für die Modellierung finden unterschiedliche Rückstreumodelle Verwendung. Dadurch wird eine umfassende Einordnung und Interpretation der Resultate ermöglicht. Das Hauptinteresse im Rahmen der Rückstreumodellierung gilt dem IEM-Modell und dessen anwendungsorientierter Inversion. Als Resultat wird je eine Karte für Bodenfeuchte und Oberflächenrauigkeit angestrebt. Alle Modelle (ausschließlich Modell nach CHEN et al. 1995) werden zunächst im *Forward* Modus angewandt. Nur im Falle einer erfolgreichen Simulation der Radarrückstreuung in Abhängigkeit der Oberflächenparameter sowie des Lokalen Einfallswinkels ist eine Inversion des jeweiligen Modells angezeigt.

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET UND DATENGRUNDLAGEN

3.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Der Befliegungsstreifen (Dimension ca. $3 \times 10 \text{ km}^2$) befindet sich im nördlichen Sektor des Einzugsgebietes der Trinkwassertalsperre Zeulenroda, Thüringen (siehe Abb. 3.1). Die Hauptausdehnung des Streifens verläuft in Ost-West-Richtung. Das Einzugsgebiet der Talsperre Zeulenroda befindet sich im östlichen Randbereich des Thüringer Schiefergebirges in Südostthüringen an der Grenze zu Sachsen. Es erstreckt sich mit einer Fläche von $138,9 \text{ km}^2$ (ITV 1999) über die Landkreise Schleiz und Zeulenroda in Thüringen sowie Plauen in Sachsen.

Das Areal ist durch rumpfartige, mäßig reliefierte Hochebenen mit Hangneigungen um 3° gekennzeichnet. In diese Ebenen sind Kerbsohlentäler mit Hangneigungen von 20° - 35° eingeschnitten (SEIDEL 2003). Die durchschnittliche Höhenlage beträgt 436 m ü. NN . Die größten Höhen im Einzugsgebiet von etwa 560 m ü. NN werden im Südosten erreicht, während der Wasserspiegel der Zeulenrodatalsperrre bei Betriebsstau eine Höhe von 354 m ü. NN (ITV 1998) aufweist. Die meisten Nebentäler sowie die Talsperre Zeulenroda verlaufen von SW nach NE und orientieren sich somit an der Hauptstreichrichtung der geologischen Formationen (vgl. Abb. 3.1).

Der **geologische Untergrund** des Zeulenrodaeinzugsgebietes ist durch paläozoische Gesteine wie Schiefer, Grauwacken, Quarzite und kalkhaltige Metamorphite geprägt, welche nach SEIDEL (2003) einer während der variszischen Gebirgsbildung entstandenen Faltenzone zuzurechnen sind. Im Zentrum des Untersuchungsgebietes stehen die jüngeren Gesteine des Karbon an, während nach Nordwesten bzw. Südosten die jeweils älteren Formationen des Devon, Silur, Ordovizium und Kambrium zutage treten. Das Einzugsgebiet befindet sich demzufolge in einer geologischen Muldenstruktur (*Bergaer Antiklinorium*). Nordwestlich und südöstlich dieser Antiklinalstruktur befinden sich jeweils Synklinen. Zwischen dem zentralen *Bergaer Antiklinorium* und den angrenzenden Synklinen haben sich umfassende Störungszonen ausgebildet.

Die **Bodenart** im Einzugsgebiet wird größtenteils durch den geologischen Untergrund geprägt. Durch die Dominanz von Schiefen sind primär lehmige Böden anzutreffen. Je nach Geologie handelt es sich um tonige Lehme (über Tonschiefern) bis sandige Lehme (über Grauwacken und quarzhaltigen Schiefen). Die Mächtigkeit der Böden ist durch die Verwitterungsresistenz der Schiefer vor allem in den Hangbereichen gering. Schon in $60\text{-}90 \text{ cm}$ Tiefe steht das Festgestein an. Die sehr steinigen Böden neigen aufgrund der geringen Mächtigkeit, des lehmigen Charakters und der geringen Wasserdurchlässigkeit des geologischen Untergrundes vor allem in Senken zu Staunässe. Die meisten Böden haben sich im Verwitterungsschutt bzw. Solifluktionsschutt der Schiefer entwickelt.

Der mit einem 70%igen Flächenanteil im Einzugsgebiet vorherrschende **Bodentyp** ist die Braunerde. Braunerdestandorte sind vor allem die leicht geneigten Hochflächen und Hangbereiche. Dieser Bodentyp wird vorrangig ackerbaulich genutzt. In nicht geneigten Bereichen der Hochflächen und Senken geht die Braunerde aufgrund der Staunässe in einen Pseudogley über. Diese Flächen können aufgrund der Dränierung eingeschränkt ackerbaulich genutzt werden. In den Talungen sind Auenböden mit einem Flächenanteil von 8% am Einzugsgebiet ausgebildet. Diese Bereiche des Gebietes sind durch Grünland bestanden (AVP 1992 zit. in THRES et al. 1998).

Landwirtschaftliche **Nutzungen** beanspruchen den Großteil der Fläche des Einzugsgebietes. Dabei nehmen Ackerland 55% und Grünland 11% der Gesamtfläche ein. Ackerbau wird überwiegend auf den Hochflächen und in mäßig geneigten Hangbereichen betrieben. Grünland ist vor allem in den Auen angesiedelt. Steil geneigte Areale, die nicht landwirtschaftlich genutzt werden können, sind zumeist mit Nadel-

oder Mischwald mit einem Gesamtflächenanteil von 27% bestanden. Dazu zählt beispielsweise der schmale Nadelwaldgürtel um die Talsperre Zeulenroda. Im Untersuchungsgebiet sind einige ländliche Siedlungen zu finden. Ihr Anteil an der Gesamtfläche beträgt etwa 5%. Wasserflächen machen etwa 2% des Untersuchungsgebietes aus (FLÜGEL & MÜSCHEN 1999).

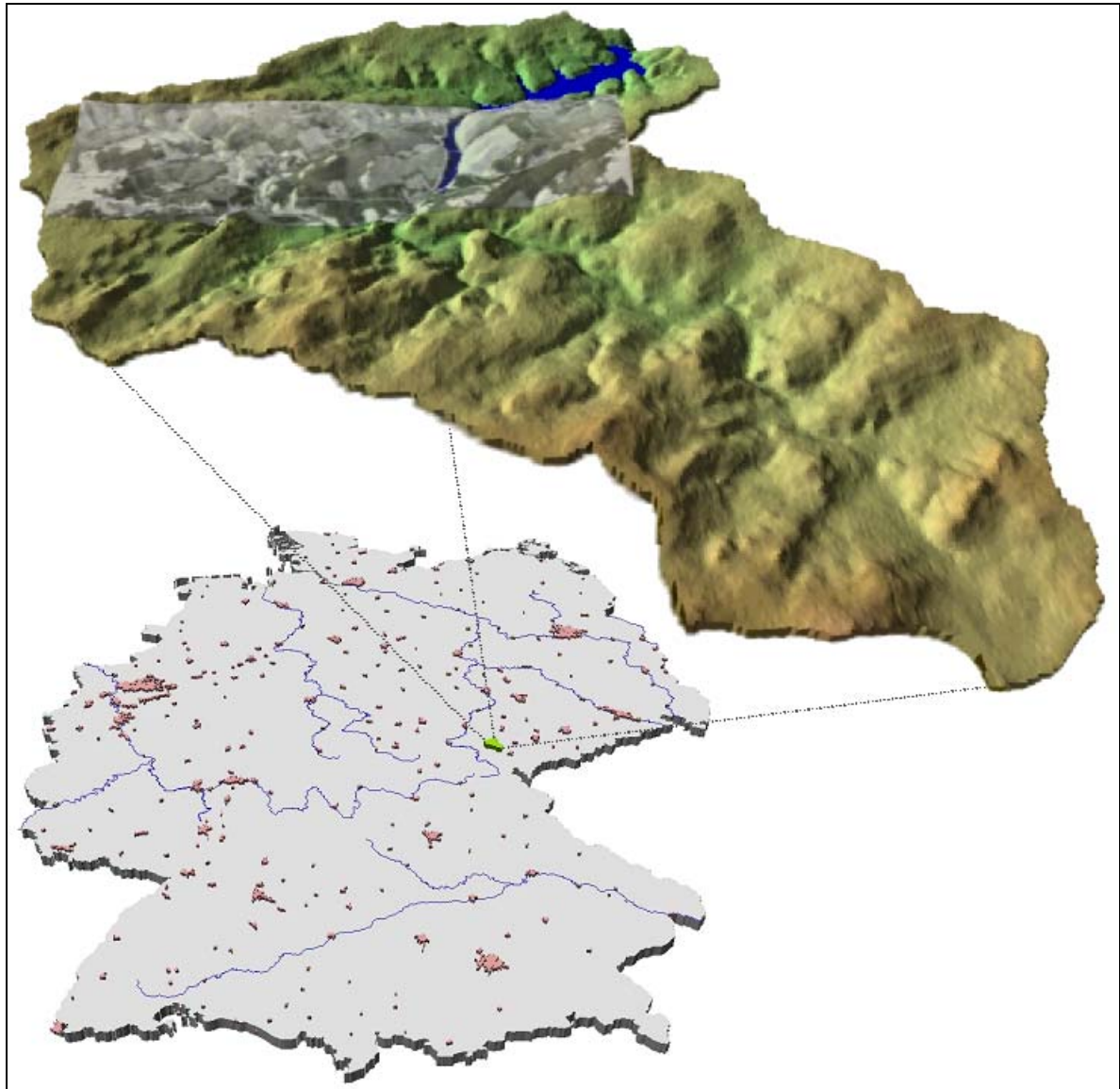


Abb. 3.1: Lage und Reliefdarstellung (5-fach überhöht) des EZG Zeulenroda inkl. Befliegungsstreifen

Das **Klima** des Untersuchungsgebietes ist laut Klassifikationsschema von Köppen & Geiger als gemäßigt, immerfeucht und sommerkühl zu bezeichnen. Die Niederschlagsverhältnisse im Einzugsgebiet spiegeln die Leelage während der Westwetterlagen in den Übergangsjahreszeiten wieder. Die zu diesen Jahreszeiten dominant auftretenden advektiven Niederschläge können das Gebiet aufgrund der Südwestabschirmung durch den Thüringer Wald und das Thüringer Schiefergebirge nur in abgeschwächter Form erreichen. Die im Sommer dominierenden konvektiven Niederschläge verursachen das erste Jahresmaximum im Juni. Ein sekundäres Niederschlagsmaximum, verursacht durch frontale Niederschläge, kann im Spätherbst (Ende November, Anfang Dezember) festgestellt werden. Mit durchschnittlichen Niederschlägen um 635 mm/a für den Landkreis Zeulenroda bzw. 639 mm/a im Landkreis Plauen weist das Einzugsgebiet im Vergleich mit dem gesamtdeutschen Durchschnitt geringe Werte auf (THRES et al. 1998).

Die Jahresmitteltemperaturen für die Landkreise Plauen und Zeulenroda liegen bei etwa 7°C (THRES et al. 1998). Die Monatsmittel an der Klimastation „Talsperre Zeulenroda“ schwanken zwischen -1°C im Februar und 14,5°C im Juli (ITV 1999). Etwa die Hälfte aller Tage im Jahr sind frostfrei. THRES et al. (1998) bezeichnen die Winter als kühl und vergleichsweise schneereich und begründen damit ein verspätetes Einsetzen der Vegetationsperiode in Relation zum restlichen deutschen Raum.

Die bisherigen Forschungsaktivitäten im Einzugsgebiet der Talsperre Zeulenroda konzentrieren sich auf Eutrophierungserscheinungen der Gewässer und Stofftransporte. Dies resultiert in erster Linie aus dem hier vorliegenden Nutzungskonflikt zwischen Trinkwassergewinnung und intensiver landwirtschaftlicher Nutzung. Außerdem bestehen Probleme in der kommunalen Abwasserentsorgung.

So führte PUFE (1994) Untersuchungen zu Stoffeinträgen in die Talsperre durch. Dabei konzentrierte er seine Untersuchungen auf Phosphateinträge und Nitratbelastungen. Die Quelle der Phosphateinträge sieht der Autor in kommunalen Abwässern. Die Nitratbelastungen hingegen entstammen der Überdüngung umliegender landwirtschaftlicher Nutzflächen. Beschleunigt wird der Nitratreintrag durch das umfangreiche Dränagesystem der Ackerflächen. Zur Senkung der Nitratreinträge sollte die Düngung optimiert und die Bodenerosion minimiert werden. Außerdem ist das Ausweisen großzügiger Trinkwasserschutzzonen erforderlich. Möglichkeiten zur Reduzierung der Phosphateinträge sieht PUFE (1994) in der verbesserten Abwasserreinigung bzw. der Ableitung kommunaler Abwässer aus dem Einzugsgebiet durch eine Ringkanalisation.

THRES et al. (1998) versuchten, die Stickstoffdynamik im Einzugsgebiet des Talsperrensystems Weida/Zeulenroda zu simulieren. Primäres Ziel dieser Arbeit war der Test der Einsatzfähigkeit des Stickstoffmodells WHNSIM, um später auf dessen Basis ein Agrarmanagementmodell zu etablieren. Das Modell wurde dafür an zwei Standorten kalibriert und an fünf anderen Standorten validiert. Die erlangten Resultate waren vielversprechend. Als Ursache der hohen Nitratkonzentration im Wasser während des Winterhalbjahrs sehen die Autoren die niedrige Abflussmenge im Winter und der daraus resultierenden geringen Verdünnung dieses Stoffes. Als Gegenmaßnahmen werden Nutzungsänderungen, Flächenstilllegungen und die Reduktion des Tierbestandes diskutiert. Zur Abschätzung der Auswirkungen solcher Maßnahmen wurde von der Thüringer Talsperrenverwaltung (ITV) erwogen, ein Agrarmanagementmodell einzusetzen.

In der Entwicklung des IWES (*Integriertes Wasserrwirtschaftliches Entscheidungsunterstützungssystem*) ist die Umsetzung des vom ITV angestrebten Agrarmanagementmodells zu sehen (FLÜGEL et al. 1999, MÜSCHEN et al. 2000, FINK et al. 2003). Nach FINK et al. (2003) werden folgende Ziele durch dieses Projekt angestrebt: Ausweisung des flächenspezifischen Stoffauftrags, vergleichende Bewertung gewässerschützender Maßnahmen und Bewertung dieser Maßnahmen aus dem Blickwinkel unterschiedlicher hydrometeorologischer Szenarien. Dieses Managementmodell basiert auf der Verknüpfung der Technologie Neuronaler Netze, Geographischer Informationssysteme sowie Hydrologischer Modelle. Zudem erfolgt der Einsatz von Fernerkundungsverfahren.

3.2 Beschreibung der Datengrundlagen

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Auswertung polarimetrischer SAR Daten des Sensors E-SAR. Diesbezüglich standen vier Polarisierungen im L-Band und zwei Polarisierungen im X-Band zur Verfügung. Zusätzlich erfolgte die Aufzeichnung eines interferometrischen X-Band-Datensatzes im *Single-Pass*-Modus. Aus diesem Datensatz wurde anschließend durch das DLR ein Digitales Höhenmodell (DHM) generiert. Während einer Feldkampagne zum Zeitpunkt der Befliegung wurden zahlreiche Geländedaten erhoben. Diese stellen eine Basis für die Auswertung der Radardaten dar. Die Geländeaufnahmen beinhalten die Landbedeckung, einige Vegetationsparameter, die Oberflächenrauigkeit sowie die obere Bodenfeuchte. Zusätzlich stand ein GIS-Datensatz mit den land- und forstwirtschaftlichen Bewirtschaftungseinheiten und deren Bestand zur Verfügung. Ein weiterer GIS-Layer beinhaltet Bodendaten. Ein digitales Geländemodell (DGM) vom Landesvermessungsamt (LVA) fungierte als Basis für die Prozessierung der SAR-Daten beim DLR.

3.2.1 GIS-Daten

Die GIS-Daten der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung beinhalten als wesentliche Information die Grenzen der Bewirtschaftungseinheiten sowie deren Bestand zum Zeitpunkt der Befliegung. In Abb. 3.2 sind diese Daten für den Bereich des Befliegungstreifens dargestellt.

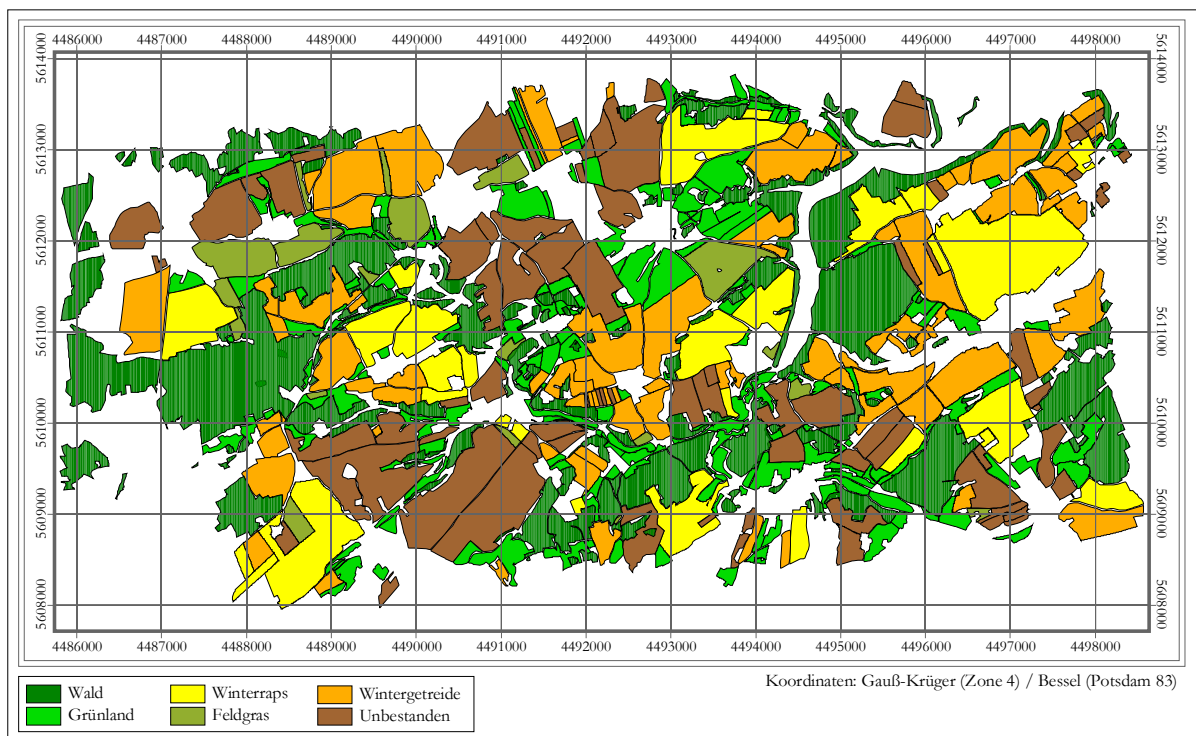


Abb. 3.2: GIS-Daten über die land- und forstwirtschaftliche Bewirtschaftung

Für diese Darstellung wurden die Bestandsdaten in Bezug auf die fernerkundliche Auswertung sinngemäß reklassifiziert. Die Klasse „Unbestanden“ umfasst zwar eine Vielzahl unterschiedlicher Feldfrüchte, allerdings waren diese zum Zeitpunkt der Befliegung entweder noch nicht angebaut bzw. war die Saat noch

nicht aufgegangen. Die Bildung der Klasse „Wintergetreide“ begründet sich in der äquivalenten Ausprägung der verschiedenen Wintergetreidearten im zeitigen Frühjahr. Die Feldfrucht „Winterraps“ weist zum Überfliegszeitpunkt mit Abstand die größte Biomasse auf. Zudem besitzen Winterrapsfelder einen hohen Flächenanteil. „Feldgras“ und „Grünland“ sind zwar im Radarbild nur schwer zu unterscheiden, dennoch bestehen große Unterschiede im Nutzungscharakter der jeweiligen Fläche. Die Klasse „Wald“ konnte nicht weiter untergliedert werden, da die Waldparameterdaten nur unvollständig vorlagen.

Der GIS-Layer der Bodendaten basiert auf der Verschneidung der Bodengeologischen Karte 1:100.000 mit der Hangform, welche zuvor aus dem LVA-DGM abgeleitet wurde. Zusätzlich wurden Informationen aus einer Reihe von Feldmessungen in den Datensatz integriert. Eine detaillierte Beschreibung zur Herleitung des Bodenlayers liefert FINK (2004) in seiner Dissertation.

Das DGM wurde mit einer Zellgröße von $25 \times 25 \text{ m}^2$ bei einer Höhenauflösung von 5 m vom LVA geliefert. Es deckt das gesamte Einzugsgebiet der Trinkwassertalsperre Zeulenroda ab. Die Reliefdarstellung in Abb. 3.1 basiert auf diesem Modell.

3.2.2 Geländedaten

Während der Geländekampagne zum Zeitpunkt der Befliegung wurde eine Reihe von Felddaten erhoben. Dies sind die Oberbodenfeuchte (volumetrisch und gravimetrisch), die Oberflächenrauigkeit sowie einige Vegetationsparameter (inkl. Phytomasseproben). Die Position der einzelnen Messpunkte ist in Abb. 3.3 dargestellt. Dabei konzentriert sich die Aufnahme der Felddaten auf drei Bereiche. Entsprechend der jeweiligen Gemeindeflächen liegt im Westen des Untersuchungsgebietes der Aufnahmebereich Rödersdorf, in der Mitte Tegau und im Osten Läwitz.

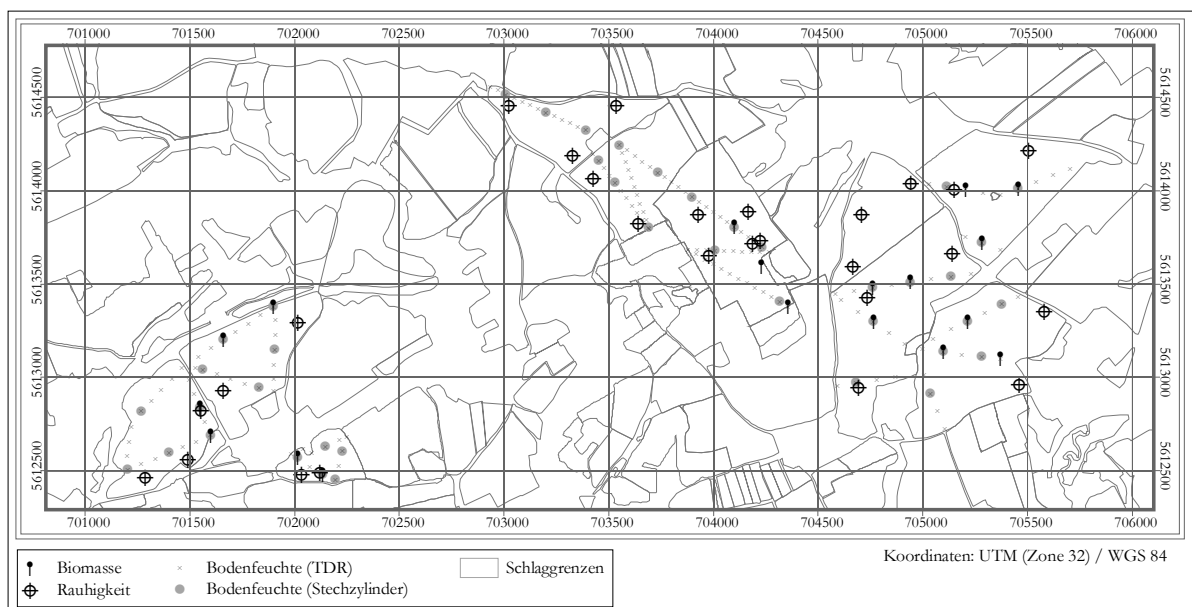


Abb. 3.3: Aufgenommene Geländedaten mit Verortung

Der Großteil der **Bodenfeuchtemessungen** erfolgte entlang von Messprofilen mit TDR-Messgeräten des Typs TRIME-FM 2, Sonde P2G der Firma *IMKO Micromodultechnik GmbH*. Diese Sonden messen die Dielektrizitätskonstante des Bodens mit einem EM-Impuls der Frequenz von 1 GHz. Aus Länge und Abstand der Metallstäbe der Sonde ergibt sich laut Hersteller ein Messvolumen von ca. 1,9 l. Geräteintern

erfolgt die Umrechnung der Dielektrizitätskonstante in volumetrische Bodenfeuchte. Für den umgekehrten Fall gibt die IMKO Micromodultechnik GmbH den in Gl. 3.1 dargestellten Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und Dielektrizitätskonstante als Standardgleichung an. Auf deren Basis erfolgte die Berechnung der vom Gerät gemessenen Wert für ε' .

$$\varepsilon' = -116,94 \cdot m_v^3 + 156,04 \cdot m_v^2 + 0,41 \cdot m_v + 2,95 \quad 3.1$$

Pro Aufnahmepunkt sind, je nach Varianz der Messwerte, zwei bis drei TDR-Messungen durchgeführt worden. Diese wurden für die weitere Verarbeitung gemittelt. Somit ergibt sich pro Aufnahmepunkt ein Bodenfeuchtwert. Zusätzlich zu den TDR-Messungen erfolgte in regelmäßigen Abständen entlang der Messprofile die Entnahme von Bodenproben. Hierbei fanden Stechzylinder eines definierten Volumens Verwendung. Die Bearbeitung dieser Proben erfolgte anhand der Beschreibung in Punkt 2.3.1.2.

Die Aufnahme der **Oberflächenrauigkeit** im Gelände erfolgte anhand eines Kontaktverfahrens. Hierfür kamen Metallplatten von einem Meter Länge zum Einsatz (Abb. 3.4). Diese bildeten den Hintergrund für das zu fotografierende Rauigkeitsprofil. Pro Rauigkeitsmesspunkt in Abb. 3.3 wurden je fünf Rauigkeitsteilprofile parallel sowie senkrecht zur Flugrichtung des Sensors aufgenommen. Dies jeweils fünf Aufnahmen erfolgten entlang einer Geraden, wodurch für jede Messrichtung ein fünf Meter langes Profil simuliert werden sollte.



Abb. 3.4: Aufnahme eines Rauigkeitsprofils im Gelände

Das Raster auf den Metallplatten vereinfacht den manuellen Digitalisierungsprozess der Bodenoberkante. Jedes Rauigkeitsprofil wurde in einer Auflösung von ca. einem Zentimeter digitalisiert. Anhand der Koordinaten der Oberkante des Rauigkeitsprofils wurden die Rauigkeitsparameter RMS-Höhe s und die Autokorrelationsfunktion $\rho(\xi)$ bestimmt (siehe Punkt 2.3.1.1). Aus der Autokorrelationsfunktion ergibt sich die Autokorrelationslänge l .

Für die jeweils fünf Rauigkeitsteilprofile wurden pro Flugrichtung die arithmetischen Mittel der Parameter s und l berechnet. Die Verknüpfung der Rauigkeitsteilprofile zu einem fünf Meter langen Gesamtprofil wurde nicht realisiert. Für diesen Schritt waren die Voraussetzungen (horizontale Ausrichtung der Metallplatten aller Messungen eines Gesamtprofils, Überlappungsbereich angrenzender Rauigkeitsteilprofile) während der Kampagne nicht gegeben. Aus diesem Grund kommt es vor allem bei rauen Feldern zu großen Unsicherheiten hinsichtlich der Autokorrelationslänge, da Profillängen von einem Meter deutlich unter dem von LE TOAN et al. (1998) sowie DAVIDSON et al. (2000) geforderten Mindestmaß liegen.

Die Beprobung der **Biomasse** erfolgte durch das Abernten des oberirdischen Pflanzenmaterials einer bestimmten Fläche (1 m²). Die frischen Proben wurden anschließend im Labor eingewogen. Nach der Ofentrocknung erfolgte zur Bestimmung der Trockenmasse und des Pflanzenwassergehalts die zweite

Wägung. Ferner wurden während der Geländekampagne die Angaben der Landwirte bezüglich der angebauten Feldfrucht (vgl. Abb. 3.2) soweit möglich überprüft. Abweichungen fanden im GIS-Datensatz Berücksichtigung. Zudem erfolgte die deskriptive Aufnahme von Feldfruchtrückständen (z.B. Maisstopeln) des Vorjahres. Sofern auf den beprobten Feldern bereits ein Pflanzenbestand vorhanden war, wurde dessen Wuchshöhe erfasst.

3.2.3 Fernerkundungsdaten

Die Fernerkundungsdaten (Abb. 3.5 [auf die markierten Bereiche A-F wird in einem späteren Abschnitt eingegangen]) wurden durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) aufgezeichnet und prozessiert. Hierbei kam das flugzeuggetragene Experimentelle SAR (E-SAR) zum Einsatz. Die Flughöhe für die Aufnahmen betrug ca. 3.700 m ü. NN. Die Befliegung wurde am 30.03.1999 gegen 13:00 Uhr durchgeführt. Aufgezeichnet wurden alle L-Band (1,3 GHz) Polarisationen (HH, HV, VH, VV) sowie zwei X-Band (9,6 GHz) Polarisationen (HH, VV). Zudem wurde das X-Band (VV-Polarisation) als Datengrundlage für ein interferometrisches DHM aufgenommen (*Single Pass*).

Die Intensitäten lagen bezüglich der Bildgeometrie in drei Varianten vor: in *Slant Range*, in *Ground Range* und geokodiert. Die SLC-Daten (*Single Look Complex*) wurden in *Slant Range* sowie (erstmal) geokodiert geliefert. Die Intensitätsdaten wurden als detektierte *4-Look* Bilder prozessiert. Die geometrische Auflösung der *Ground Range* Variante beträgt im L-Band $2,2 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$ (Range \times Azimut) und $2,2 \text{ m} \times 1,8 \text{ m}$ im X-Band. Die Auflösung der SLC Daten in *Slant Range* liegt bei etwa $1,5 \text{ m} \times 0,8 \text{ m}$ für das L-Band und $1,5 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$ für das X-Band.

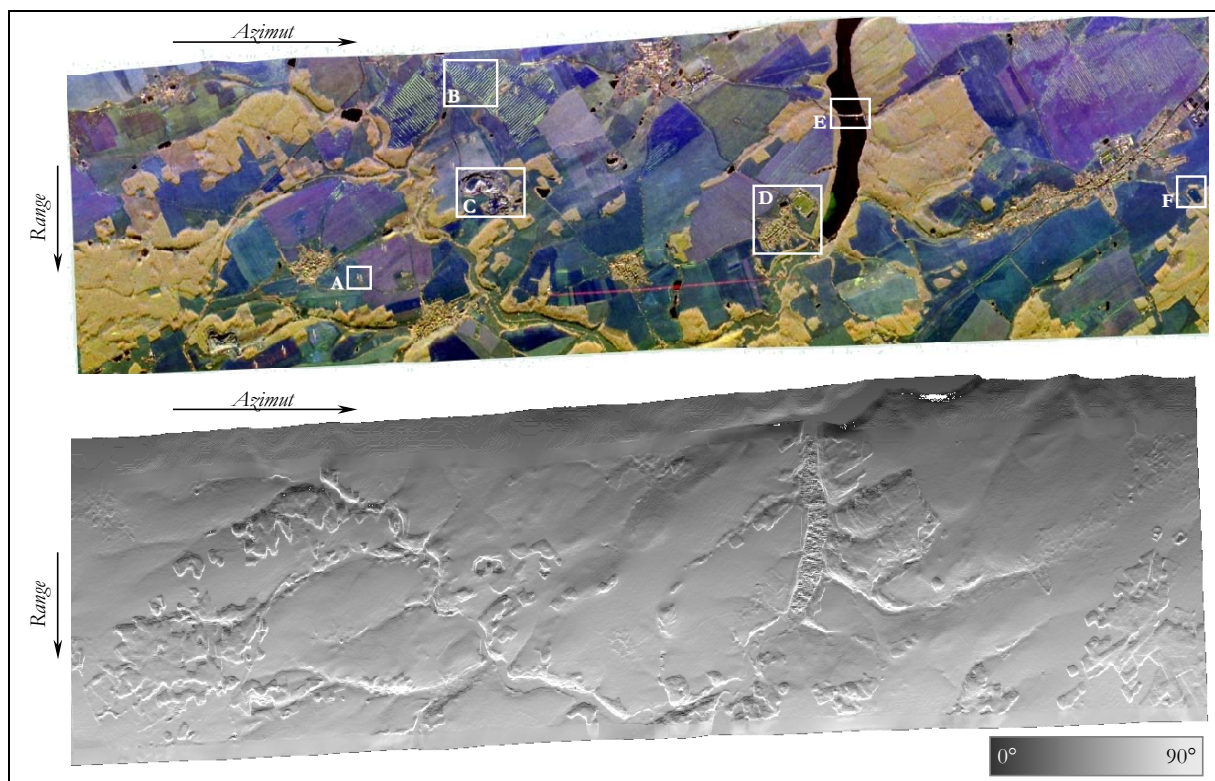


Abb. 3.5: RGB-Komposite der Intensitäten (L-HH, L-VV, X-VV) und Karte des Lokalen Einfallswinkels (unten)

Der interferometrische X-Band Datensatz wurde ebenfalls vom DLR prozessiert. Das daraus resultierende DHM besitzt eine horizontale Auflösung von fünf Metern bei einer Höhenauflösung von einem Meter. Dieses Modell beinhaltet Gebäude- sowie Waldhöhen.

Anhand der Aufnahmegeometrie des E-SAR und des vom LVA Thüringen gelieferten DGM wurden durch das DLR Karten für den lokalen Einfallswinkel erstellt. Diese stellen eine Grundlage für die Berechnung der *Sigma Null* Werte dar. Für jede Überfliegungssequenz wurde eine solche Karte abgeleitet.

4 AUSWERTUNG

4.1 Vorverarbeitung und erste Analyse der Daten

4.1.1 Analyse der Felddaten

4.1.1.1 Bodenfeuchte

Zum Zeitpunkt der Befliegung bestand bei geringer solarer Einstrahlung eine geschlossene Wolkendecke. Der Tag der Kampagne sowie der Vortag waren niederschlagsfrei (Abb. 4.1). In den 10 Tagen zuvor traten fast täglich leichte advektive Niederschläge auf. Aufgrund dieser Verhältnisse kann von einem gut durchfeuchteten Boden im Untersuchungsgebiet ausgegangen werden. Ein Austrocknen der oberen Bodenschicht fand aufgrund der vorherrschenden feucht-kühlen Witterungsverhältnisse nicht statt. Staunässe trat nur in wenigen Senken auf.

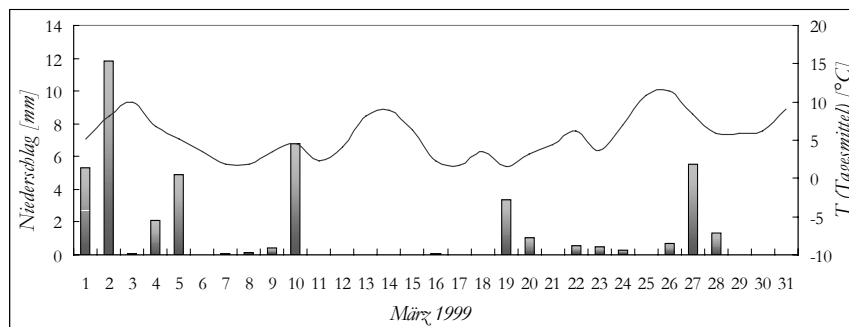


Abb. 4.1: Niederschlag und mittlere Tagestemperatur im Untersuchungsgebiet (Quelle: DWD)

Die Ursache der festgestellten Bodenfeuchteunterschiede ist in erster Linie im Relief zu suchen. Während auf Kuppen und anderen Erhebungen eine geringere Bodenfeuchte gemessen wurde, konnten in Senken oder im Hangauslauf höhere Werte festgestellt werden. Abb. 4.2 gibt dieses Muster für den Messbereich Läwitz wieder. Für diese einfache Darstellung wurden die volumetrischen Bodenfeuchtwerte mit dem *Spline*-Verfahren interpoliert. Allerdings ist zu beachten, dass die interpolierten Bodenfeuchtwerte aufgrund des weitmaschigen Messnetzes nur im Bereich der Messpunkte sicher interpretierbar sind.

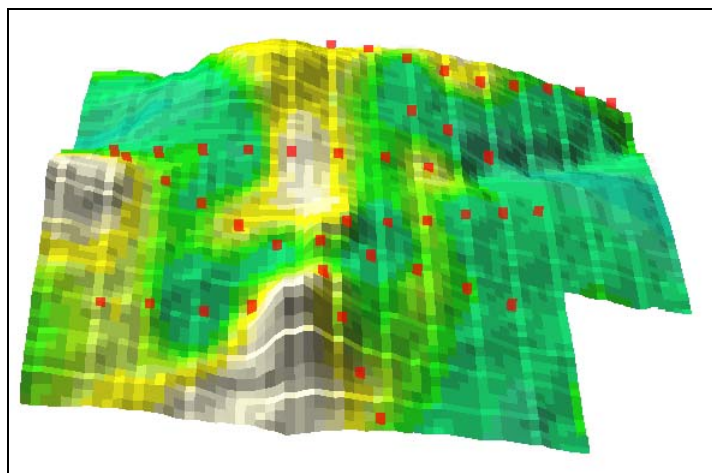


Abb. 4.2: Aus TDR-Messungen interpolierte Bodenfeuchte mit Geländehöhe

Blaue Farben stehen für feuchte Bereiche, Areale in gelb bis weiß repräsentieren eine geringe Feuchte. Gebiete mittlerer Bodenfeuchte sind in grün dargestellt. Die Geländehöhe entstammt dem DGM des LVA (5-fach überhöht). Anzumerken ist, dass eine sichere Interpretation der interpolierten Bodenfeuchte nur in der Umgebung der Messpunkte (rote Punkte) möglich ist.

Bodenfeuchteunterschiede aufgrund der variierenden Neigungsrichtung der Hänge konnten nicht festgestellt werden. Dies begründet sich einerseits in den geringen Beleuchtungsunterschieden durch den bedeckten Himmel vor und während der Kampagne. Andererseits ist der Datensatz nicht geeignet, um expositionsbedingte Bodenfeuchteunterschiede herauszustellen.

Neben dem Relief wirken sich die Bodeneigenschaften auf den Bodenwassergehalt aus. Innerhalb des Befliegungsstreifens sind diesbezüglich jedoch nur geringe Unterschiede zu erwarten, da die Bodenparameter kaum variieren.

Der Großteil der Bodenfeuchtemessungen erfolgte mittels TDR-Sonden (siehe Punkt 3.2.2). Diese Messungen wurden in regelmäßigen Abständen von Stechzylinderproben für die gravimetrische Bodenfeuchtebestimmung begleitet. In der folgenden Abb. 4.3 ist ein Vergleich zwischen den Messwerten beider Verfahren dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Zahlenwerte beider Verfahren nicht direkt miteinander zu vergleichen sind. Die Berechnung der volumetrischen Bodenfeuchte m_v aus den gravimetrischen Messwerten m_g (Wassermasseanteil an der getrockneten Probe [%]) erfolgt anhand der folgenden Gleichung:

$$m_v = m_g \cdot \frac{\rho_{trocken}}{\rho_{Wasser}} \quad 4.1$$

Dabei stehen $\rho_{trocken}$ und ρ_{Wasser} für die Dichte der getrockneten Probe bzw. die Dichte von Wasser. Demzufolge stimmen volumetrische und gravimetrische Bodenfeuchte nicht überein. Dennoch sollte unter der Voraussetzung kompakter Böden (kaum Luftporen) bei qualitativ angemessenen Feldmesswerten eine Korrelation zwischen beiden Parametern erkennbar sein.

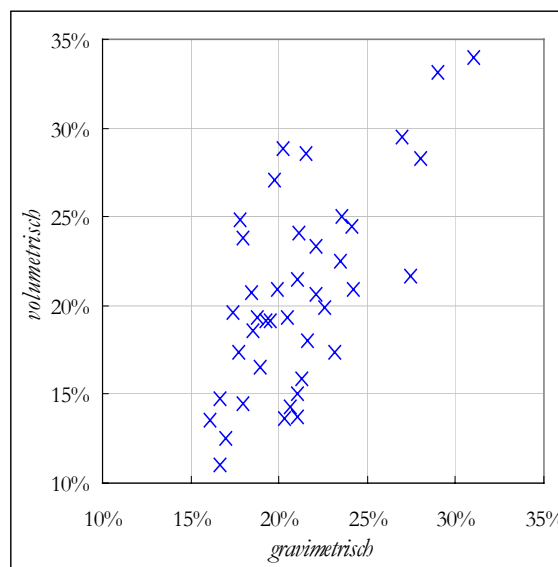


Abb. 4.3: Vergleich zwischen gravimetrisch- und volumetrisch gemessener Bodenfeuchte

Die recht deutlichen Abweichungen zwischen beiden Messgrößen (Abb. 4.3) sind auf vielfältige Ursachen zurückzuführen. Während pro Messpunkt zwei bis drei TDR-Messungen durchgeführt wurden, erfolgte jeweils nur die Entnahme einer Stechzylinderprobe. Demnach kann die Variabilität der Bodenfeuchte am

Messpunkt anhand der Stechzylinderproben nicht erfasst werden. Des Weiteren besteht ein systematischer Unterschied zwischen beiden Messverfahren. Lufteinschlüsse im Boden bewirken eine Herabsetzung der Dielektrizitätskonstante durch den höheren Luftanteil am Gesamtmessvolumen. Daraus resultieren geringere volumetrische Bodenfeuchtemesswerte. Im Gegensatz dazu bleibt die gravimetrische Bodenfeuchte von größeren Lufteinschlüssen unbeeinflusst. Diese führen lediglich zu einer Verringerung des Probengewichtes. Daher ist ein Vergleich der Ergebnisse beider Messverfahren nur über die Berücksichtigung der Bodendichte möglich (Gl. 4.1). Dies gilt insbesondere für maschinell bearbeitete und daher lockere Böden in der Landwirtschaft. Unglücklicherweise standen für diese Arbeit keine Informationen hinsichtlich der Bodendichte zur Verfügung.

Letztlich sind für die Radarrückstreuung die dielektrischen Eigenschaften einer Oberfläche von Bedeutung. Somit kommen in dieser Arbeit die Bodenfeuchtwerte der TDR-Messungen bzw. die aus diesen Werten nach Gl. 3.1 abgeleitete Dielektrizitätskonstante zum Einsatz. Nachteilig an dieser Vorgehensweise ist die von der *Sensing Depth* (ca. 5 cm für das L-Band, vgl. BRUCKLER et al. 1988, ULABY et al. 1996) abweichende Messtiefe der TDR-Sonden von etwa 15 cm. Die oben beschriebenen Witterungsverhältnisse lassen jedoch einen zu vernachlässigenden Feuchtegradienten innerhalb dieser Messtiefe vermuten.

4.1.1.2 Oberflächenrauigkeit

Die gemessene Rauigkeit einer Oberfläche kann in Abhängigkeit der horizontalen Ausrichtung der Rauigkeitsmessprofile variieren. Folglich ist Oberflächenrauigkeit nicht notwendigerweise isotrop. Die Ausmaße dieser Anisotropie sind bei landwirtschaftlich genutzten Flächen an die Art der ackerbaulichen Bearbeitung gebunden. Zum Zeitpunkt der Befliegung war ein Großteil der Felder bereits bestellt. Die dominierenden Feldfrüchte sind Wintertraps, Winterweizen, Sommergerste und Feldgras. Jene Felder sind durch eine geringe Rauigkeit gekennzeichnet. Nur wenige Felder sind gepflügt bzw. liegen noch brach.

In den theoretischen (der Optik entlehnten) Rückstreumodellen ist die zweidimensionale Rauigkeit in *Range*, also senkrecht zur Bewegungsrichtung des Sensors, für die Rückstreuintensität ausschlaggebend (HENDERSON & LEWIS 1998). Jedoch besitzt die Rauigkeit in *Azimuth* ebenfalls einen Einfluss auf den Rückstreuprozess. Deutliche Anstiege der Oberfläche in *Azimuth*, verursacht durch Relief oder große Rauigkeit, bewirken eine Rotation der Streumatrix um die *Line of Sight* (LOS) (HAJNSEK 2001, SCHULER et al. 2001 & 2002). Um derartige Effekte sowie die Anisotropie der Oberflächenrauigkeit erfassen zu können, erfolgten die Messungen im Gelände senkrecht als auch parallel zur Flugrichtung des E-SAR.

Abb. 4.4 stellt die Parameter RMS-Höhe σ und Autokorrelationslänge l für beide Aufnahmerichtungen der Oberflächenrauigkeit gegenüber. Die RMS-Höhe (linkes Diagramm) besitzt im Vergleich mit der Autokorrelationslänge eine deutlich geringer ausgeprägte Anisotropie. Demnach spielt hier die Messrichtung eine untergeordnete Rolle. Hintergrund hierfür ist wohl der maßgebliche Einfluss der Bodenclustergröße auf diesen Parameter, die aus der Art der Bodenbearbeitung resultiert. Die Ausrichtung dieser Cluster (z.B. in einer Reihenstruktur) wirkt sich augenscheinlich nicht dominierend auf die RMS-Höhe aus. Jedoch muss festgehalten werden, dass die hohe Korrelation zwischen beiden Messrichtungen durch die wenigen Werte hoher Rauigkeit etabliert wird.

Im Gegensatz zur RMS-Höhe offenbart die Autokorrelationslänge eine Abhängigkeit von der Messrichtung. Hier ist demnach nicht nur die Größe der Bodencluster, sondern auch deren (eventuell periodische) Anordnung von Belang. Abb. 4.4 (rechtes Diagramm) verdeutlicht, dass die senkrecht und parallel zur Sensorbewegung aufgenommenen Werte für l nahezu unabhängig sind. Fraglich ist jedoch, ob aufgrund der nach LE TOAN et al. (1998) und DAVIDSON et al. (2000) zu geringen Messprofilfülle für l eine umfassende Diskussion des Diagramms zulässig ist. Sicher hingegen ist, dass die durchgeführten Messungen

eine detaillierte Untersuchung der Abhängigkeit der Rauigkeitsparameter von der Feldbearbeitungsrichtung nicht gestatten. Diesbezüglich wären im Mindestfall weitere Messungen jeweils senkrecht sowie parallel zur Bearbeitungsrichtung notwendig. Dies ist allerdings nicht Gegenstand dieser Arbeit.

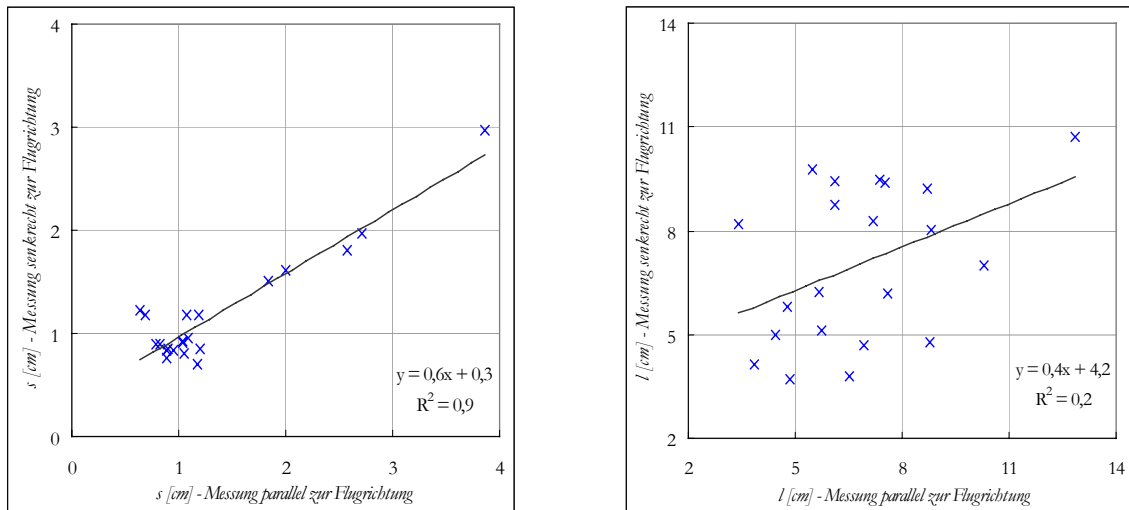


Abb. 4.4: Vergleich zwischen den senkrecht- und parallel zur Flugrichtung gemessenen Rauigkeitsparametern

In der folgenden Abb. 4.5 ist die Abhängigkeit der Autokorrelationslänge von der RMS-Höhe für die Rauigkeitsmessungen in Azimut (parallel zur Sensorbewegung) dargestellt. Mit steigender RMS-Höhe nimmt die Autokorrelationslänge zu.

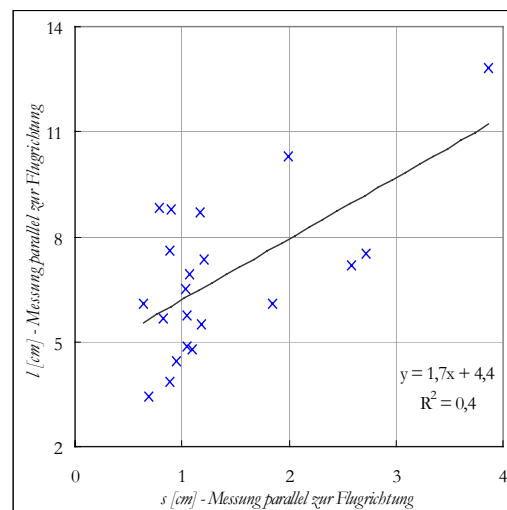


Abb. 4.5: RMS-Höhe vs. Autokorrelationslänge

Diese Beziehung zwischen beiden Rauigkeitsparametern wurde bereits von DAVIDSON et al. (2000) erkannt. Sie tritt vor allem bei kurzen Messprofilen auf. Zwar kann hier nur eine schwache Korrelation festgestellt werden. Dennoch bestätigt die Gleichung der Regressionslinie jenen von DAVIDSON et al. (2001) festgestellten mathematischen Zusammenhang zwischen s und l . Für eine exaktere Analyse und eine höhere Korrelation hätten weitere Messungen im Bereich hoher Rauigkeit erfolgen müssen.

4.1.1.3 Biomasse

Die Entnahme von Biomasseproben im Gelände erfolgte für die Feldfrüchte Winterweizen, Feldgras sowie Winterraps. Andere Anbauarten waren noch nicht ausgekeimt. Überdies wurde die tote Biomasse der Residuen von Silomais des Vorjahres (Maisstoppeln) gemessen. Die phänologische Ausbildung der beprobten Feldfrüchte ist in Abb. 4.6 dargestellt.

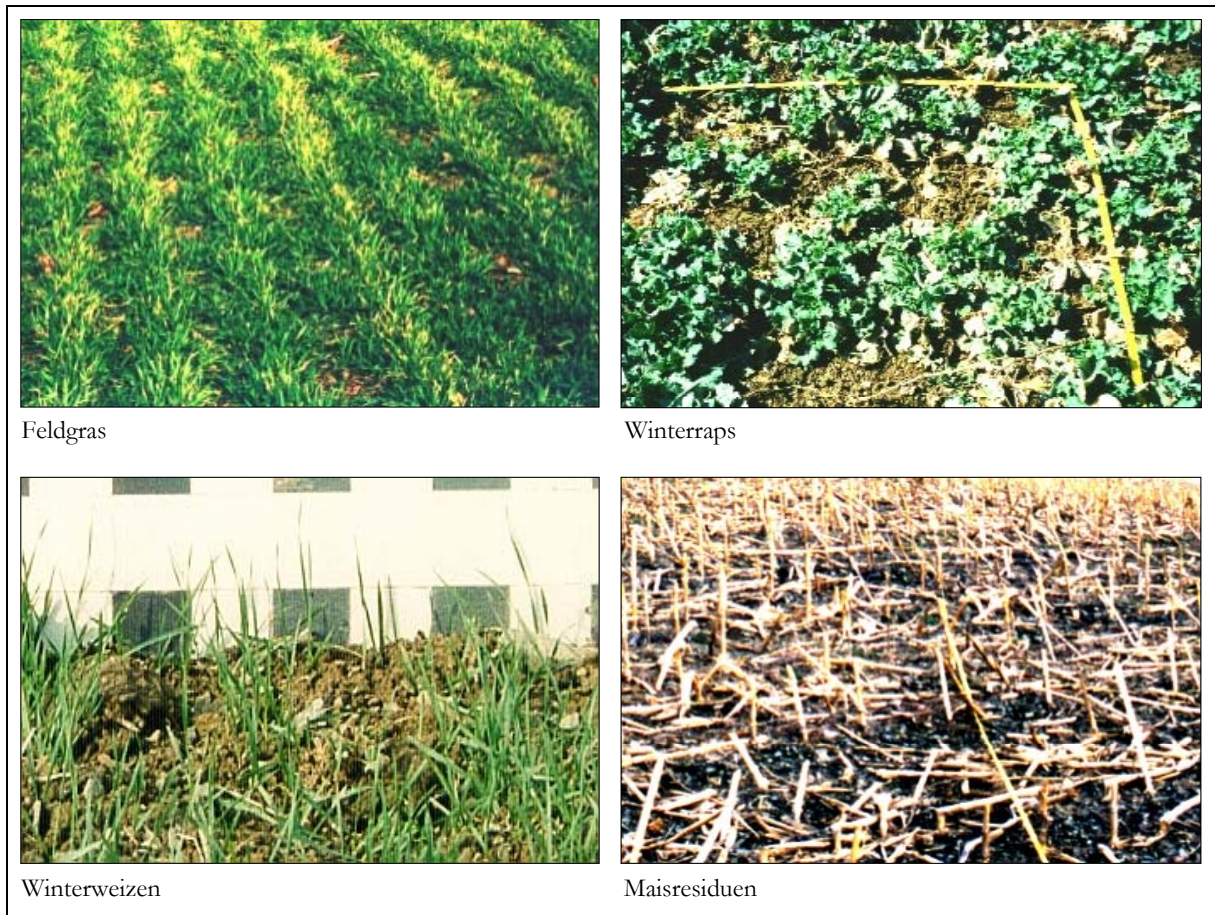


Abb. 4.6: Phänologischer Entwicklungsstand der Feldfrüchte bzw. Residuen zum Zeitpunkt der Befliegung

Trotz des Befliegungstermins im zeitigen Frühjahr waren die angebaute Feldfrüchte bereits gut ausgebildet. Die größte frische Biomasse erreichte der Winterraps mit etwa $0,8 \text{ kg/m}^2$ (vgl. Abb. 4.7). Außerdem ist er durch einen sehr hohen Pflanzenwassergehalt von 88% gekennzeichnet. Folglich spielt dieser Vegetationsbestand eine große Rolle für die Entstehung der Radarrückstreuung. Der Informationsgehalt an Bodenfeuchte und Rauigkeit im Radarsignal (X- und L-Band) wird durch den Winterraps gedämpft. Im Gegensatz dazu steht der Winterweizen mit einer frischen Biomasse von etwa $0,06 \text{ kg/m}^2$. Hier wurde ein Wassergehalt von ca. 73% ermittelt. Aufgrund dieser geringen Werte wirkt sich diese Vegetation allenfalls auf die Rückstreuung im X-Band aus. Das ebenfalls im Vorjahr angesäte Feldgras nimmt bezüglich der frischen Biomasse eine Zwischenstellung ein. Sie beträgt bei einem Pflanzenwassergehalt von 81% etwa $0,3 \text{ kg/m}^2$. Damit ist ein Einfluss auf das Rückstreusignal wahrscheinlich. Eine Sonderstellung bei dieser Untersuchung nehmen die Restbestandteile des Silomais vom Vorjahr ein. Hierbei handelt es sich um tote Biomasse. Der Pflanzenwassergehalt ist mit ca. 47% deutlich geringer als bei vitaler Vegetation. Dennoch wird eine feuchte Biomasse von $0,2 \text{ kg/m}^2$ erreicht. Nach der Ofentrocknung beträgt die Trockenmasse noch $0,12 \text{ kg/m}^2$ und übertrifft somit alle anderen Feldfrüchte.

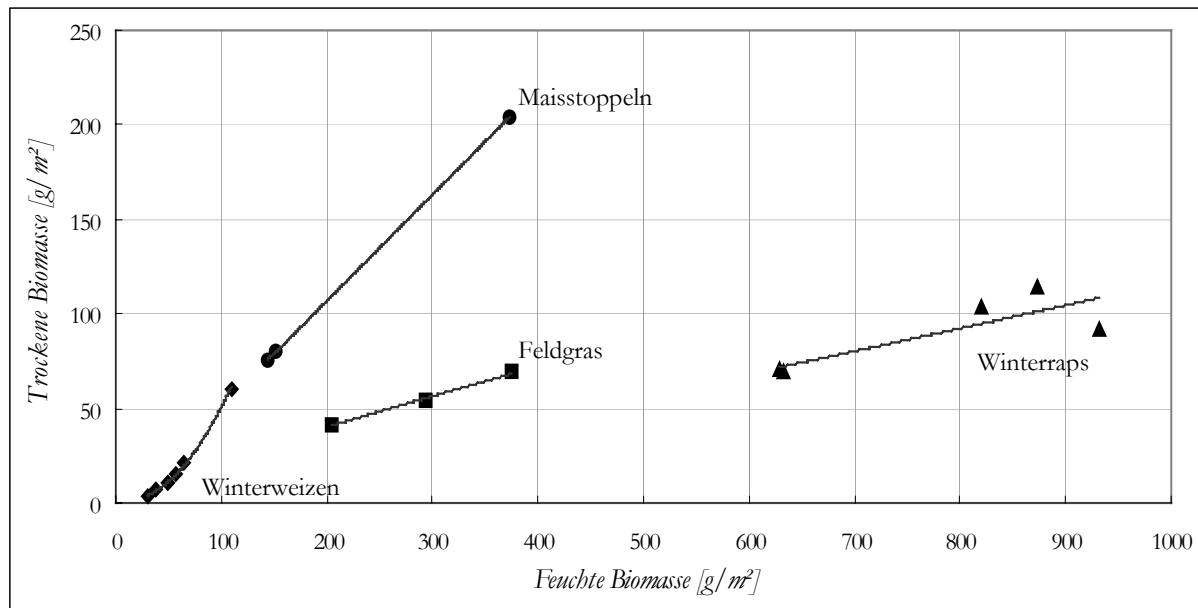


Abb. 4.7: Gemessene Biomasse vor und nach Ofentrocknung

Die Maisstrünke sind ca. 0,5 m lang. Sie wurden vorwiegend senkrecht stehend oder liegend vorgefunden. Zwar besitzen sie aufgrund des niedrigen Wassergehaltes eine geringere Dielektrizitätskonstante als vitale Vegetation, dennoch können sie aufgrund ihres recht großen Durchmessers sowie ihrer Ausrichtung das Radarrückstreusignal (auch im L-Band) beeinflussen (JACKSON & O'NEILL 1987, MCNAIRN et al. 2002).

4.1.2 Vorverarbeitung und Analyse der SAR-Daten

4.1.2.1 Vorverarbeitung der SAR-Daten

Die Intensitätsdaten wurden vom DLR als unskalierte Integer-Werte geliefert. Für eine weitere Verwendung in Rückstreumodellen war eine Umrechnung in *Sigma-Null*-Werte (σ_0) notwendig. Die Berechnung der σ_0 -Werte wurde anhand der mitgelieferten mathematischen Gleichung unter Einbeziehung des lokalen Einfallswinkels θ durchgeführt. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgte einerseits logarithmiert in Dezibel [dB] als auch linear.

Die SLC-Daten stellen die Grundlage der polarimetrischen Auswertung dar. Anhand dieser Daten erfolgte die Dekomposition nach Pauli sowie nach Cloude. Zudem wurde eine Basistransformation in die zirkuläre RL-Basis durchgeführt (vgl. Punkt 2.2.2.4.5). In dieser Basis wurde die polarimetrische Kohärenz zwischen den Polarisationen RR und LL berechnet (vgl. Punkt 2.3.2.2.3). Des Weiteren erfolgte die Berechnung der Phasendifferenz zwischen beiden Kopolarisationen in der linearen HV-Basis.

Im Folgenden werden die SAR-Daten visuell analysiert. Dabei wird einleitend mit der RGB-Komposite der Intensitäten (L-HH, L-VV, X-VV) aus Abb. 3.5 begonnen. Daran schließt sich die Diskussion der durch die Dekomposition berechneten Polarisationsparameter an.

4.1.2.2 Analyse der SAR-Daten

4.1.2.2.1 Analyse der Intensitäten

Im Intensitätsbild sind Areale hoher Rückstreuung durch helle Farbschattierungen gekennzeichnet. In Abb. 3.5 sind hohe Rückstreuwerte für die Landbedeckungen Wald und Siedlung zu finden. Diese Landbedeckungsformen erscheinen in der Komposite in gelben Farbtönen. Die helle Farbe resultiert aus der hohen Rückstreuintensität für Wald und Siedlung im L-Band. Eine sehr geringe Rückstreuung ist bei Wasserflächen oder anderen glatten Oberflächen wie befestigten Straßen oder Plätzen zu verzeichnen. In Abb. 3.5 sind diese Bereiche sehr dunkel bis schwarz. Alle restlichen Flächen besitzen eine mittlere Rückstreuintensität. Hierzu zählen vor allem Bereiche mit niedriger Vegetation, landwirtschaftliche Nutzflächen oder Grünland.

In der Komposite aus Abb. 3.5 sind sechs Bereiche (A-F) durch weiße Rahmen hervorgehoben. Diese Areale wurden zum Zweck der Demonstration der geometrischen Auflösung sowie zur Erklärung einiger interessanter Rückstreuphänomene gewählt. In den Abb. 4.8 und 4.10 sind diese Bereiche vergrößert dargestellt. Diese Vergrößerungen (RGB-Kompositen [L-HH, L-HV, L-VV]) basieren auf den anhand der SLC-Daten berechneten ungefilterten Amplitudenbildern.

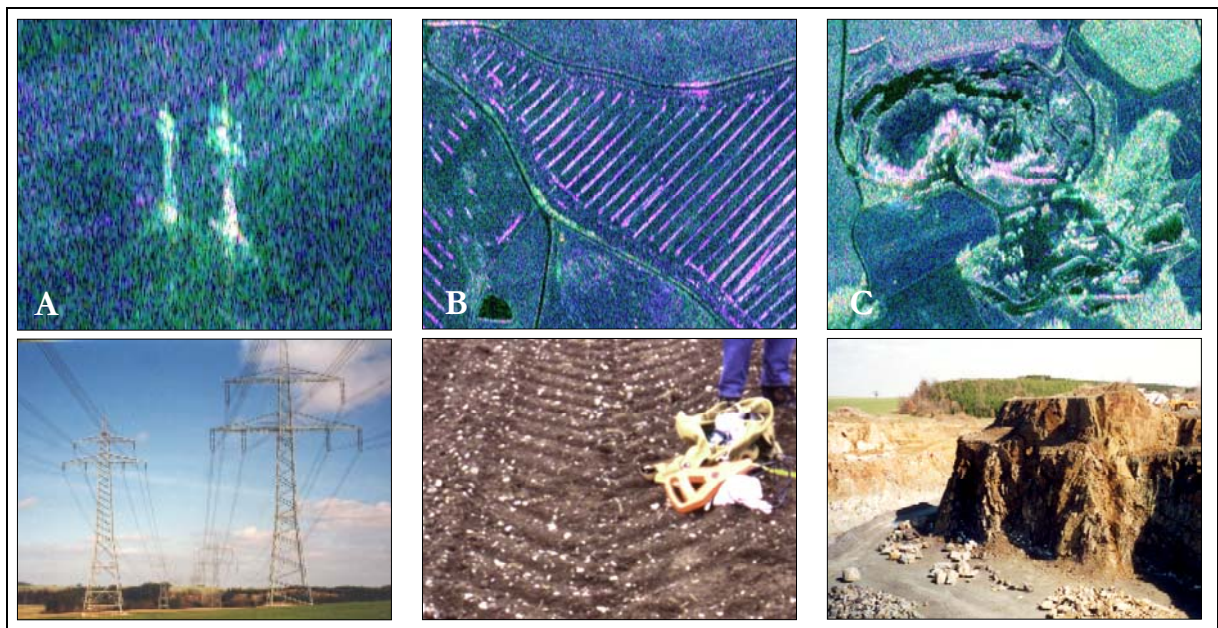


Abb. 4.8: Ausschnitte aus der E-SAR Szene und dazugehörige Geländeaufnahmen, Teil 1

Bei dem Bildausschnitt A handelt es sich um die Masten zweier Hochspannungsüberlandleitungen. Diese durchziehen das Untersuchungsgebiet in der linken Bildhälfte von Südwest nach Nordost. Durch die Metallbauweise und die vertikal, horizontal als auch diagonal ausgerichteten Streben erzeugen die Masten in jeder Polarisation und Frequenz ein sehr hohes Rückstreusignal. Auffällig im SAR-Bild ist die Neigung nach Norden (zum Sensor). Dieser Effekt basiert auf der *Slant Range* Geometrie während der Aufzeichnung eines SAR-Bildes. Aufgrund der spezifischen Höhe ist die Entfernung zwischen der Spitze der Masten und dem Sensor geringer als jene zwischen Sensor und Mastfuß. Bei dem Bildausschnitt A handelt es sich demnach um einen speziellen Fall des *Foreshortening* bzw. *Layover*. Ein Radarschatten wird dennoch nicht erzeugt. Ein Großteil der Radarstrahlung durchdringt die Masten aufgrund der Strebenbauweise. Bildausschnitt B wurde gewählt, um die Ursache der hellen Streifen auf einigen Feldern am Nordrand der E-SAR Szene zu klären. Diese sind jeweils etwa 45° zur Flugrichtung des Sensors ausgerichtet. Deren

Gestalt und Anordnung auf dem Feld legt den Verdacht nahe, dass sie aus der Feldbearbeitung durch schwere landwirtschaftliche Maschinen resultieren. Tiefe Traktorspuren könnten wie zweiflächige Cornerreflektoren wirken und hohe Rückstreuwerte verursachen. Dagegen spricht jedoch die Ausrichtung der Spuren von 45° zum Sensor. Außerdem ergab die polarimetrische Auswertung der Daten den Rückstreutyp Oberflächenstreuung ($\alpha < 10^\circ$), nicht *Double Bounce*. Die Erklärung dafür liegt im Reifenprofil der Maschine. Die etwa 10 cm breiten Lamellen sind im Winkel von 45° bzw. -45° zur Fahrtrichtung angeordnet. Somit ist ein Teil der Vertiefungen der Reifenspur parallel zur Flugrichtung des Sensors ausgerichtet. Der Abstand der Vertiefungen im Zusammenspiel mit deren Ausrichtung zum Sensor, einer Wellenlänge von 23 cm und dem passenden lokalen Einfallswinkel führt zur positiven Interferenz zwischen den Einzelstreuern innerhalb einer Auflösungszelle (Abb. 4.9). Die Bragg Rückstreukonditionen (Gl. 4.2) sind erfüllt (LEWIS 1998, RANEY 1998). Die vektorielle Addition der kohärenten Strahlung der Einzelstreuer ist konstruktiv. Im Bereich der Traktorspuren ist folglich kaum Speckle ausgebildet.

$$d_r = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} \quad 4.2$$

In der obigen Gleichung steht der Parameter d_r für den periodischen Abstand der Elementarstreuer in *Range*. Für n können ganze positive Zahlen eingesetzt werden. Demnach kann der Abstand zwischen den periodischen Reflektoren auch mit dem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge in Verbindung gebracht werden, um die Konditionen für Bragg-Streuung einzuhalten. Der Effekt schwächt sich allerdings mit steigendem n ab. Im X-Band tritt dieser Streifeneffekt nicht auf. Für die Wellenlänge von 3,125 cm existiert kein ganzzahliges Vielfaches, um auf ein passendes d_r für das Reifenprofil zu kommen. Diese Tatsache bestätigt die Annahme der Bragg-Streuung.

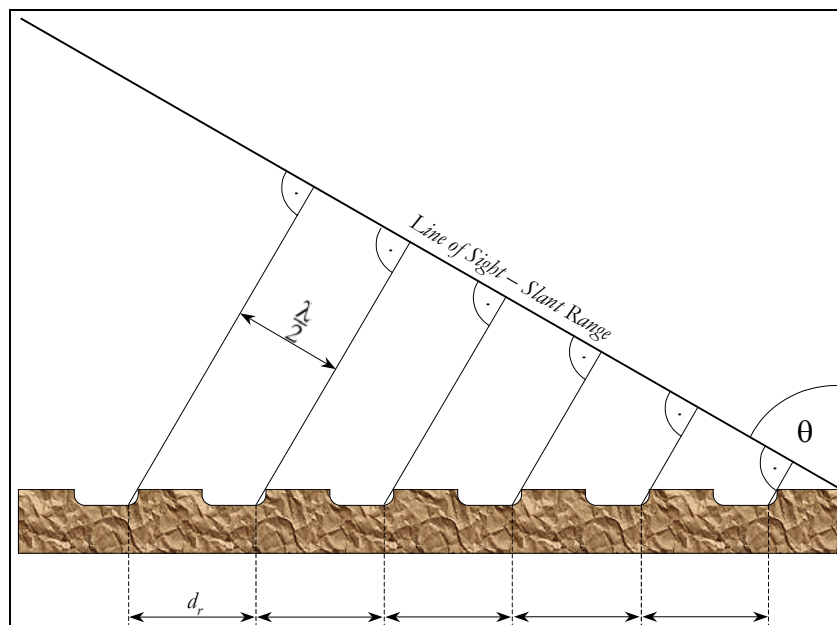


Abb. 4.9: Bragg Rückstreukonditionen, verändert nach RANEY (1998), S. 43

Bildausschnitt C zeigt den Alaunschiefersteinbruch inklusive Halde nordwestlich von Förthen. Der Steinbruch ist ca. 300 m breit und 20 m tief. Die ebene Sohle ist von steilen Wänden umgeben. Die Nordwand wird nicht von der Radarstrahlung erreicht und erzeugt somit kein Rückstreusignal. Sie liegt im Radarschatten. Die Südwand hingegen wird direkt beleuchtet. Dies führt zu einem sehr hohen Rückstreusignal. Dieses setzt sich aus Oberflächenstreuung direkt von der Wand und aus Doppelreflexion mit den Rück-

streupfaden Wand-Sohle und Sohle-Wand zusammen. Die Strecken der Rückstreupfade der Doppelreflexion übersteigen jene der direkten Oberflächenstreuung (vgl. Punkt 2.1.3). Im SAR-Bild wird dieser Rückstreuteil daher in *Range*-Richtung verschoben.

Abb. 4.10 beinhaltet weitere Bildausschnittvergrößerungen aus Abb. 3.5 Zur Demonstration der ausgezeichneten geometrischen Auflösung der SAR-Daten präsentiert Bildausschnitt D den Ort Läwitz einschließlich der Stallungen für Rindermast. Die Stallanlagen im oberen Bereich des Bildes sind deutlich zu erkennen. Innerhalb der Ortschaft können Häuser und Höfe ausgemacht werden. Selbst Einzelbäume an der Straße im Norden des Ausschnittes sind deutlich zu sehen.

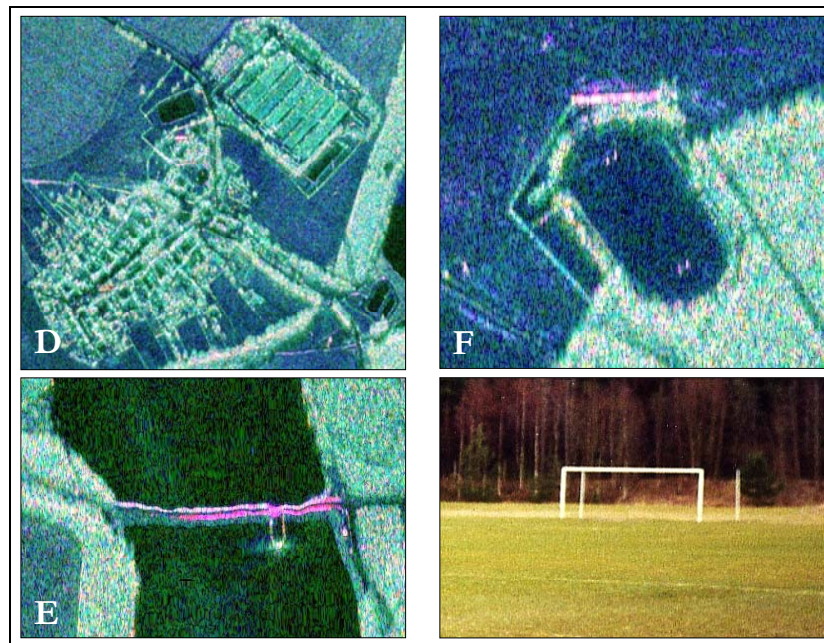


Abb. 4.10: Ausschnitte aus der E-SAR Szene und dazugehörige Geländeaufnahmen, Teil 2

Den Südteil der Zeulenrodatsperre bildet die durch einen Schotterdamm abgegrenzte Vorsperre Riedelmühle. Der Damm (Bildausschnitt E) ist befahrbar und von metallischen Leitplanken gesäumt. Die Leitbeplankung erzeugt vor allem in der HH-Polarisation ein hohes Rückstreusignal. An der südlichen Beplankung wird der Großteil der Rückstreuung durch *Double Bounce* über den Pfad Planke-Straße generiert. Im Gegensatz dazu ist an der Nordkante des Walls ein *Layover* der Oberflächenstreuung des Walls mit der Rückstreuung der Leitplanke erkennbar. Dadurch ist hier die Rückstreuintensität höher.

Im letzten Beispiel zeigt Bildausschnitt F ein Sportstadion im östlichen Bereich der Szene. Dieses ist deutlich an seiner ovalen Form zu erkennen. Außerdem treten im Bereich der Fußballtore je zwei Streuobjekte hervor, die sich durch *Double Bounce* auszeichnen. Dabei handelt es sich allerdings nicht um die Torpfosten, sondern um die hinter den Toren befindlichen Metallstangen (Tornetzhalterungen). Die Torkonstruktion als solche ist aus Holz und trägt somit kaum zur Radarrückstreuung bei.

4.1.2.2.2 Analyse der polarimetrischen Information

Nachfolgend werden die anhand der Dekompositionen berechneten Polarisationsparameter vorgestellt und erläutert. Dabei wird mit der Pauli-Dekomposition begonnen. Anschließend folgen die wichtigsten Polarisationsparameter der Cloude-Dekomposition. Dies sind Entropie, Alpha und Anisotropie.

Nach durchgeführter Berechnung der Pauli-Dekomposition wurden die Elemente des Pauli-Streuvektors hinsichtlich der Gesamtintensität des Vektors für eine bessere Interpretierbarkeit normiert. Dem Standard gemäß sind in Abb. 4.11 die Streuprozesse *Double Bounce*, Volumenstreuung und Oberflächenstreuung in den Farben Rot, Grün und Blau dargestellt. Bei der Darstellung der normierten Elemente des Pauli-Streuvektors gilt es zu beachten, dass deren Aussagekraft von der gesamten Rückstreuintensität dieses Vektors abhängig ist. In Bereichen sehr geringer Rückstreuintensität wird die Berechnung der Pauli-Streutypen durch Phasenrauschen beeinträchtigt, was in diesen Fällen eine Analyse verhindert.

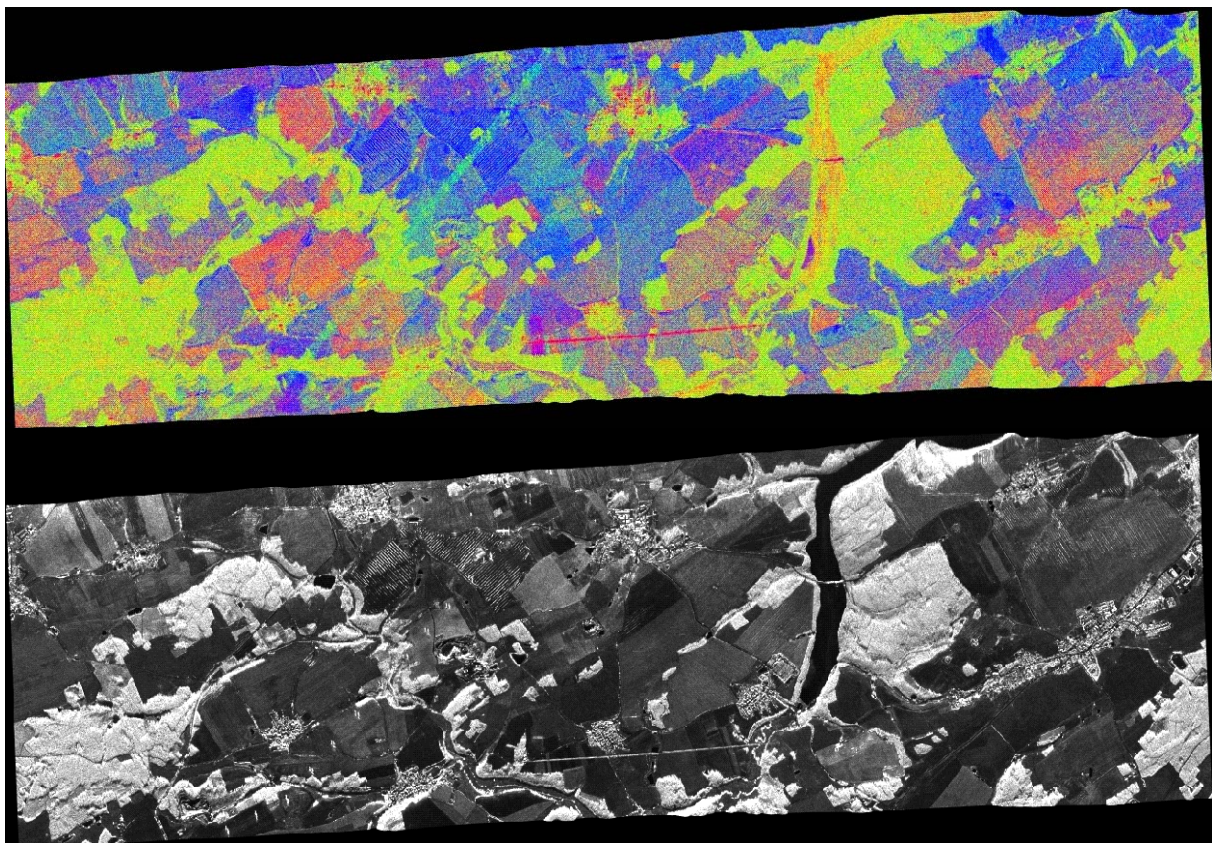


Abb. 4.11: Normierte Pauli-Rückstreutypen (oben) und Gesamtintensität des Paulivektors (unten)

In diesem Zusammenhang ist festzustellen, dass die Rückstreuintensität in *Range*-Richtung abnimmt. Dies trifft vor allem für glatte Areale mit vorherrschender Oberflächenstreuung zu. Obwohl sich innerhalb dieser Bereiche der Rückstreutyp nicht ändert, wirkt sich mit abnehmender Rückstreuintensität das Phasenrauschen auf den Pauli-Streutyp aus. Dies zeigt sich dadurch, dass sich im *Near-Range* Bereich ein höherer Flächenanteil durch Oberflächenstreuung (blau) auszeichnet, als in *Far-Range*. Dieser Effekt ist (vor allem in *Far-Range*) auch innerhalb einzelner Felder zu beobachten. Diese Beobachtungen decken sich jedoch nicht mit dem anhand der Landnutzung zu erwartenden Rückstreutyp. Zudem sagen die Rauheitskriterien (Punkt 2.3.1.1) vorher, dass eine Oberfläche mit zunehmendem lokalen Einfallswinkel (*LLA*) glatter erscheint. Dennoch tendiert mit steigendem *LLA* der Rückstreutyp für glatte Oberflächen Richtung *Double Bounce*.

Wasserflächen (ohne Windeinfluss) besitzen die geringste Rückstreuintensität. Obwohl hier mit Sicherheit Oberflächenstreuung stattfindet, wurde beispielsweise für die Talsperre Volumenstreuung oder *Double Bounce* hergeleitet. In diesem Fall wird der Großteil der einfallenden Mikrowellenstrahlung vom Sensor fort reflektiert, der gemessene Phasenverlauf beinhaltet lediglich Systemrauschen.

Für den Großteil der RGB-Komposite in Abb. 4.11 ist trotz alledem eine Interpretation des Pauli-Rückstreutyps zulässig. So heben sich Waldflächen deutlich durch grüne Farbtöne (Volumenstreuung)

hervor. An Waldkanten sowie innerhalb einiger Waldabschnitte tritt zusätzlich *Double Bounce* auf. Ein ähnliches Bild ergibt sich für Siedlungen. Die Volumenstreuung kommt hier einerseits durch die Begrünung mit Bäumen zustande. Andererseits ist zu beachten, dass das dritte Element des Pauli-Vektors lediglich als Volumenstreuung interpretiert wird. Tatsächlich handelt es sich um die Rückstreuung von zweiflächigen Cornerreflektoren mit einem horizontalen Neigungswinkel von 45° . Derartige Reflektorarrangements sind innerhalb von Siedlungen denkbar. Ferner treten an den dem Sensor zugewandten Hauswänden starke Doppelreflexionen auf. Diese sind wesentlich ausgeprägter als jene an den Waldkanten.

Die Art der Rückstreuung agrarisch genutzter Flächen ist von deren Oberflächenrauigkeit und Bewuchs abhängig. Sehr glatte unbewachsene Felder sind durch eine dominierende Oberflächenstreuung zu erkennen. Mit steigender Rauigkeit tendiert der Pauli-Rückstreutyp Richtung Volumenstreuung. Winterrapsfelder sind durch den Rückstreutyp für *Double Bounce* gekennzeichnet. Trotz des frühen Wachstadiums besitzen die Pflanzen offenbar bereits die für *Double Bounce* notwendigen Dimensionen.

In der folgenden Abb. 4.12 werden für einen geringfügig reduzierten Bildausschnitt die anhand der Decomposition nach Cloude ermittelten Polarisationsparameter Alpha (α), Entropie (H) und Anisotropie (A) präsentiert. Wie in Punkt 2.2.2.5 vorgestellt, beinhalten H und A Informationen über die Verteilung der Streumechanismen, während α den Rückstreutyp bezeichnet.

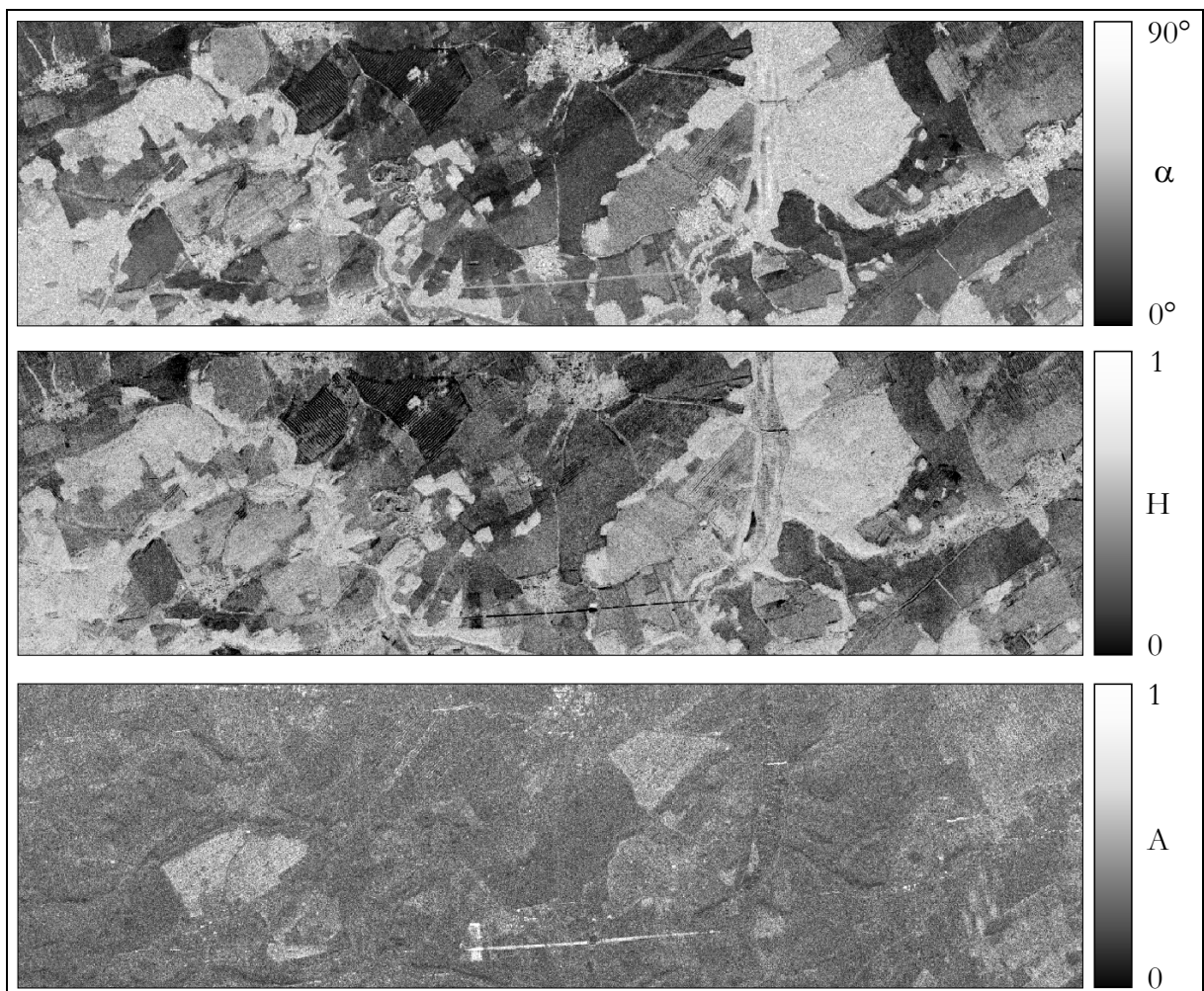


Abb. 4.12: Polarisationsparameter nach Cloude: Alpha (α), Entropie (H) und Anisotropie (A)

Aufgrund der Tatsache, dass α nicht den einzigen, sondern den entsprechend der Rückstreuanteile der einzelnen Streuprozesse gewichteten mittleren Streumechanismus repräsentiert, ist die Interpretation dieses Parameters nur in Verbindung mit den Größen H und \mathcal{A} möglich. Ausschließlich für den Fall, dass eine Entropie nahe Null berechnet wurde, ist der Rückstreutyp sicher interpretierbar. Dies trifft in erster Linie auf glatte Oberflächen in *Near-Range* zu. Hier besitzt α Werte nahe 0° bei einer sehr niedrigen Entropie. Es handelt sich demnach um isotropische ungeradzahlige Rückstreuung. Diese kann als Oberflächenstreuung (isotropische Einfachstreuung) interpretiert werden. Aufgrund der sehr niedrigen Entropie (es dominiert ein einziger Streuprozess) beinhaltet die Anisotropie keine zusätzliche Information.

Wasserflächen sind in der Theorie ebenfalls reine Oberflächenstreuer. Bei Betrachtung der Abb. 4.12 fällt jedoch auf, dass im Bereich der Trinkwassertalsperre Zeulenroda eher hohe Werte für α und H festzustellen sind. Hier kommt erneut der Einfluss des Phasenrauschens zur Geltung. Analog zur Pauli-Dekomposition sind die Polarisationsparameter nach Cloude für Areale sehr geringer Rückstreuung nicht interpretierbar.

Mit steigender Rauigkeit der agrarischen Nutzflächen oder mit Zunahme der Vegetation ändern sich die Werte der Polarisationsparameter. Die Werte für α liegen dann zwischen 0° und 45° und entsprechen somit anisotropischer ungeradzahliger Rückstreuung. Bei unbewachsenen Feldern handelt es sich dabei um anisotropische Einfachstreuung. Die Entropie besitzt im Vergleich zu glatten Feldern leicht erhöhte Werte. Demnach ist zumindest ein weiterer Streuprozess beteiligt. Diese Art der Rückstreuung entspricht der Oberflächenstreuung mit einem Volumenstreuanteil der Pauli-Dekomposition. Auch hier liefert \mathcal{A} kaum zusätzliche Informationen. Eine Ausnahme bilden erneut die mit Winterraps bestandenen Felder. Hier wurde ein mittlerer Alpha-Winkel von 45° berechnet, was Dipolstreuung bedeuten würde. Allerdings weisen die hohen Werte für Entropie (0,7) und Anisotropie (0,6) darauf hin, dass alle drei Streuprozesse zu großen Anteilen im mittleren Streumechanismus enthalten sind. Aus deren Anteilen berechnet sich schließlich der mittlere Alpha-Winkel. Als anteilige Streuprozesse kommen anisotropische geradzahlige Einfachstreuung, anisotropische ungeradzahlige Streuung oder auch Oberflächenstreuung in Frage. Ähnliches gilt für das trapezförmige Feld südöstlich von Tegau (im Norden der Szene, Bildmitte). Dieses ist mit Feldgras bestanden und hebt sich ebenfalls durch eine hohe Anisotropie von der Umgebung ab. Im Unterschied zu den Winterrapsfeldern besitzt es dennoch einen dominanten Streumechanismus, die Entropie ist mit 0,4 vergleichsweise gering. Der niedrige Wert für α (26°) deutet darauf hin, dass von den in Frage kommenden Streuprozessen die Oberflächenstreuung den Hauptanteil ausmacht.

In Wald kommen alle Streuprozesse zu fast gleichen Anteilen vor ($H = 0,8$). Dies äußert sich auch in einem niedrigen Wert für \mathcal{A} . Eine Interpretation des mittleren Rückstreumechanismus ist demnach problematisch. Zu erwarten sind anisotropische Mehrfachstreuung (geradzahlig sowie ungeradzahlig) als auch *Double Bounce* (isotropische geradzahlige Streuung). Ein α von 50° bestätigt diese Annahme.

Eine ähnliche Zusammensetzung des mittleren Rückstreumechanismus ist für Siedlungen zu erwarten. Allerdings sollte der *Double Bounce* Anteil höher sein als für Wald. Des Weiteren sind in Siedlungen Bereiche mit Oberflächenstreuung zu finden. Die Zahlenwerte für α und H liegen geringfügig höher als jene für Wald. Innerhalb der Siedlungen sind einige Areale mit explizit vorherrschendem *Double Bounce* zu finden. Für diese Bereiche liegt der Zahlenwert für α mit 70° deutlich über dem Mittel für Siedlungen. Die Dominanz dieses Streuprozesses wird durch die geringe Entropie von 0,1 bestätigt. Den geringen restlichen Anteil der Rückstreuung teilen sich zwei Streuprozesse zu fast gleichen Portionen ($\mathcal{A} = 0,8$).

Am südlichen Bildrand verläuft etwa in der Mitte der Szene ein auffälliger Streifen mit einer hohen Rückstreuintensität. Dieser steht mit einer weiteren das Untersuchungsgebiet durchziehenden Hochspannungsüberlandleitung in Verbindung. Drei Überlandkabel werden hier von Holzmasten getragen. Die Leitungen verlaufen für ca. 2,4 km exakt parallel zur Flugrichtung des Sensors. Nur innerhalb dieser Strecke sind sie im SAR-Bild sichtbar. Die Analyse der Polarisationsparameter ergab für α einen Wert von 45° , die Entropie geht gegen Null ($H = 0,03$). Demnach besitzt die Anisotropie keine interpretierbare Information. Der

dennoch recht hohe \mathcal{A} -Wert resultiert aus dem identischen Phasenrauschen, das den zweiten und dritten Streuprozess dominiert. Der Wert für α bedeutet Dipolstreuung. Da es sich hierbei um den einzigen Rückstreuprozess handelt, kann α direkt interpretiert werden. Der Dipol in Form der Leitung ist exakt zur Schwingungsebene des elektrischen Feldvektors der EM Welle ausgerichtet. Dies bestätigt sich zusätzlich dadurch, dass die Hochspannungsleitung lediglich in der HH-Polarisation zu sehen ist.

Ein visueller Vergleich des Alpha-Winkels mit der Entropie in Abb. 4.12 deutet darauf hin, dass beide Parameter nicht vollständig unabhängig voneinander sind. Bis auf wenige Ausnahmen zieht ein großer Alpha-Winkel auch eine hohe Entropie nach sich. Dieser Zusammenhang ist anhand einiger zufällig ausgewählter Punkte in Abb. 4.13 dargestellt.

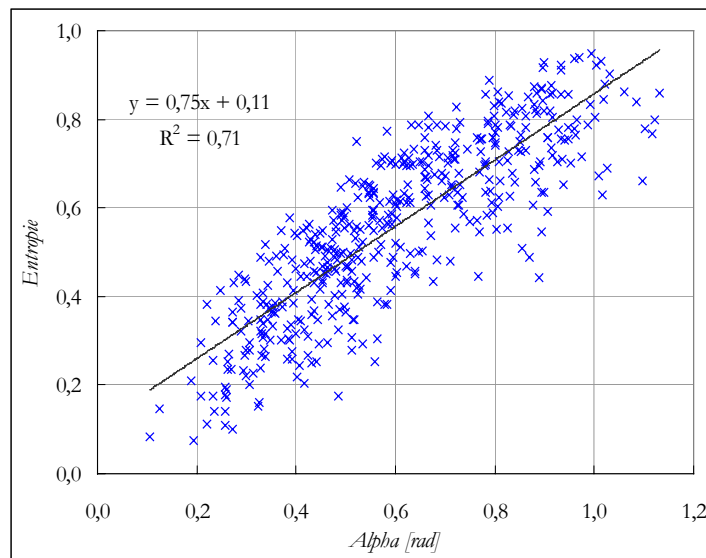


Abb. 4.13: Korrelation zwischen Alpha & Entropie

Die Ursache für diese klare Korrelation ist, dass α nicht den einzigen, sondern den entsprechend der Rückstreuantteile der einzelnen Streuprozesse gewichteten mittleren Streumechanismus repräsentiert. Glatte vegetationsarme Flächen sind stets durch eine dominierende Oberflächenstreuung, d.h. niedrige Werte für α und H gekennzeichnet. Mit zunehmender Rauigkeit oder Vegetation wächst die Zahl der an der Rückstreuung beteiligten Prozesse. Außerdem steigt α . Komplexe Streuer wie Bäume sind durch eine Vielzahl gleichwertiger Streuprozesse gekennzeichnet. Zudem wird durch die Beteiligung anisotroper Mehrfachstreuung und *Double Bounce* am Rückstreuprozess ein hoher α -Wert erreicht.

Ausnahmen bezüglich des Zusammenhangs zwischen α und H bilden Streuobjekte, die trotz ihrer Komplexität und eines hohen α -Wertes nur einen dominanten Streuprozess generieren. Dies sind zumeist künstliche Ziele (*Double Bounce* an Hauswänden, Dipolstreuung an Hochspannungsleitungen).

4.1.2.2.3 Analyse des interferometrischen Höhenmodells

Eine Besonderheit des interferometrischen Digitalen Höhenmodells besteht darin, dass es nicht unbedingt die Geländeoberkante verkörpert. Da das X-Band kaum in Medien eindringt, befindet sich das Streuzentrum direkt an der Grenzschicht zwischen Luft und Medium. Dies gilt auch für Vegetation. Somit stellt das Höhenmodell die Oberkante der vorhandenen Vegetation (z.B. Wald) oder auch von Gebäuden dar. Für

hydrologische Anwendungen ist allerdings zumeist die Geländeoberkante von Interesse. Ein weiteres Problem ergibt sich für Bereiche mit unzureichender Rückstreuintensität. Die gemessene Phase, welche für die Erstellung interferometrischer Höhenmodelle essentiell ist, basiert hier zum Großteil auf Phasenrauschen. Im X-Band beschränken sich diese Bereiche auf Wasserflächen. Da die Aufzeichnung des interferometrischen Datensatzes im *Single Pass* Modus erfolgte, treten kaum Dekorrelationsprobleme auf.

Abb. 4.14 präsentiert das interferometrische Höhenmodell als Draufsicht mit Relief-Schummerung und als dreidimensionale Ansicht. Die oben angesprochenen Phänomene sind offensichtlich. Die Oberfläche der Talsperre Zeulenroda ist nicht glatt sondern fälschlicherweise durch ein starkes Relief geprägt. Wälder heben sich durch ihre zusätzliche Höhe von der Umgebung ab. Ebenfalls zu erahnen sind einzelne Gebäude innerhalb der Siedlungen. Ackerbaulich genutzte Areale fallen durch ihre glatte Oberfläche ins Auge. Für die Darstellungen wurde das Höhenmodell mit einem Mittelwertfilter bearbeitet. Auf diese Weise wurde das für interferometrische Höhenmodelle typische Rauschen reduziert. Im Bereich der Talsperre traten aufgrund des Phasenrauschens zuvor Höhenschwankungen von ca. 300 m auf. Eine sinnvolle Darstellung war damit nicht gegeben.

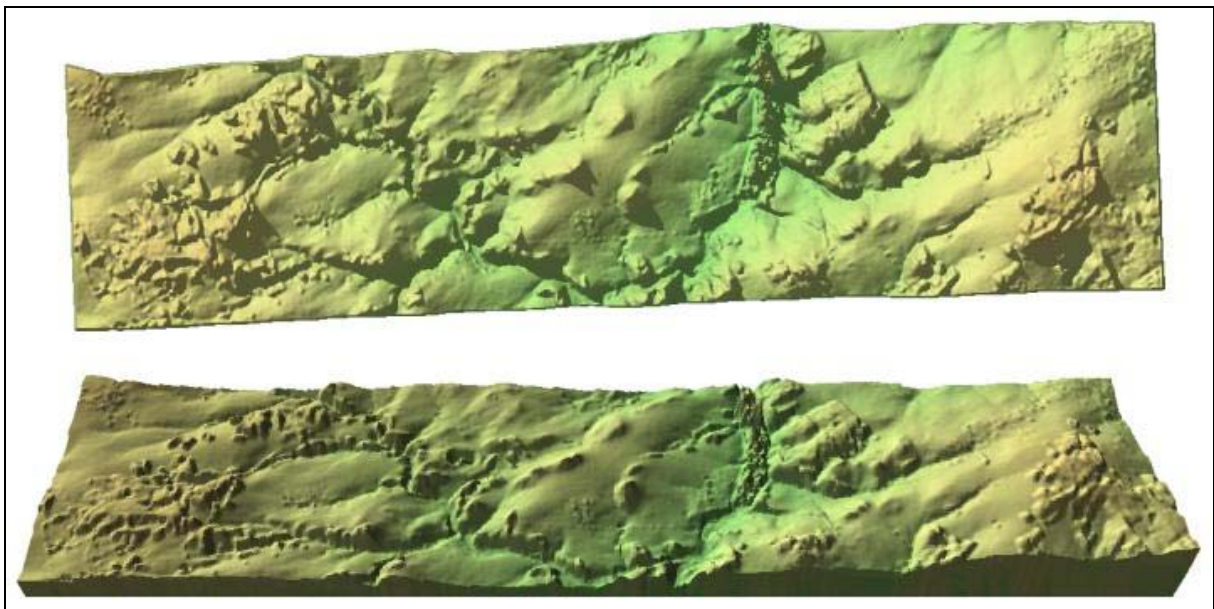


Abb. 4.14: Interferometrisches DHM, 3D-Ansicht 3-fach überhöht

Um die Genauigkeit des Modells bezüglich der Baumhöhen zu validieren, wurde im Gelände an einigen Waldkanten die Baumhöhe mittels trigonometrischer Verfahren vermessen. Die Auswahl der Waldkanten erfolgte unter Berücksichtigung einer ausreichenden Baumdichte, der scharfen Abgrenzung des Waldes von der Umgebung, der Baumart sowie der ausreichenden Dimensionen des Waldstückes. Außerdem sollte ein möglichst breites Höhenspektrum erreicht werden. Auf dieser Basis wurden 12 Messplätze bestimmt. Die gewählten Waldkanten wurden anschließend im DHM lokalisiert. Um eine klare Höheninformation für die Bäume als auch für die Referenzhöhe vor der Waldkante zu erhalten, muss ein Mindestabstand zwischen beiden Messpunkten eingehalten werden. Mischpixels, die sich über den Bereich der Waldkante erstrecken, repräsentieren weder Baum- noch Geländereferenzhöhe. Fehler aufgrund einer Höhendifferenz zwischen der Geländehöhe vor dem Wald und jener unter Wald wurden bei dieser Untersuchung vernachlässigt. Diese Vorgehensweise wird durch die Lage der Messpunkte (ebenes Terrain) gerechtfertigt.

Anhand der Abb. 4.15 wird der Zusammenhang zwischen den Baumhöhen aus Geländemessungen und jenen aus dem interferometrischen Höhenmodell demonstriert. Die Korrelation kann anhand der linearen

Gleichung der Trendlinie sehr gut erfasst werden. Der Anstieg der Geraden verläuft zudem parallel zur 1:1 Linie. Somit ergibt sich aus der Trendgleichung, dass alle interferometrischen Messungen etwa um 2 m geringere Werte ergeben haben, als die Geländemessungen. Die Erklärung hierfür ist in den unterschiedlichen Messprinzipien zu suchen. Während bei der Geländeaufnahme die Baumspitzen als Referenz angenommen wurden, liegt das mittlere X-Band Streuzentrum für Wald niedriger. Ein Teil der Rückstreuung wird zwar an den Baumspitzen generiert, andere Teile dafür im Kronendach zwischen zwei Bäumen. Bei einer Zellengröße von 25 m² muss sich demnach ein Höhenwert ergeben, der niedriger ist als die mittlere Höhe der einzelnen Bäume. Unter diesem Gesichtspunkt kann von einer exzellenten Erfassung der Baumhöhen im DHM gesprochen werden.

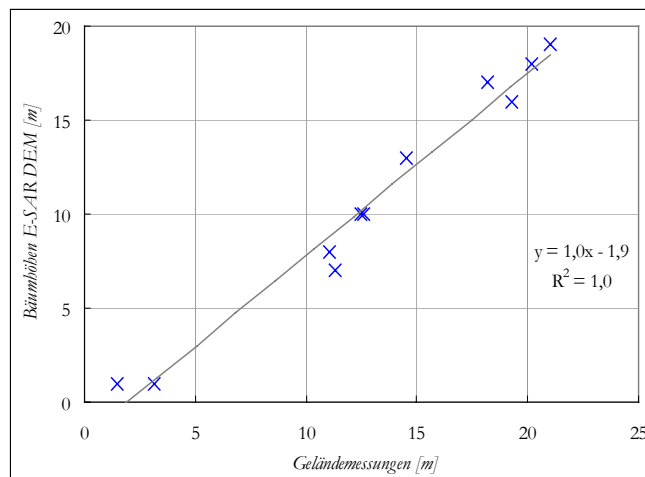


Abb. 4.15: Validierung der Baumhöhen des Interferometrischen DHM

4.2 Klassifikation der Landbedeckung

Eine hydrologisch orientierte Auswertung der SAR-Daten schließt die Klassifikation der Landbedeckung ein. Die Landbedeckung ist je nach Modellansatz eine der entscheidendsten Grundlagen für die hydrologische Modellierung. Offenkundig ist, dass die Klassifikation den Zustand der Landoberfläche eines bestimmten Zeitpunktes fixiert. Die Klassentiefe muss sich demnach an der Aufgabenstellung der Modellierung orientieren. Steht für eine mehrjährige Modellierung nur ein Fernerkundungsdatensatz zur Verfügung, ist für die Wahl der Klassen deren zeitlicher Bestand zu berücksichtigen. Ackerbaulich genutzte Flächen beispielsweise sind in der Regel jedes Jahr mit anderen Feldfrüchten bestanden, während Gewässer, Siedlungen oder Wälder bezüglich ihrer Verortung eine höhere Stabilität aufweisen. Demzufolge kann es für eine mehrjährige hydrologische Modellierung sinnvoll sein, eine zusammenfassende Klasse „Ackerland“ zu bilden, anstelle alle Feldfrüchte separat auszuweisen. Für die ereignisbezogene Modellierung hingegen sind Art und Verteilung der Feldfrüchte relevant.

Unter Berücksichtigung dieser Überlegungen werden im Folgenden verschiedene Klassifikationsergebnisse vorgestellt. Zwar ist die Landbedeckungsklassifikation nicht Schwerpunkt dieser Arbeit, dennoch soll das Potenzial polarimetrischer Daten hinsichtlich dieser Anwendung abgeschätzt werden. Letztlich ist nicht allein entscheidend, welche Klassen benötigt werden, sondern auch, ob eine Trennbarkeit dieser Klassen besteht. Mit dieser Thematik hat sich zwar bereits eine Reihe von Autoren befasst (LEE et al. 1994, PALUBINSKAS et al. 1995, SERPICO & ROLI 1995, DU & LEE 1996, CLOUDE & POTTIER 1997, HELLMANN 2000 etc.). Allerdings steht bei diesen Untersuchungen die Validierung einzelner Radarparameter (Intensitäten, Polarisationsparameter, Kohärenz, Textur) im Hinblick auf die Klassentrennbarkeit im Vordergrund. In dieser Arbeit wird versucht, durch integrative Verwendung sämtlicher zur Verfügung stehender Informationen ein qualitativ hochwertiges Klassifikationsergebnis zu liefern. Dieser Abschnitt besitzt daher nutzerorientierten Charakter.

Als objektives Kriterium für die Trennbarkeit zweier Klassen mittels eines Radarparameters wird die *Jeffries-Matusita* Distanz zu Rate gezogen. Das Klassifikationsergebnis beinhaltet diesbezüglich eine zu große subjektive Komponente. Die Klassifikation der Daten erfolgte nach verschiedenen Ansätzen. Es kamen sowohl pixelbasierte unüberwachte (*Isodata-Clustering*) als auch überwachte (*Maximum-Likelihood*) Standardverfahren zum Einsatz. Die Ableitung der Landbedeckungsklassen erfolgte dabei hierarchisch in mehreren Ebenen (Levels). Die Basisklassen bilden jeweils die Mischklassen „Siedlung/Wald“, „Wasser/Schatten“ und „Keine/Niedrige Vegetation“. Zum anderen wurde der pixelbasierte *Fuzzy Logic* Ansatz von HELLMANN (2000) validiert. Das durch die Datenbearbeitung erlangte *a priori* Wissen in Bezug auf typische Schwellenwerte aller Radarparameter für die unterschiedlichen Klassen wird schließlich zu einem allgemeingültigen Schema für die Klassifikation polarimetrischer SAR-Daten zusammengefasst.

4.2.1 Pixelbasierte Klassifikation anhand von Standardverfahren

4.2.1.1 Klassifikation auf Basis der Radarintensitäten

Die Klassifizierung auf Basis der Radarintensitäten fand in Anlehnung an DOBSON et al. (1995) in zwei Levels statt. Im ersten Level wurden die Mischklassen „Siedlung/Wald“, „Wasser/Schatten“ und „Keine/Niedrige Vegetation“ ausgewiesen. Diese Separation erfolgte unüberwacht mittels *Isodata-Clustering* anhand aller hinsichtlich des lokalen Einfallswinkels normierten sowie specklegetfilterten (*Gamma Map*, Fenstergröße 5×5) Intensitäten. Die Bildung dieser Klassen ist praktisch fehlerfrei.

Im zweiten Level erfolgte in getrennten Arbeitsschritten die weitere Untergliederung der Mischklassen „Siedlung/Wald“ und „Keine/Niedrige Vegetation“. In beiden Fällen wurde eine überwachte Klassifikation durchgeführt. Zur Unterteilung der Klasse „Keine/Niedrige Vegetation“ in die Unterklassen Acker- und Grünland wurden ausschließlich die X-Band-Intensitäten verwendet. Die Grasvegetation absorbiert bzw. zerstreut bei dieser Frequenz einen Großteil der eintreffenden Radarstrahlung. Daher fallen diese Flächen durch eine geringe Rückstreuung ins Auge. Zudem besitzt die spärliche März-Vegetation im L-Band nur wenig Einfluss auf die Rückstreuung, sodass der Rückstreuprozess in erster Linie von Rauigkeit und Bodenfeuchte bestimmt wird.

Die Trennung von Siedlung und Wald allein auf Basis der Intensitäten ist aufgrund der ähnlichen spektralen Signaturen der Intensitäten nicht möglich. Daher wurde die Texturinformation einbezogen. Die mittlere Euklidische Distanz erwies sich als geeigneter Parameter. Die Fenstergröße von 10×10 Pixel stellte den besten Kompromiss zwischen optimaler Erfassung der Siedlungstextur bei gleichzeitigem Erhalt von Details dar. Für die Texturberechnung wurden die L-Band-Intensitäten sowie ein Differenzbild aus L-HH und L-HV herangezogen. Anschließend erfolgte die Anwendung eines 10×10 Minimum-Filters zur Reduzierung hoher Texturwerte an Landnutzungsgrenzen. Schlussendlich wurde die Information der vier Texturbilder durch Mittelwertbildung in einem Bild zusammengefasst (Abb. 4.16). Dunkle Grauwerte stehen für einen hohen Texturwert, helle Bildbereiche bedeuten geringe Textur. Deutlich heben sich Siedlungen durch ihre hohe Textur von der Umgebung ab. Ausnahmen bilden die von Bragg-Streuung dominierten Felder am Nordrand der Szene sowie die Hochspannungsleitung im Süden. Das Ziel, nämlich die klare Entmischung der Doppelklasse „Siedlung/Wald“, konnte unter Einbeziehung der Textur erreicht werden. Texturwertüberschneidungen mit anderen Klassen sind dafür irrelevant.

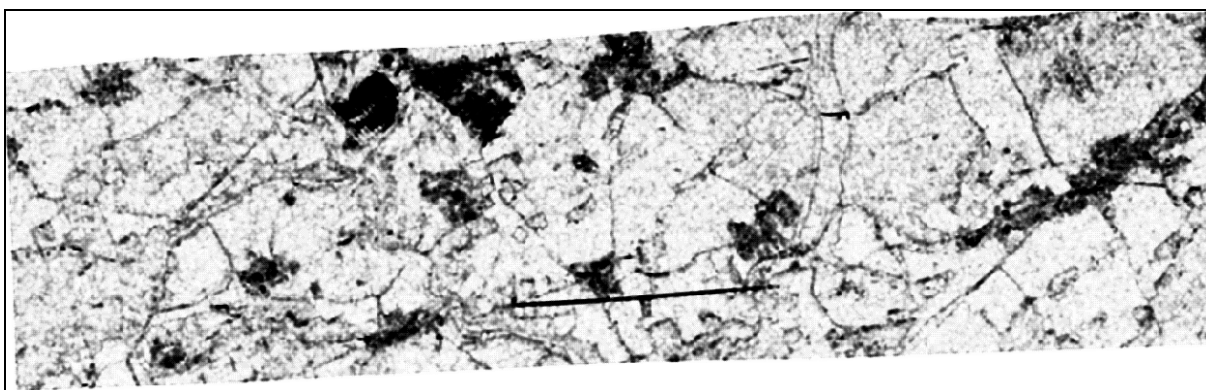


Abb. 4.16: Mittlere L-Band Textur der E-SAR Szene

Anhand der üblichen Nachbearbeitungsschritte konnte das Klassifikationsergebnis verbessert werden. Zu diesen Schritten zählen das Zurückweisen unsicher klassifizierter Pixels sowie eine allgemeine Filterung des Klassifikationsergebnisses mit einem *Majority*-Filter. Vor allem der zweite Schritte ist bei Klassifikationen von Radardaten unumgänglich. Trotz umfassender Speckle-Filterung bleiben Residuen des Speckle erhalten und pausen sich auf das Klassifikationsergebnis durch.

Die Landbedeckungskarte als Ergebnis des Klassifikationsprozesses wird in Abb. 4.17 demonstriert. Die fünf Klassen „Wasser/Schatten“, „Siedlung“, „Wald“, „Ackerland“ und „Grünland“ sind intuitiv in den Farben Blau, Rot, Dunkelgrün, Braun und Hellgrün kodiert. Die entsprechende Validierung der Genauigkeit dieser Karte ist in Tab. 4.1 festgehalten. Die ausgezeichnete Gesamtgenauigkeit von 96% belegt die Eignung des Datensatzes für eine Klassifikation der Landbedeckung. Der Grundstein für diese hohe Genauigkeit wurde im Klassifikationslevel I (siehe oben) gelegt.

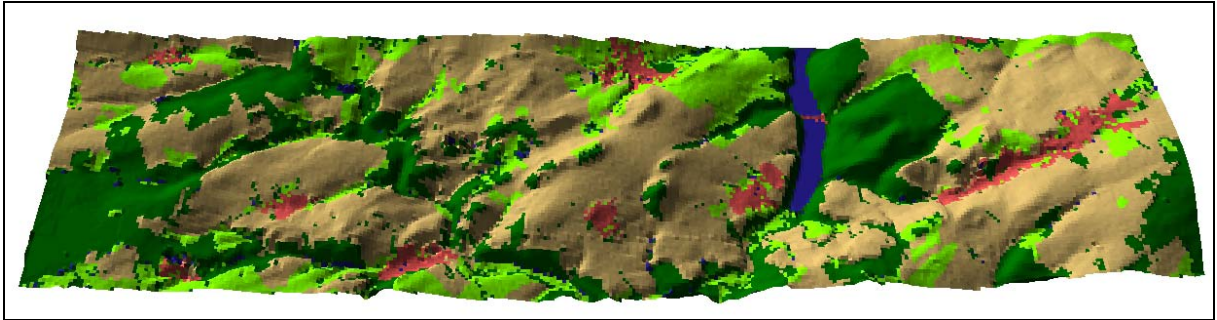


Abb. 4.17: 3D-Darstellung der Landbedeckungsklassifikation aus Intensitäten
(Höhe aus LVA-DGM, 5-fach überhöht)

Besonders akkurat erfolgte die Abbildung der Klassen „Wasser/Schatten“, „Wald“ sowie „Ackerfläche“. Als problembehaftet kann die Ausweisung der Grünlandflächen angesehen werden. Offenbar besitzt hier das X-Band keine ausreichende Aussagekraft. Zudem bestehen im März große Gemeinsamkeiten zwischen Grünland und Anbaufrüchten wie Feldgras oder Wintergetreide. Dennoch ist anzunehmen, dass die Verfügbarkeit von C-Band-Daten eine bessere Trennung von Grünland und Ackerland ermöglicht hätte.

	<i>Producers accuracy</i> [%]	<i>Users accuracy</i> [%]	Flächenanteil [%]
Siedlung	93,98	81,25	3,86
Wald	98,99	99,68	27,40
Wasser/Schatten	95,71	98,98	1,87
Grünland	89,26	73,10	16,52
Ackerfläche	95,81	98,29	50,35
			100,00
Gesamtgenauigkeit	96,11%	Kappa Koeffizient	0,93

Tab. 4.1: Genauigkeitsbetrachtung der Landbedeckungsklassifikation

Die 3D-Darstellung der Landbedeckungsklassifikation verdeutlicht die Abhängigkeit der Landbedeckung von der Topographie. Siedlungen sind zumeist in Niederungen zu finden, Wälder befinden sich häufig an geneigten Hängen, auf Kuppen oder an Bachläufen und Ackerflächen wurden auf ebenem Gelände angelegt. Grünland ist entweder in Siedlungsnähe oder in ackerbaulich weniger geeigneten Bereichen (z.B. Auen) zu finden.

4.2.1.2 Klassifikation unter Einbeziehung der Polarisationsparameter

Für diese Klassifikation wurden neben den Intensitäten ebenfalls die Polarisationsparameter der Cloude-Dekomposition zu Rate gezogen. Dies sind die drei Eigenwerte (λ_{1-3}), die Entropie (H), die Anisotropie (A), die drei Alpha-Winkel (α_{1-3}) sowie der mittlere Alphawinkel. Da diese Parameter z.T. stark verrauscht waren, wurden sie entsprechend gefiltert. In Tab. 4.2 werden Filter und Fenstergrößen für die jeweiligen Polarisationsparameter dargelegt. Der Filterprozess erfolgte in zwei Durchgängen. Im ersten Abschnitt wurde der *Gamma Map* Filter verwendet, im zweiten Schritt erfolgte eine weitere Homogenisierung durch einen Mittelwertfilter. Die Eigenvektoren repräsentieren die Rückstreuintensität des jeweiligen Rückstreuprozesses. Sie sind am wenigsten verrauscht. Immens inhomogen sind hingegen die Alpha-Winkel, die aus Phasenparametern hervorgehen und demzufolge Phasenrauschen beinhalten. Dies trifft ebenfalls auf die Anisotropie zu, die aus den beiden niedrigsten und demnach stör anfälligen Eigenwerten (Systemrauschen, Phasenrauschen etc.) hervorgeht.

Parameter	1. <i>Gamma MAP</i>	2. <i>Mean</i>
a_1	10×10	6×6
a_2	10×10	6×6
a_3	10×10	6×6
a	10×10	6×6
λ_1	4×4	5×5
λ_2	4×4	5×5
λ_3	4×4	5×5
H	6×6	4×4
A	10×10	5×5

Tab. 4.2: Angewandte Filter und Fenstergrößen für die Homogenisierung der Polarisationsparameter

Die Klassifikation erfolgte erneut in zwei Levels. Für Level 1 wurden die Ergebnisse aus Punkt 4.2.1.1 herangezogen. Unter Einbeziehung der Polarisationsparameter konnten im zweiten Level die Mischklassen „Siedlung/Wald“ und „Keine/Niedrige Vegetation“ besser getrennt werden, als ohne deren Verwendung. Überdies erhöhte sich die Zahl der trennbaren Klassen. Wie oben ist der überwachte *Maximum Likelihood* Klassifikator verwendet worden. Die Klasse „Keine/Niedrige Vegetation“ wurde unter Verwendung der L-Band Intensitäten und Polarisationsparameter in die Unterklassen „Winterraps“, „Grünland/Feldgras“ (hier L-Band anders als X-Band), „Wintergetreide“, „Gepflügte Felder“ und „Saatbeet“ separiert. Die Mischklasse „Grünland/Feldgras“ ergibt sich aus der analogen Ausprägung beider Nutzungen. Anhand der L-Band-Daten sind diese nicht trennbar.

Jede Unterklasse wurde in einem gesonderten Arbeitsschritt abgetrennt. Dieser Schritt erfolgte jeweils anhand der geeignetsten SAR-Parameter. Für die Separation der Klasse „Gepflügte Felder“ beispielsweise boten die SAR-Parameter a , a_1 und L-HV die beste Trennbarkeit. Die Signaturen dieser Parameter zeigten verglichen mit anderen Klassen deutliche Unterschiede. Anzumerken bezüglich der Aufspaltung der Klasse „Keine/Niedrige Vegetation“ ist wie oben (Punkt 4.2.1.1), dass die spärliche Vegetation (ausgenommen Winterraps) im März nicht primär verantwortlich für die unterschiedlichen Rückstreusignaturen der verschiedenen Klassen sein kann. Vielmehr wird das Rückstreusignal im L-Band (und so die Ausprägung der Polarisationsparameter) von der Oberflächenrauhigkeit gesteuert. Der Umstand, dass die entsprechende Landnutzungsklasse mit einer bestimmten Rauhigkeit assoziiert werden kann, lässt trotzdem eine Klassifikation auf Basis der L-Band-Daten zu.

Für die Trennung von „Siedlung“ und „Wald“ wurden wie oben Texturinformationen einbezogen. Zudem bieten die Polarisationsparameter einen weiteren wertvollen Input für diesen Klassifikationsschritt. Während Waldflächen im L-Band primär Volumenstreuung aufweisen, ist *Double Bounce* für Siedlungen typisch. Die Trennung von „Siedlung“ und „Wald“ auf alleiniger Basis der Polarisationsparameter führte zu einem gleichwertigen Ergebnis wie dieser Schritt unter alleiniger Verwendung der Texturinformation. Die Klassifikationsgenauigkeit betrug in beiden Fällen über 80%. Durch die Kombination der Polarisationsparameter und der Textur konnte letztlich die Klassentrennbarkeit weiter gesteigert werden.

Schließlich fand unter Verwendung aller Polarisationsparameter und Intensitäten die Ausweisung zweier Waldklassen statt. Dies sind die im Befliegungsstreifen zu findenden „Schonungen“ (Aufforstungen) und die restlichen Forstbestände. Dabei handelt es sich fast ausschließlich um Nadelwald.

Abb. 4.18 präsentiert eine 3D-Darstellung der Landbedeckungsklassifikation unter Einbeziehung der Polarisationsparameter. Ein wesentlicher Unterschied im Vergleich zu Abb. 4.17 ist die Untergliederung der Klasse „Ackerfläche“. Zu beachten ist ebenfalls, dass die neue Mischklasse „Grünland/Feldgras“ in der vorherigen Klassifikation nicht existiert. Ein direkter Vergleich zwischen dieser Klasse und der Klasse „Grünland“ ist nicht zulässig. Eine weitere Aufspaltung der Mischklasse anhand der X-Band-Daten wäre zwar prinzipiell möglich gewesen, dennoch wurde aufgrund der nur mäßigen Ergebnisse aus Punkt 4.2.1.1 darauf verzichtet.

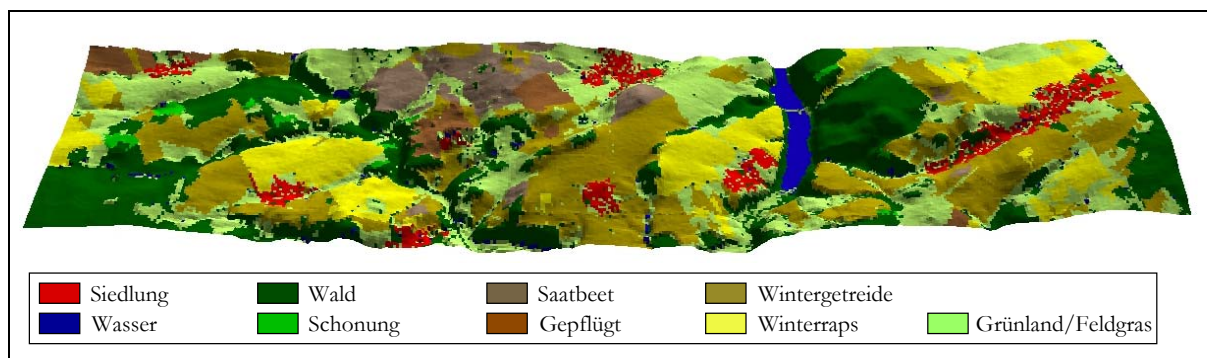


Abb. 4.18: 3D-Darstellung der Landbedeckungsklassifikation unter Einbeziehung der Polarisationsparameter (Höhe aus LVA-DGM, 5-fach überhöht)

Die Nachbearbeitung wurde analog zum vorherigen Punkt vollzogen. Insgesamt wurde eine sehr gute Gesamtgenauigkeit von 91,5% erreicht (Tab. 4.3). Ein direkter Genauigkeitsvergleich mit den Ergebnissen aus Punkt 4.2.1.1 ist jedoch aus zwei Gründen nicht möglich. Zum einen musste der Bildausschnitt für die Berechnung der Polarisationsparameter geringfügig reduziert werden. Zum anderen weicht die Klasseneinteilung bis auf „Siedlung“ und „Wasser/Schatten“ voneinander ab.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Aufnahmezeitpunkt für eine Klassifizierung der angebauten Feldfrüchte ungeeignet ist. Der Großteil der Feldfrüchte besitzt noch keine artspezifische Ausprägung, sofern die Saat überhaupt schon aufgegangen ist. Des Weiteren bestehen Probleme im unterschiedlichen Entwicklungsstand derselben Feldfrucht auf verschiedenen Feldern oder gar auf ein und demselben Feld. Ursachen dafür sind hauptsächlich zeitliche Unterschiede in der Aussaat sowie topographisch induzierte Variabilitäten (Exposition, Hangneigung, Staunässe etc.) innerhalb eines Schlags. Der Effekt dieser Ursachen wird sich jedoch im Laufe der Vegetationsperiode reduzieren. Dennoch konnten einige Fruchtarten unterschieden werden. Dabei sind Winterraps und Feldgras die einzigen Nutzpflanzen mit einer nennenswerten Biomasse. Die restlichen Ackerklassen konnten aufgrund der spezifischen Rauigkeit etabliert werden.

	<i>Producers accuracy</i> [%]	<i>Users accuracy</i> [%]	Flächenanteil [%]
Siedlung	95,12	91,52	3,88
Wald	97,95	96,67	24,42
Schonung	95,11	99,32	0,78
Wasser/Schatten	95,71	98,98	1,81
Saatbeet	92,45	94,56	4,92
Gepflügt	98,74	99,23	2,52
Wintergetreide	88,12	84,91	22,51
Winterraps	78,79	98,46	12,58
Grünland/Feldgras	98,55	80,80	26,57
			100,00
Gesamtgenauigkeit	91,46%	Kappa Koeffizient	0,90

Tab. 4.3: Genauigkeitsbetrachtung der Landbedeckungsklassifikation unter Einbeziehung der Polarisationsparameter

4.2.2 Pixelbasierte Klassifikation unter Verwendung von *Fuzzy Logic*

Für die Landnutzungs-klassifikation auf alleiniger Basis der Polarisationsparameter wurde der *Fuzzy Logic* Klassifikator von HELLMANN et al. (1999) angewandt. Die im Klassifikationsalgorithmus definierten Klassen orientieren sich erster Linie an den Streuprozessen und nicht an den nutzungsbedingten Landbedeckungsklassen. So werden die Klassen „Sehr glatte Oberfläche“, „Glatte Oberfläche“, „Rauhe Oberfläche“, „Niedrige Vegetation“, „Wald“ und „Siedlung“ unterschieden. Die erste Klasse umfasst beispielsweise Wasserflächen und Straßen. Die zweite Klasse beinhaltet in erster Linie glatte Felder (geeggt) mit sehr wenig oder ohne Vegetation. „Rauhe Oberflächen“ treten in vorwiegend in Form frisch gepflügter Felder auf. Die restlichen Klassen definieren sich durch ihren Namen.

In den Klassifikationsprozess fließen die Parameter λ_1 , H und a ein. Die Bilder dieser drei Größen werden zunächst unabhängig voneinander in linguistische Variablen (siehe Tab. 4.4) transformiert. Anhand dieser Variablen erfolgt unter Einsatz der Klassifikationsregeln (HELLMANN 2000) die Klassenzuweisung. Zwar ist der Algorithmus aufgrund der gebietsunspezifischen Polarisationsparameter auf andere Standorte übertragbar. Dennoch war eine geringfügige Anpassung der Grenzen für die linguistischen Variablen des *Fuzzy Sets* zur Berechnung des Klassenzugehörigkeitsgrades notwendig (siehe unten). Tab. 4.4 enthält die jeweiligen Zahlenwerte für die drei Parameter λ_1 , H und a im Folgenden Schema: Beginn des minimalen Klassenzugehörigkeitsgrades / Beginn des maximalen Klassenzugehörigkeitsgrades / Ende des maximalen Klassenzugehörigkeitsgrades / Ende des minimalen Klassenzugehörigkeitsgrades (vgl. Abb. 2.20). Der erste Eigenwert (λ_1) wurde für die Klassifikation logarithmiert (Basis 10) und linear auf 8 Bit gestreckt.

	<i>sehr niedrig</i>	<i>niedrig</i>	<i>mittel</i>	<i>hoch</i>	<i>sehr hoch</i>
λ_1	0/0/1/10	0/10/50/150	50/130/150/200	150/195/200/250	210/250/255/255
H	0/0/0,2/0,8	0,1/0,3/0,35/0,6	0,3/0,45/0,6/0,8	0,45/0,7/1/1	
a		0/0/0,5/1,5	0,35/0,65/0,8/1,2	0,7/1,05/1,57/1,57	

Tab. 4.4: Angepasste Grenzen der ling. Variablen des *Fuzzy Sets* zur Berechnung des Klassenzugehörigkeitsgrades

Das Ergebnis der Klassifikation wird in Abb. 4.19 vorgestellt. Genauigkeit und Klassenvielfalt sind mit den beiden zuvor vorgestellten Klassifikationen nicht zu vergleichen. Auf eine Genauigkeitsanalyse wurde daher verzichtet. Für eine homogenere Darstellung wurde das Resultat mit einem 7×7 *Majority*-Filter bearbeitet.

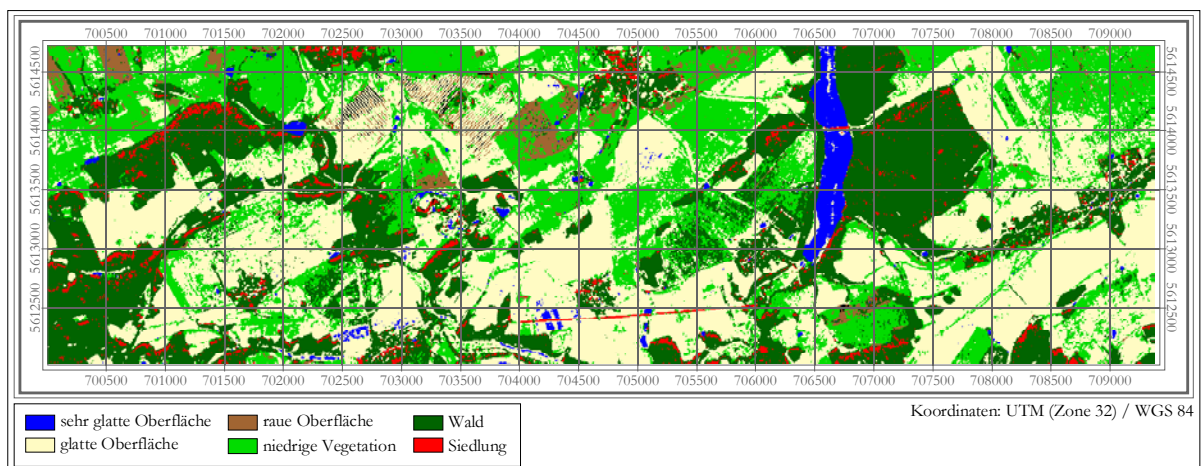


Abb. 4.19: Klassifikationsergebnis mit *Fuzzy Logic* Ansatz

Zwar sind einige Klassen wie Wasser, Wald oder niedrige Vegetation gut erfasst worden, dennoch besteht offenbar eine Reihe von Überschneidungen. So existieren beispielsweise Probleme bei der Trennung von Wald und Siedlung. D.h., nicht nur die Rückstreuintensitäten, sondern auch die Rückstreumechanismen beider Klassen lassen aufgrund ihrer Ähnlichkeit keine eindeutige Trennung zu. Als Siedlungsfläche werden im wesentlichen nur die dem Sensor direkt zugewandten Hauswände klassifiziert, die durch *Double Bounce* gekennzeichnet sind. Gerade im ländlichen Raum deckt dies nur einen Bruchteil der tatsächlichen Siedlungsfläche ab. *Double Bounce* tritt andererseits auch häufig an Waldkanten auf. Dies wird am Klassifikationsergebnis deutlich.

Schwierig erweist sich ferner die Trennung von glatten (z.B. geeggte Felder) und sehr glatten Oberflächen (z.B. Gewässer). Beide Klassen zeichnen sich durch ähnliche Streumechanismen aus, wobei sehr glatte Oberflächen fast ausschließlich Oberflächenstreuung erzeugen. Allerdings ist die Phaseninformation für diese Bildbereiche nicht ausreichend, um die Grundlage für eine korrekte Berechnung der Polarisationsparameter zu bieten. Daher wird die Rückstreucharakteristik in Form von a und H verfälscht dargestellt. Um die Auswirkungen dieses Effektes auf die Klassifikation zu reduzieren, wurde die obere Grenze des minimalen Klassenzugehörigkeitsgrades für diese Parameter im *Fuzzy Set* angehoben (z.B. gilt der Maximalwert $H = 0,8$ für die linguistische Variable „sehr niedrig“).

Raue Oberflächen werden im Klassifikationsergebnis etwa zu 50% korrekt erfasst. Überschneidungen treten hauptsächlich mit der Klasse „Niedrige Vegetation“ auf. Die Überlappung beider Objektklassen im a - H - λ_1 Merkmalsraum ist hier die Ursache. Dies gilt ebenso für die Klassen „Glatte Oberfläche“ und „Niedrige Vegetation“. Offenbar sind für eine saubere Trennung weitere Radar-Parameter erforderlich. Zudem scheint die Ausweisung einer einzigen Klasse „Niedrige Vegetation“ nicht sinnvoll. Die ungleichen Rückstreueigenschaften von beispielsweise Winterraps und Feldgras können nicht in dieser Mischklasse zusammengefasst werden. Während Winterraps z.T. als Wald klassifiziert wird, werden Feldgras oder Grünland häufig als „Glatte Oberfläche“ interpretiert.

Trotz genannter Probleme bietet die Klassifikation von Polarisationsparametern den Vorteil, unüberwacht Objektklassen auszuweisen, sofern deren Streucharakteristika bekannt sind. Eine entsprechende Nachbearbeitung unter Verwendung von GIS-Funktionen würde das Endergebnis der Klassifikation deutlich verbessern (HELLMANN et al. 1999). Dass trotz der geringeren Klassenzahl die Genauigkeit des Resultats deutlich unter jener der obigen Klassifikationsergebnisse liegt, ist wie folgt zu begründen: 1.) es werden lediglich drei Radarparameter verwendet, 2.) die Vorgabe der Klassen orientiert sich kaum an den nutzungsbedingten Landbedeckungsklassen und 3.) die Polarisationsparameter gehen ungefiltert in den Klassifikationsprozess ein. Dadurch entsteht eine Vielzahl kleinräumiger Fehlklassifikationen.

4.2.3 Klassentrennbarkeit anhand verschiedener Radarparameter

In den Tab. 4.5-4.9 wird die Trennbarkeit der einzelnen Landnutzungsklassen für die jeweils verwendeten Radarparameter anhand der *Jefferies-Matusita* Distanz dargelegt. Dieser Parameter kann den Maximalwert 1414 bei einer vollständigen Klassentrennbarkeit annehmen. Ein Wert von Null hingegen bedeutet, beide Klassen sind anhand des jeweiligen SAR-Parameters (Kanal) nicht aufzulösen. Die Berechnung der *Jefferies-Matusita* Distanzen basiert auf den Trainingsgebieten der überwachten Klassifikationen. Das Erreichen des Maximalwertes von 1414 bedeutet demnach nicht, dass in der anschließenden Klassifikation jedes Pixel der gesamten Szene korrekt klassifiziert wird. Die Aussage über die Klassentrennbarkeit gilt lediglich für die Trainingsgebiete. Einer repräsentativen Auswahl dieser Gebiete ist folglich eine immense Bedeutung zuzumessen (NUTZ 1992).

Die ersten beiden Tabellen (Tab. 4.5 & 4.6) repräsentieren die Klassentrennbarkeit anhand eines einzelnen Radar-Parameters. Mit Hilfe der drei darauf folgenden Tabellen (Tab. 4.7-4.9) kann die Klassentrennbarkeit auf Basis mehrerer Radar-Parameter abgeschätzt werden.

Obwohl in der Klassifikation auf alleiniger Basis der Intensitäten (inkl. Textur, Punkt 4.2.1.1) lediglich fünf Klassen unterschieden werden, sind in Tab. 4.5 sämtliche Klassen aus Punkt 4.2.1.2 (Klassifikation unter Einbeziehung der Polarisationsparameter) aufgeführt. Geringe *Jefferies-Matusita* Distanzen für die Trennbarkeit zweier Klassen auf Basis der Intensitäten belegen die Eignung der Polarisationsparameter für Klassifikationszwecke.

L-HH	WAS	GF	W	WS	BG	BS	WG	WR	X-HH	WAS	GF	W	WS	BG	BS	WG	WR
Siedlung - S	986	1155	825	826	932	331	972	908	Siedlung - S	1324	1012	672	800	949	170	816	1086
Wasser - WAS		779	1340	1291	1311	804	1172	1209	Wasser - WAS		1410	1407	1408	1414	1412	1413	1414
Grünland/Feldgras - GF			1414	1414	1414	977	1365	1398	Grünland/Feldgras - GF			734	562	1414	1154	1366	1412
Wald - W				1023	1116	1056	1404	1374	Wald - W				260	1206	586	888	1092
Schonung - WS					234	937	1352	1178	Schonung - WS					1348	717	1088	1265
Gepflügt - BG						1018	1391	1262	Gepflügt - BG						1222	839	681
Saatbeet - BS		mean:	1072				881	865	Saatbeet - BS		mean:	1017				635	988
Wintergetreide - WG								662	Wintergetreide - WG								436
L-HV	WAS	GF	W	WS	BG	BS	WG	WR	X-VV	WAS	GF	W	WS	BG	BS	WG	WR
Siedlung - S	1257	1356	991	738	869	1091	1115	1115	Siedlung - S	1244	974	596	798	1098	929	980	1073
Wasser - WAS		697	1414	1402	1378	755	1209	1213	Wasser - WAS		1390	1378	1385	1411	1402	1407	1410
Grünland/Feldgras - GF			1414	1414	1414	1015	1409	1409	Grünland/Feldgras - GF			733	442	1413	1169	1367	1410
Wald - W				1296	1412	1414	1414	1414	Wald - W				390	1161	621	880	1058
Schonung - WS					1005	1383	1410	1409	Schonung - WS					1371	843	1182	1313
Gepflügt - BG						1304	1358	1357	Gepflügt - BG						1218	779	676
Saatbeet - BS		mean:	1180				807	816	Saatbeet - BS		mean:	1043				678	986
Wintergetreide - WG								20	Wintergetreide - WG								383
L-VV	WAS	GF	W	WS	BG	BS	WG	WR	Textur	WAS	GF	W	WS	BG	BS	WG	WR
Siedlung - S	1339	1045	860	889	949	170	816	811	Siedlung - S	1153	1036	1125	1106	1190	974	1174	1186
Wasser - WAS		1300	1414	1413	1414	1290	1412	1409	Wasser - WAS		396	119	358	210	1406	214	199
Grünland/Feldgras - GF			1413	1403	1413	1025	1380	1279	Grünland/Feldgras - GF			291	301	551	1398	499	536
Wald - W				1159	768	888	1215	1344	Wald - W					268	318	1404	293
Schonung - WS					865	957	362	918	Schonung - WS					552	1402	552	545
Gepflügt - BG						997	1022	1286	Gepflügt - BG						1408	128	23
Saatbeet - BS		mean:	1073				898	889	Saatbeet - BS		mean:	709				1407	1407
Wintergetreide - WG								622	Wintergetreide - WG								106

Tab. 4.5: *Jefferies-Matusita* Distanzen für die Intensitäten und L-Band Textur (WR = Winterraps)

Anhand der Tab. 4.5 ist zu erkennen, dass die mittlere Klassentrennbarkeit im L-Band etwas über jener des X-Bandes liegt. Vor allem die Kreuzpolarisation zeichnet sich durch ein hohes Mittel für die *Jefferies-Matusita* Distanz aus. Im L-Band ist offenbar eine gute Separierung zwischen den Waldklassen, Wasser und den landwirtschaftlichen Klassen möglich. Schwieriger dürfte sich die Auftrennung der landwirtschaftlichen Klassen selbst gestalten. Besonders die Klassen „Saatbeet“, „Grünland/Feldgras“, „Wintergetreide“ sowie „Winterraps“ überschneiden sich z.T. in ihren Signaturen. Des Weiteren liegen die Distanzen für die Trennung von „Siedlung“ und „Wald“ lediglich im mittleren Bereich.

Im X-Band wird die Überlagerung beider Klassen noch gravierender. Zudem liegt die Trennbarkeit zwischen Waldklassen und landwirtschaftlichen Klassen deutlich unter dem Niveau des L-Bandes. Dafür unterscheiden sich die Signaturen der landwirtschaftlichen Klassen, was deren Separation voneinander ermöglichen könnte. Am deutlichsten sondert sich die Klasse „Wasser“ von den restlichen Klassen ab. Die *Jefferies-Matusita* Distanz erreicht hier Maximalwerte.

Die Textur besitzt mit Abstand die niedrigste mittlere *Jefferies-Matusita* Distanz (709). Die meisten Klassen weisen eine ähnlich niedrige Textur auf. Hohe Texturwerte werden lediglich für die Klassen „Siedlung“ und „Saatbeet“ erreicht, wobei der hohe Wert für „Saatbeet“ durch die speziellen Rückstreuungseffekte auf diesen Feldern (Bragg-Streuung) zustande kommt. Im Normalfall ist auch hier mit einer geringen Textur

zu rechnen. Ziel der Texturberechnung war die Aufspaltung der Mischklasse „Siedlung/Wald“. Hier liegen die Distanzen über 1100, eine Entmischung konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die folgende Tab. 4.6 präsentiert die Trennbarkeit der Klassen anhand der Polarisationsparameter. Wie oben werden die *Jefferies-Matusita* Distanzen zwischen den Klassensignaturen separat für die einzelnen SAR-Parameter angegeben.

Alpha	WAS	GF	W	WS	BG	BS	WG	WR	Alpha 1	WAS	GF	W	WS	BG	BS	WG	WR	
Siedlung - S	389	960	1044	875	717	738	670	1132	Siedlung - S	245	879	885	695	726	720	703	1316	
Wasser - WAS		1237	962	645	463	1021	779	1350	Wasser - WAS		960	898	561	633	697	593	1386	
Grünland/Feldgras - GF			1413	1397	1386	380	999	441	Grünland/Feldgras - GF			1405	1325	1357	561	900	1318	
Wald - W				1057	721	1386	1382	1414	Wald - W				805	612	1365	1330	1414	
Schonung - WS					455	1295	1193	1414	Schonung - WS					226	1136	970	1414	
Gepflügt - BG						1275	1164	1413	Gepflügt - BG							1219	1096	1414
Saatbeet - BS		mean: 995					656	729	Saatbeet - BS		mean: 972						398	1401
Wintergetreide - WG								1251	Wintergetreide - WG									1413
Alpha 2	WAS	GF	W	WS	BG	BS	WG	WR	Alpha 3	WAS	GF	W	WS	BG	BS	WG	WR	
Siedlung - S	469	597	633	756	929	487	557	1321	Siedlung - S	642	1366	930	600	1269	1357	1282	1324	
Wasser - WAS		160	964	1082	1284	515	760	1357	Wasser - WAS		1411	514	1061	1395	1410	1399	1406	
Grünland/Feldgras - GF			1082	1194	1345	612	876	1385	Grünland/Feldgras - GF			1414	1414	1408	672	1345	1064	
Wald - W				202	867	645	370	1414	Wald - W				1331	1414	1414	1414	1414	
Schonung - WS					851	814	549	1414	Schonung - WS					1394	1414	1402	1411	
Gepflügt - BG						1194	1084	1414	Gepflügt - BG						1385	538	1167	
Saatbeet - BS		mean: 898					323	1413	Saatbeet - BS		mean: 1197					1225	708	
Wintergetreide - WG								1414	Wintergetreide - WG								784	
Entropie	WAS	GF	W	WS	BG	BS	WG	WR	Anisotropie	WAS	GF	W	WS	BG	BS	WG	WR	
Siedlung - S	374	1158	962	852	1054	1332	1081	627	Siedlung - S	815	431	783	839	856	581	1050	963	
Wasser - WAS		1360	943	625	1299	1397	1318	311	Wasser - WAS		550	193	217	219	398	425	1386	
Grünland/Feldgras - GF			1414	1413	647	1112	580	1405	Grünland/Feldgras - GF			469	545	571	190	892	1268	
Wald - W				1101	1414	1414	1414	1031	Wald - W				92	120	292	565	1385	
Schonung - WS					1412	1412	1413	384	Schonung - WS					32	374	532	1394	
Gepflügt - BG						1275	108	1392	Gepflügt - BG						402	510	1396	
Saatbeet - BS		mean: 1086					1264	1408	Saatbeet - BS		mean: 674					775	1332	
Wintergetreide - WG								1398	Wintergetreide - WG								1411	
Lambda 1	WAS	GF	W	WS	BG	BS	WG	WR	Lambda 2	WAS	GF	W	WS	BG	BS	WG	WR	
Siedlung - S	1387	1313	958	1226	1220	848	1312	1280	Siedlung - S	1356	1312	765	992	1167	1311	1298	1270	
Wasser - WAS		1274	1382	1413	1413	1361	1408	1302	Wasser - WAS		944	1412	1410	1410	1140	1380	1414	
Grünland/Feldgras - GF			1278	1400	1401	1204	955	523	Grünland/Feldgras - GF			1411	1406	1400	328	1088	1408	
Wald - W				961	934	395	1259	1220	Wald - W				1239	1387	1411	1409	1405	
Schonung - WS					116	969	1368	1364	Schonung - WS					1169	1405	1398	1366	
Gepflügt - BG						953	1372	1368	Gepflügt - BG						1395	1363	1105	
Saatbeet - BS		mean: 1138					1196	1126	Saatbeet - BS		mean: 1258				914	1402		
Wintergetreide - WG								521	Wintergetreide - WG								1298	
Lambda 3	WAS	GF	W	WS	BG	BS	WG	WR										
Siedlung - S	1343	1313	897	767	1055	1323	1263	1261										
Wasser - WAS		897	1413	1411	1410	1281	1388	1407										
Grünland/Feldgras - GF			1413	1410	1404	557	1273	1359										
Wald - W				1264	1394	1413	1411	1411										
Schonung - WS					1181	1409	1401	1398										
Gepflügt - BG						1403	1355	1335										
Saatbeet - BS		mean: 1253					1205	1326										
Wintergetreide - WG								357										

Tab. 4.6: *Jefferies-Matusita* Distanzen für die Polarisationsparameter (WR = Wintertraps)

Die höchsten mittleren Distanzen werden für die drei Eigenwerte λ_1 - λ_3 erreicht. Während anhand des ersten und dritten Eigenwertes eine Entmischung der landwirtschaftlichen Klassen kritisch werden könnte, bietet λ_2 hierfür offenbar gute Möglichkeiten. Lediglich die Differenzierung zwischen „Saatbeet“ und „Wintergetreide“ könnte größere Schwierigkeiten bereiten. Die Separation von „Siedlung“ und „Wald“ mittels der Eigenwerte ist analog zu den L-Band Intensitäten problematisch. Diesbezüglich bieten sich die Parameter a , a_3 und H an. Hinsichtlich der restlichen Klassen kann kein Polarisationsparameter favorisierend genannt werden. Jeder Parameter eignet sich für die Trennung unterschiedlicher Klassen. Beispiels-

weise besitzen a_2 und \mathcal{A} eher einen niedrigen Mittelwert für die *Jefferies-Matusita* Distanz. Dennoch bieten beide Parameter eine gute Möglichkeit, die Klasse „Winterraps“ von den restlichen Klassen zu separieren. Unter gleichzeitiger Verwendung mehrerer SAR-Parameter ergänzen sich die parameterspezifischen Eigenschaften zu einer gesteigerten Klassentrennbarkeit. Die folgenden drei Tabellen offenbaren die *Jefferies-Matusita* Distanzen zwischen allen neun Klassen für den parallelen Einsatz mehrerer Radar-Parameter. In Tab. 4.7 sind die Distanzen für den Gebrauch aller Intensitäten inklusive der L-Band Textur dargestellt. Im Vergleich zu den obigen Tabellen werden wesentlich höhere Werte, also bessere Trennbarkeiten erreicht. Zwischen den meisten Klassen tritt die Maximaldistanz von 1414 auf. Die größten Schwierigkeiten treten bei der Trennung der Waldklassen von der Siedlungsklasse auf. Zudem könnte die weitere Untergliederung von Wald zu Unsicherheiten führen. Aufgrund der hohen Rückstreuintensität gepflügter Felder sind hier ebenfalls Vermischungen mit der Klasse „Siedlung“ möglich.

	Wald	Schonung	Wasser	Gepflügt	Saatbeet	Winterraps	Wintergetreide	Grünland/Feldgras
Siedlung	1209	1071	1410	1257	1409	1380	1409	1414
Wald		1242	1414	1413	1414	1414	1414	1414
Schonung			1414	1358	1414	1413	1414	1414
Wasser				1414	1414	1414	1414	1414
Gepflügt					1414	1414	1414	1414
Saatbeet						1349	1377	1414
Raps		<i>mean: 1361</i>					1349	1414
Wintergetreide		<i>min: 1071</i>						1414

Tab. 4.7: Klassenspezifische *Jefferies-Matusita* Distanzen für alle Intensitäten inkl. L-Band Textur

Tab. 4.8 widmet sich der Klassentrennbarkeit auf Basis der Polarisationsparameter. Texturdaten wurden hier nicht verwendet. Bis auf wenige Ausnahmen wird überall der Maximalwert 1414 für die *Jefferies-Matusita* Distanz errechnet. Eine Klassifikation auf alleiniger Basis der Polarisationsparameter sollte demnach zu ansprechenden Ergebnissen führen.

	Wald	Schonung	Wasser	Gepflügt	Saatbeet	Winterraps	Wintergetreide	Grünland/Feldgras
Siedlung	1413	1414	1414	1414	1414	1414	1414	1414
Wald		1414	1414	1414	1414	1414	1414	1414
Schonung			1414	1414	1414	1413	1414	1414
Wasser				1414	1409	1414	1410	1412
Gepflügt					1414	1414	1414	1414
Saatbeet						1414	1414	1414
Raps		<i>Mean: 1413</i>					1414	1414
Wintergetreide		<i>min: 1409</i>						1414

Tab. 4.8: Klassenspezifische *Jefferies-Matusita* Distanzen für alle Polarisationsparameter (ohne Textur)

In der letzten Tabelle (Tab. 4.9) sind jene *Jefferies-Matusita* Distanzen aufgeführt, die sich unter Verwendung aller Radar-Parameter ergeben haben. Dies sind die Radarintensitäten, die Textur und die Polarisationsparameter aus der Cloude-Dekomposition. Unter Einsatz dieser umfangreichen Datenbasis ist offenbar jede Klasse durch ihre spezifische Signatur eindeutig gekennzeichnet. Die Trennbarkeit erreicht für alle Klassenkombinationen den Maximalwert. Dieses Ergebnis ist konform mit der hohen Klassifikationsgenauigkeit aus Punkt 4.2.1.2.

	Wald	Schonung	Wasser	Gepflügt	Saatbeet	Winterraps	Wintergetreide	Grünland/Feldgras
Siedlung	1414	1414	1414	1414	1414	1414	1414	1414
Wald		1414	1414	1414	1414	1414	1414	1414
Schonung			1414	1414	1414	1413	1414	1414
Wasser				1414	1414	1414	1414	1414
Gepflügt					1414	1414	1414	1414
Saatbeet						1414	1414	1414
Raps		<i>mean</i> : 1414					1414	1414
Wintergetreide		<i>min</i> : 1413						1414

Tab. 4.9: Klassenspezifische *Jefferies-Matusita* Distanzen für alle SAR-Parameter

4.2.4 Schema für eine unüberwachte Klassifikation polarimetrischer SAR-Daten

Aus dem vorangegangenen Punkt (4.2.3) geht hervor, dass jede Landbedeckungsklasse anhand ihrer spezifischen Signaturen erfassbar ist. Waldgebiete beispielsweise sind stets durch immense Rückstreuintensitäten im L-Band sowie durch hohe Werte für α und H gekennzeichnet. Unter dieser Prämisse sollte es möglich sein, ein allgemeingültiges Klassifikationsschema zu entwickeln, welches die Hauptklassen der Landbedeckung berücksichtigt.

Fraglich ist die Übertragbarkeit eines solchen Schemas auf (in diesem Fall) vollpolarimetrische L-Band Daten anderer Sensoren. SAR-Daten sind, sofern es sich nicht explizit um experimentelle Produkte handelt, absolut kalibriert. Atmosphärische Störungen sind im Gegensatz zu optischen Sensoren in der Regel vernachlässigbar. Demnach sollten die absoluten Intensitäten verschiedener Sensoren oder unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte miteinander vergleichbar sein. Des Weiteren erfolgt bei polarimetrisch arbeitenden Systemen eine polarimetrische Kalibrierung, um eine relationale Auswertung der verschiedenen Polarisationen zu ermöglichen. Dies ist letztlich Voraussetzung einer polarimetrischen Datenauswertung (z.B. Cloude-Dekomposition). Die anhand der Dekomposition berechneten Polarisationsparameter wie Alpha, Entropie oder Anisotropie sind demnach ebenfalls systemunabhängig. Sie werden von Art und Anordnung der Streuobjekte geprägt.

Dennoch können sich Unterschiede in der Sensorconfiguration auf die Bildstatistik derart auswirken, dass die klassenspezifischen Signaturen angepasst werden müssen. Entscheidende Komponenten der Sensorconfiguration sind beispielsweise die geometrische Auflösung, das Signal zu Rauschen Verhältnis (SNR) oder der Einfallswinkelbereich. Die geometrische Auflösung bestimmt die Zahl der Streuobjekte pro Auflösungszelle und somit die Ausbildung des Speckle. Außerdem wird bei geringer Auflösung der mittlere Streuprozess für eine größere Fläche berechnet. Die höhere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten mehrerer Streuprozesse innerhalb dieser Zelle reduziert den Informationsgehalt polarimetrischer Parameter. Des Weiteren bestimmt die geometrische Auflösung entscheidend die Möglichkeit der Erfassung der Textur. Das SNR ist besonders für Areale mit geringer Rückstreuung ausschlaggebend. Für glatte Wasserflächen in *Far Range* z.B. besteht das Messsignal zum Großteil aus Systemrauschen. Dies gilt ebenso für die Phaseninformation. Arbeitet ein System mit geringen lokalen Einfallswinkeln (wie die meisten SAR-Satelliten) ist eine polarimetrische Auswertung des Signals auch für sehr glatte Oberflächen möglich. Die Interpretation der Streumatrix ergibt dementsprechend Oberflächenstreuung, während im Falle der Auswertung von Systemrauschen ein mittleres α und eine hohe Entropie berechnet werden.

Trotz genannter möglicher Schwierigkeiten wird hier untersucht, ob stabile SAR-Parameter für die Definition verschiedener Klassen herausgestellt werden können. Die Klassenauswahl (Tab. 4.10) dieses unüberwachten Schemas orientiert sich an der Arbeit von HELLMANN (2000). Sie muss sich auf Klassen beschränken, die ohne die Notwendigkeit einer zusätzlichen Interpretation bzw. *a priori* Wissen abgeleitet werden können. Die Interpretation der Klassen kann im Anschluss an die Klassifikation erfolgen. Die Klasse „Glatte Oberflächen“ beinhaltet beispielsweise geeegte Felder, Straßen, Plätze o.ä.

In der folgenden Tabelle (Tab. 4.10) werden die klassenspezifischen Signaturen für die SAR-Parameter vorgestellt. Dies sind die L-Band Intensitäten, die mittlere X-Band Intensität, die Polarisationsparameter α , H , A , λ_1 sowie die mittlere Textur des L- und X-Bandes (Berechnung der Textur wie unter Punkt 4.2.1.1 beschrieben). Diese Parameter wurden aufgrund ihrer Eignung für die Klassifikation bzw. ihrer physikalischen Interpretierbarkeit gewählt. Jeder Parameter wurde in drei Kategorien ($-/0/+ \rightarrow$ niedrig/mittel/hoch) eingeteilt. Die Kriterien für die Kategorisierung sind Tab. 4.12 zu entnehmen.

Klassen	L-HH	L-HV	L-VV	X-B.	α	H	A	λ_1	Tex. L	Tex. X
Wald	+	+	+	o	o/+	+	o	+	-	o
Siedlung (Double Bounce)	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+
Wasser (glatte Oberfläche)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Niedrige Vegetation	o	o	o	o/+	-/o	o/+	o	o	-	-
Glatte Oberflächen	-	o/-	o/+	o	-	-	-	-	-	-
Rauhe Oberflächen	o/+	o/+	o/+	+	-/o	o	o	o/+	-	-

Tab. 4.10: Theoretische klassentypische Werte verschiedener SAR-Parameter

Tab. 4.10 gibt Auskunft über die zu erwartenden klassentypischen Werte verschiedener SAR-Parameter. Die Angaben für die Klasse „Siedlung“ beziehen sich auf *Double Bounce* Bereiche innerhalb der Ortschaften. Wasserflächen (unter der Annahme einer glatten Wasseroberfläche) sind durch spiegelnde Reflexion, also reine Oberflächenstreuung ($\alpha = 0$, $H = 0$, $A = 0$) gekennzeichnet. Die Rückstreuung Richtung Sensor geht daher vor allem bei großen lokalen Einfallswinkeln gegen Null. Dies wirkt sich, wie bereits diskutiert, auf die Berechnung der Polarisationsparameter aus. Somit ergeben sich für die Klasse „Wasser“ sowie einige andere Klassen von der Theorie abweichende Werte. Für diese Fälle sind in Tab. 4.11 die tatsächlich berechneten Größen abgebildet. Für „Wald“ und „Rauhe Oberflächen“ stellen sich keine Veränderungen heraus. Für die Klasse „Wasser“ hingegen werden auf Systemrauschen basierend mittlere Werte für Alpha, Entropie und Anisotropie berechnet. Dieser Effekt ist ansatzweise auch für die Klasse „Glatte Oberflächen“ zu beobachten. Auch hier sind Entropie und Anisotropie leicht erhöht.

Klassen	α	H	A
Wald			
Siedlung (Double Bounce)			o
Wasser (glatte Oberfläche)	o	o/+	o
Niedrige Vegetation			o/+
Glatte Oberflächen		-/o	o
Rauhe Oberflächen			

Tab. 4.11: Gemessene klassentypische Werte verschiedener SAR-Parameter

Für *Double Bounce* Bereiche in Siedlungen werden die Parameter α und H korrekt berechnet. Alpha geht gegen 90° und die Entropie gegen Null. *Double Bounce* ist hier folglich der einzige Rückstreuprozess. Der zweite sowie der dritte Eigenwert der Kohärenzmatrix sind nahe Null. Demnach wäre zu erwarten, dass

gilt: $A = 0$. Der tatsächlich gemessene Wert liegt dessen ungeachtet im mittleren Bereich, da beide Eigenwerte sowie die dazugehörigen Eigenvektoren einen sehr hohen Rauschanteil aufweisen.

Die Klasse „Niedrige Vegetation“ umfasst ein weites Spektrum unterschiedlicher Landbedeckungen. Eine scharfe Definition klassentypischer Werte der SAR-Parameter gestaltet sich infolgedessen schwierig. Auf der anderen Seite erfordert eine detailliertere Klasseneinteilung ein umfangreiches Vorwissen in Bezug auf die Rückstreucharakteristik verschiedener Pflanzentypen in verschiedenen phänologischen Stadien. Im Allgemeinen kann jedoch angenommen werden, dass sich das Rückstreusignal aus mehreren Komponenten zusammensetzt. Dies sind vorwiegend Volumen- und Oberflächenstreuung. Je nach Pflanzentyp und Wuchsstadium kann ein *Double Bounce* Anteil (z.B. bei ausgewachsenem Mais) hinzu kommen. Daraus folgend ergeben sich mittlere Werte für die Parameter a , H und A .

Tab. 4.12 enthält die Kriterien für die Kategorisierung der SAR-Parameter. Die Kategoriegrenzen wurden zum Großteil empirisch anhand der SAR-Daten ermittelt. Die Einteilung der Polarisationsparameter orientierte sich stellenweise an der Arbeit von HELLMANN et al. (1999). Für die Anwendung des Klassifikationschemas auf andere SAR-Daten sind die Schwellenwerte möglicherweise anzupassen.

SAR-Parameter	− (niedrig)	○ (mittel)	+ (hoch)
$L-HH$	$\sigma^0 < -25$ dB	-25 dB $\leq \sigma^0 \leq -8$ dB	-8 dB $< \sigma^0$
$L-HV$	$\sigma^0 < -36$ dB	-36 dB $\leq \sigma^0 \leq -15$ dB	-15 dB $< \sigma^0$
$L-VV$	$\sigma^0 < -30$ dB	-30 dB $\leq \sigma^0 \leq -9$ dB	-9 dB $< \sigma^0$
$X-Band$	$\sigma^0 < -29$ dB	-29 dB $\leq \sigma^0 \leq 0$ dB	0 dB $< \sigma^0$
a	$a < 30^\circ$	$35^\circ \leq a \leq 55^\circ$	$55^\circ < a$
H	$H < 0,3$	$0,4 \leq H \leq 0,6$	$0,6 < H$
A	$A < 0,3$	$0,4 \leq A \leq 0,6$	$0,6 < A$
λ_1	$\lambda_1 < 5.000$	$5000 \leq \lambda_1 \leq 500.000$	$500.000 < \lambda_1$
$Textur L$	$d_{eu} < 0,35$	$0,35 \leq d_{eu} \leq 0,8$	$0,8 < d_{eu}$
$Textur X$	$d_{eu} < 0,5$	$0,5 \leq d_{eu} \leq 1,7$	$1,7 < d_{eu}$

Tab. 4.12: Kriterien für die Kategorisierung der SAR-Parameter

Die kategorisierten SAR-Parameter bilden die Basis des in Abb. 4.20 dargestellten Klassifikationsschemas. Links oben wird der Input in Form der SAR-Daten symbolisiert. Die Rauten enthalten jene Bedingungen, die ein Pixel erfüllen muss, um einer bestimmten Klasse zugewiesen zu werden. Ob eine oder alle Bedingungen erfüllt sein müssen, ist anhand der Verknüpfungsvorschriften „OR“ bzw. „AND“ zu erkennen. Die Klassen werden in Form farbiger Zylinder repräsentiert. Der Ablauf der Klassifikation erfolgt in mehreren Teilschritten.

In jedem Teilschritt wird entschieden, ob ein Pixel der jeweils aktuellen Klasse zuzusprechen ist. Für diese Klassenzuweisung werden die am besten geeigneten SAR-Parameter herangezogen. Wasserflächen sowie Radarschattenbereiche beispielsweise besitzen die mit Abstand niedrigsten Rückstreuintensitäten im X-Band sowie im L-VV. Beide Parameter kommen demnach als Klassifikationskriterien für die Klasse „Wasser/Schatten“ in Betracht. Die klassifizierten Pixels können im weiteren Verlauf der Klassifikation keiner anderen Klasse mehr zugewiesen werden. Dies wird durch die Bedingung „Wasser/Schatten = *not true*“ bei der Ausweisung der Mischklasse „Siedlung/Wald“ illustriert. Die Aufspaltung dieser Mischklasse erfolgt unabhängig von der fortlaufenden Klassifikation in einem detaillierteren Level. Anhand der vorletzten Abfrage wird die Klasse „Glatte Oberfläche“ ausgewiesen. Die nach diesem Schritt bestehenden unklassifizierten Bildbereiche werden schließlich in „Niedrige Vegetation“ sowie „Rauhe Oberfläche“ separiert. Die automatisierte Umsetzung des Klassifikationsablaufplans erfolgte unter Verwendung des Modellierungsmoduls der Bildverarbeitungssoftware ERDAS/Imagine 8.4.

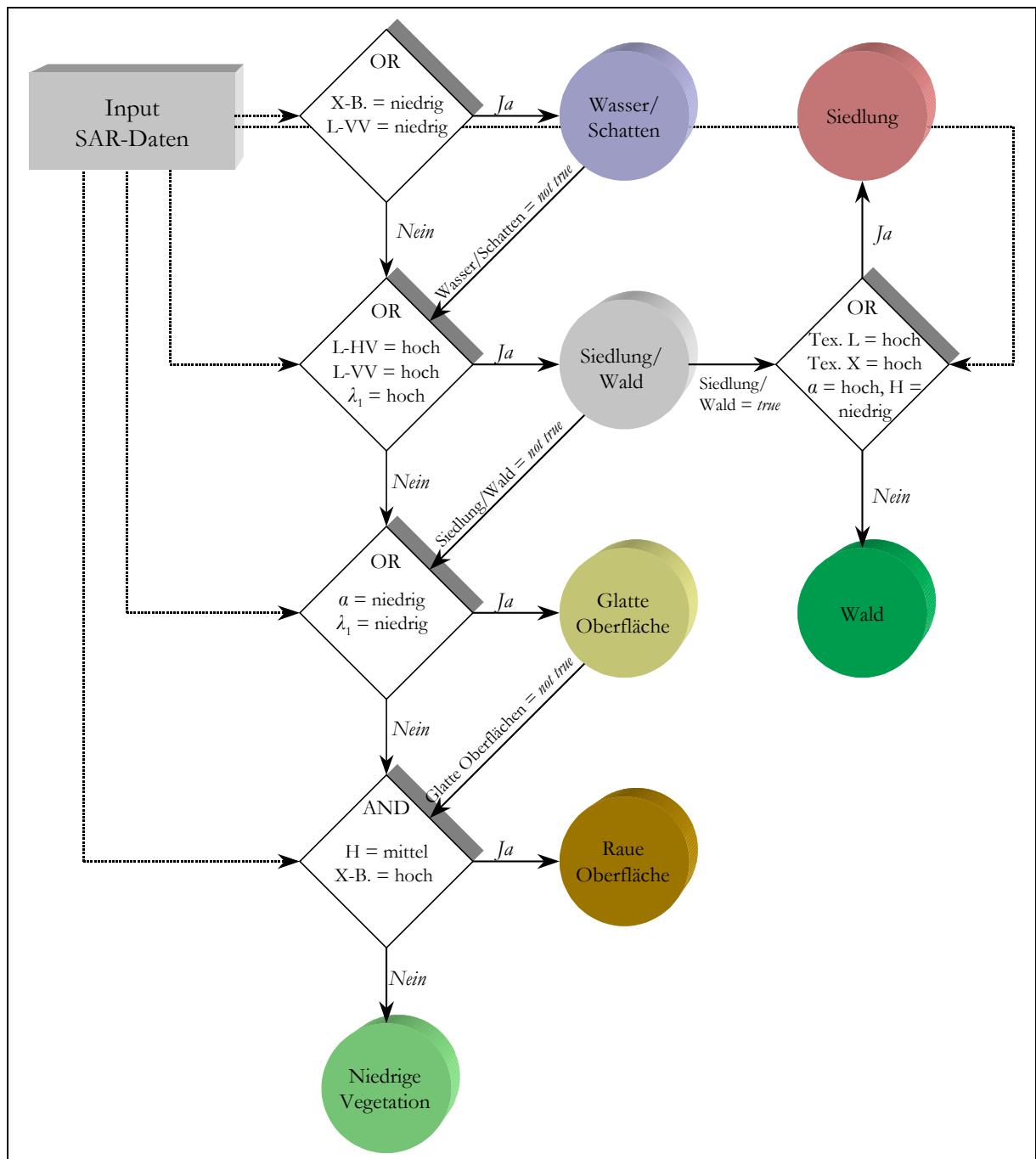


Abb. 4.20: Ablaufplan des Klassifikationsschemas

Das Ergebnis der Anwendung des Klassifikationsschemas ist eine Landbedeckungsklassifikation mit sechs Klassen. Abb. 4.21 zeigt das nicht nachbearbeitete Klassifikationsergebnis. Der Großteil der Klassen wird korrekt wiedergegeben. Größere Unsicherheiten bestehen lediglich zwischen den Klassen „Niedrige Vegetation“ und „Glatte Oberflächen“. Als Ursache hierfür muss erneut der frühe Aufnahmeterrain (März) angeführt werden. Eine der Klasse „Niedrige Vegetation“ entsprechende Vegetationsbedeckung war nur ansatzweise und mit vielen feldinternen Inhomogenitäten vorhanden. Die Mischklasse „Siedlung/Wald“ konnte indes gut aufgelöst werden – Siedlungen und Waldbereiche sind in Abb. 4.21 klar erkennbar. Fehlklassifikationen treten vor allem in Waldabschnitten mit vorherrschendem *Double Bounce* und hoher Textur auf. Dies trifft z.B. auf Waldkanten, Schneisen oder Lichtungen zu. Diese Fehler sind durch GIS-Analysen im Rahmen einer Nachbearbeitung des Klassifikationsergebnisses zu beheben. Die Klassen „Wasser“ und

„Rauhe Oberfläche“ wurden ebenfalls gut erfasst. Probleme treten hier lediglich im Bereich der Hochspannungsüberlandleitung zutage. Die spezifische Rückstreusignatur dieser Konstruktion ähnelt offenbar jener der rauen Oberflächen. Auch in diesem speziellen Fall können GIS-Analysen zu einer Verbesserung des Ergebnisses führen.

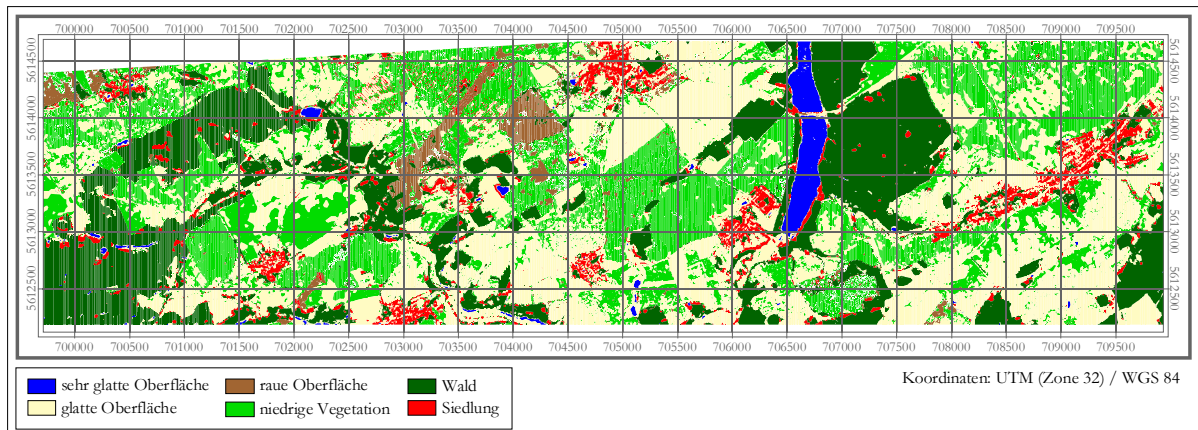


Abb. 4.21: Ergebnis nach Ablauf des Klassifikationsschemas

Ob bzw. inwieweit das hier vorgestellte Klassifikationsschema auf andere Datensätze anwendbar ist, gilt es zu prüfen. Diesbezügliche Hintergründe wurden oben diskutiert. Im Vergleich zum *Fuzzy Logic* Ansatz aus Punkt 4.2.2 weist das Ergebnis eine sichtbar höhere Genauigkeit auf (auf Genauigkeitsanalysen wurde in beiden Fällen verzichtet). Als Hauptursache dürfte hier die Verwendung einer größeren Zahl von SAR-Parametern (einschließlich Intensitäten) verantwortlich sein. Diese stehen jedoch bei einem polarimetrischen Datensatz ohnehin zur Verfügung (ausgenommen die hier zusätzlich verwandten X-Band Daten). Daher empfiehlt es sich, diese unter dem Aspekt einer Qualitätssteigerung des Resultats auch zu verwenden. Ein weiterer Grund ist die Berücksichtigung der tatsächlich gemessenen klassenspezifischen Werte der Polarisationsparameter. Wie oben besprochen, stimmen diese z.T. nicht mit den theoretisch stattfindenden Streuprozessen überein. Dies kann allerdings vom Klassifikator nicht berücksichtigt werden. Der sicherste Weg ist hier, bei der Ausweisung der betroffenen Klassen keine SAR-Parameter zu verwenden, deren Werte in Theorie und Messung voneinander abweichen. Daher wurde hier z.B. bei der Definition der Klasse „Wasser“ auf die Verwendung von Polarisationsparametern verzichtet.

4.3 Aufbereitung des interferometrischen Höhenmodells

Die integrative Verwendung des interferometrischen Höhenmodells und des Geländemodells des LVA birgt die Möglichkeit, weitere relevante Parameter zu extrahieren. Überdies kann das E-SAR DHM hinsichtlich des Einflusses von Baum- und Gebäudehöhen sowie fehlerhafter Höheninformation im Bereich von Wasserflächen korrigiert werden. Für die folgenden Arbeitsschritte wurden die Klassifikationsergebnisse aus Punkt 4.2.1.1 genutzt.

Nach eingehender Überprüfung der exakten Koregistrierung beider Modelle wurde ein Vergleich der Geländehöhen zwischen interferometrischem DHM und LVA-DGM durchgeführt. Für diese Gegenüberstellung wurden Waldareale, Schattenbereiche, Siedlungen sowie Wasserflächen ausgeschlossen. Abb. 4.24 präsentiert die Korrelation zwischen beiden Modellen. Trotz der deutlichen Übereinstimmung wurde eine Standardabweichung von etwa 13 m aus den Höhendifferenzen berechnet. Die Abweichungen kommen vor allem durch die geringere Auflösung (geometrische- als auch Höhenauflösung) sowie geländemodellinterne Ungenauigkeiten des LVA-DGM zustande. Anhand des interferometrischen Modells können wesentlich feinere Geländestrukturen aufgelöst werden.

Dennoch wurde die Berechnung der Differenz zwischen beiden Modellen zur Ermittlung der Baum- und Gebäudehöhen durchgeführt. Kleinräumige Höhenunterschiede zwischen beiden Modellen sollten die Ergebnisse nicht übermäßig beeinträchtigen. Das Resultat ist in Abb. 4.22 dargestellt. Auf Basis der Siedlungs- und Waldmaske wurden die restlichen Bildbereiche ausgeblendet. In dieser Karte sind demnach ausschließlich die Baum- und Gebäudehöhen enthalten. Abb. 4.23 zeigt dieselben Informationen anhand einer auf der Landbedeckungsklassifikation basierenden 3D-Darstellung.

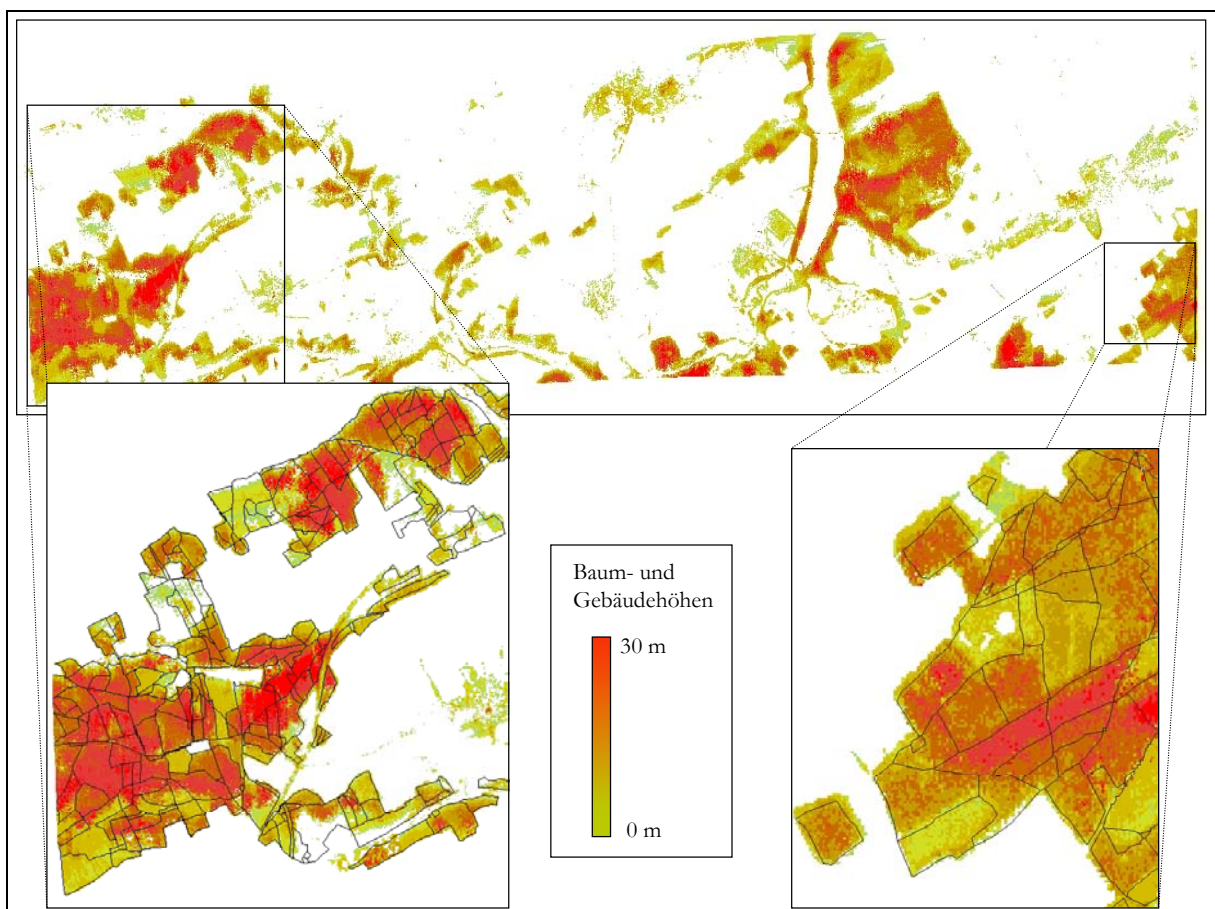


Abb. 4.22: Aus DHM-Daten abgeleitete Karte der Baum- und Gebäudehöhen

Die vergrößerten Bildausschnitte in Abb. 4.22 wurden mit den Grenzen der Bewirtschaftungseinheiten der Forstareale überlagert. Die verschiedenen Einheiten sind, sofern sich die Wachstadien der Bäume zwischen ihnen unterscheiden, an den unterschiedlichen Baumhöhen erkennbar. Stellenweise stimmen die GIS-Daten nicht mit den tatsächlichen Gegebenheiten überein. Beispielsweise überschreiten Forstareale ihre räumlichen Grenzen in Richtung einer anderen Landnutzung. Ob es sich hierbei jedoch um Sukzessionserscheinungen oder lediglich um Fehler in der Forstdatenbank handelt, ist unklar. In anderen Fällen sind Waldareale zu finden, die nicht in der Forstdatenbank verzeichnet sind. Hierbei handelt es sich zu meist um Straßensäume oder um kleinere Baumgruppen im Bereich von Kleingärten bzw. dünn besiedelten Ortsteilen. Der dritte Fall bezeichnet Forstflächen mit einer Baumhöhe von Null. Hier stehen z.T. in der Tat keine Bäume oder deren geringe Höhe kann im interferometrischen Höhenmodell nicht aufgelöst werden. Möglicherweise wurde hier die forstwirtschaftliche Nutzung auch aufgegeben, die Aktualisierung der Forstdatenbank blieb jedoch aus.

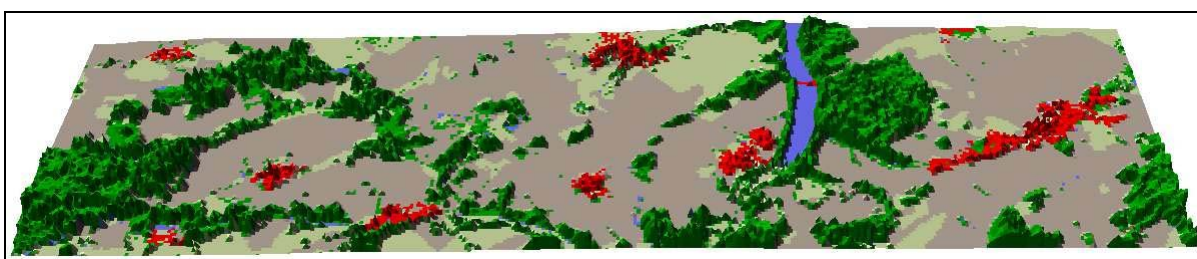


Abb. 4.23: 3D-Darstellung der Baum- und Gebäudehöhen (5-fache Überhöhung)

Siedlungen sind in Abb. 4.22 aufgrund der Höhe von Gebäuden sowie der Existenz von Bäumen ebenfalls zu erkennen. Die heterogene Struktur in Kombination mit der kleinräumigen Mischung verschiedener Landbedeckungsformen innerhalb der Ortschaften gestalten eine genaue Höherefassung einzelner Siedlungselemente schwierig. Die Höhe eines Gebäudes kann nur dann korrekt gemessen werden, wenn das Rückstreusignal der Reflexion der Mikrowellen von dessen höchstem Punkt (Dach) entammt. Je nach Bauweise erzeugt allerdings der Großteil der Dächer spiegelnde Reflexion. Um ein messbares Rückstreusignal zu erhalten, muss das Dach daher dem Sensor zugewandt sein. Diese Konstellation ist eher unwahrscheinlich. Dennoch heben sich Siedlungen aufgrund ihrer zusätzlichen Höhe vom umgebenden Gelände ab. Demnach befindet sich zumindest ein Teil der Streuzentren über der Geländeoberkante.

Eine Aussage hinsichtlich der absoluten Genauigkeit der Karte für Baum- und Gebäudehöhen ist schwer zu treffen. Die Standardabweichung der Höhendifferenz zwischen beiden Modellen erreicht die Größenordnung der Baumhöhe. Dennoch tritt die Struktur der forstwirtschaftlichen Einheiten deutlich hervor. Die Abweichungen zwischen beiden Modellen sind vermutlich vorwiegend kleinräumiger Natur. Unter dieser Annahme kann in Verbindung mit Abb. 4.15 (Punkt 4.1.2.2.3) von einer hohen Genauigkeit ausgegangen werden. Eine Validierung der Karte anhand der in Abb. 4.15 vorgestellten Geländedaten der Baumhöhen bestätigt diese Annahme. Hier ergab sich ein Korrelationskoeffizient von $r = 0,92$ bei einem σ von 1,8 m. Der lineare Trend deckt sich in etwa mit der 1:1 Linie. Allerdings ist festzuhalten, dass die Validierung ausschließlich für Baumhöhen vollzogen werden konnte.

Für die Erstellung eines reinen Geländemodells auf Basis des E-SAR-DHM musste dieses Modell um die Baum- und Gebäudehöhen dezimiert werden. Diese Operation wurde umgesetzt, indem das interferometrische (IF) DHM durch das LVA-DGM für Wald- und Siedlungsbereiche ersetzt wurde. Ferner erfolgte die Höhenkorrektur der Talsperrenoberfläche. In diesem Schritt wurde unter Verwendung einer auf der Klassifikation beruhenden Maske dem gesamten Talsperrenbereich der Höhenwert der Talsperre Zeulenroda (bei Betriebsstau) zugewiesen. Im letzten Schritt erfolgte die Anwendung zweier Filter (Median 3×3 ,

Mittelwert 5×5) zur Eliminierung einzelner fehlerhafter Pixels sowie zur Glättung der Übergänge zwischen beiden Modellen.

Abb. 4.25 präsentiert als Endergebnis das aufbereitete interferometrische Geländemodell. Für diese Darstellung wurde es in das Geländemodell des Landesvermessungsamtes eingebettet. Es setzt sich durch eine höhere Auflösung sowie die Höhenstrukturen von Wald und Siedlung vom LVA-DGM deutlich ab. Zudem ist es von einer schwachen Kante umgeben. Innerhalb dieses Modells ist die Ausdehnung des L-Band Befliegungsstreifens markiert (weißer Kasten). Nur für diesen Bereich konnte eine Aufbereitung des interferometrischen DHM erfolgen, da die L-Band-Daten für die Landbedeckungsklassifikation unverzichtbar waren. Dies ist beispielsweise daran zu erkennen, dass die Korrektur des Waldeinflusses abrupt mit dem L-Band Befliegungsstreifen endet. Zwei Beispiele dafür sind durch die weißen Pfeile gekennzeichnet. Die weiße Ellipse markiert einen Bereich innerhalb des überarbeiteten E-SAR-DHM, der von Wald bestanden ist und diesbezüglich korrigiert wurde. Dies ist z.T. an der sich durchpausenden stufenhaften Struktur des LVA-Geländemodells zu erkennen.

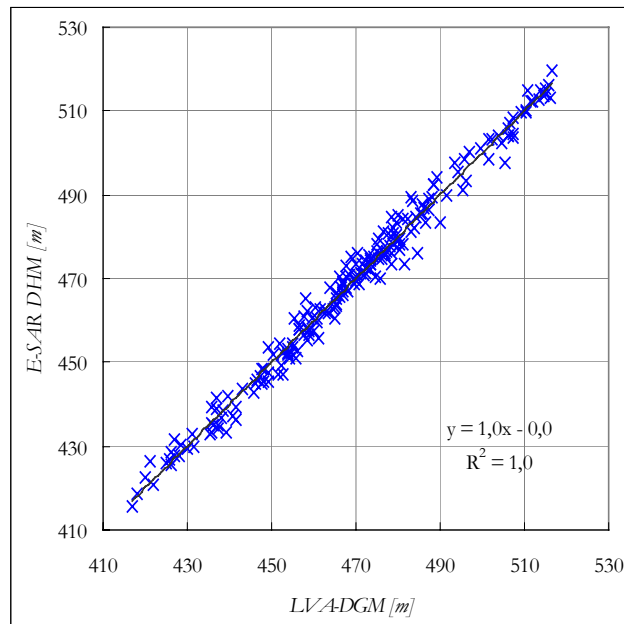


Abb. 4.24: Geländehöhenvergleich zwischen interferometrischem DHM und LVA-DGM

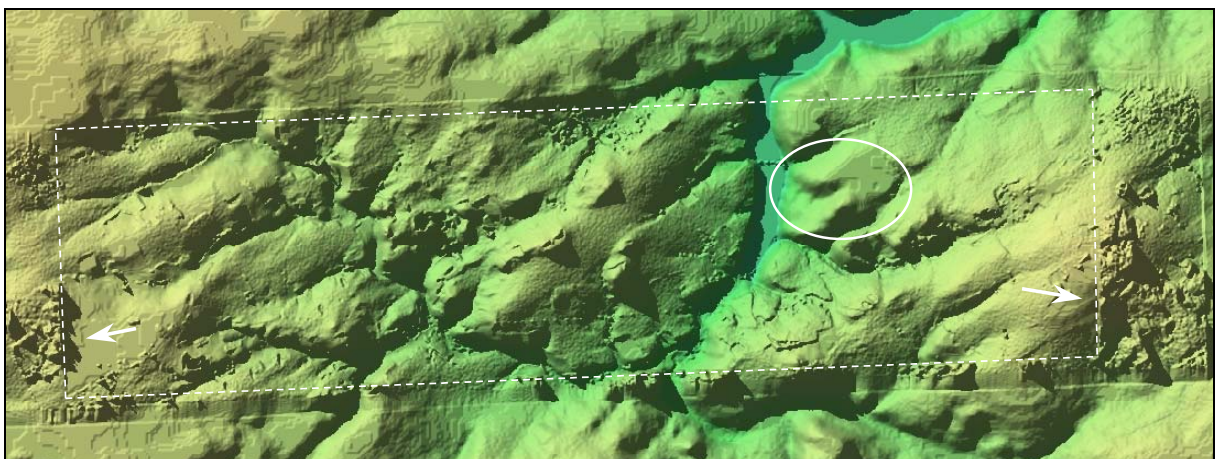


Abb. 4.25: Aufbereitetes IF-DHM, eingebettet in LVA-DGM (Aufbereitung erfolgte lediglich innerhalb des L-Band Streifens [weißer Kasten], siehe Text)

4.4 Analyse der Korrelation zwischen SAR- und Oberflächenparametern

Der Charakter des Rückstreusignals wird durch die geometrischen und dielektrischen Eigenschaften der Streuobjekte sowie deren Anordnung und Ausrichtung zur einfallenden Radarstrahlung geformt. Demnach steht die Charakteristik der Oberflächenparameter mit den Messwerten der SAR-Parameter im Zusammenhang. Unter der Prämisse, dass die anderen Oberflächenparameter konstant gehalten werden oder deren Schwankungen unmaßgeblich sind, kann die Auswirkung der Variabilität eines einzelnen Oberflächenparameters wie beispielsweise der Bodenfeuchte auf die SAR-Parameter untersucht werden. Unter gewissen Voraussetzungen kann dann ein funktionaler Zusammenhang zwischen Oberflächen- und SAR-Parameter nachgewiesen werden. Zu diesen Voraussetzungen zählt beispielsweise eine ausreichende Variabilität des untersuchten Oberflächenparameters. Eine weitere Bedingung ist, dass der untersuchte Parameter in jenem Wertebereich variiert, in dem Parameterschwankungen eine signifikante Änderung der Rückstreucharakteristik bewirken. Am Beispiel der Bodenfeuchte lassen sich die beiden Voraussetzungen wie folgt erläutern. Die Variabilität der Bodenfeuchte muss eine Größenordnung aufweisen, die eine Änderung der Rückstreuintensität verursacht, die deutlich über der relativen Kalibriergenauigkeit des Sensors liegt. Um das Gewicht der anderen Oberflächenparameter zu minimieren, wäre eine Abdeckung des gesamten natürlichen Wertebereichs zwischen etwa 10% und 40% (volumetrische Bodenfeuchte) ideal. Innerhalb dieses Wertebereichs besteht zudem die höchste Sensitivität des SAR-Parameters für diese Größe. Ein weiterer Feuchteanstieg bewirkt kaum eine messbare Veränderung des Rückstreusignals.

In diesem Abschnitt wird als Grundlage der später folgenden Rückstreumodellierung und Modellinversion geprüft, ob die diesbezüglich notwendigen Voraussetzungen in Form elementarer Korrelationen zwischen den verschiedenen SAR- und Oberflächenparametern gegeben sind. Da diese Untersuchung für jeden Oberflächenparameter gesondert erfolgte, musste die Variabilität der anderen maßgeblichen Parameter minimiert werden. Im Fall der Bodenfeuchte bedeutet dies z.B., dass die Korrelationsanalysen feldweise durchgeführt wurden. Die Variabilität der Oberflächenrauigkeit, der Vegetation (sofern vorhanden) sowie des lokalen Einfallswinkels innerhalb des jeweiligen Feldes wurde vernachlässigt.

4.4.1 SAR-Parameter vs. Lokaler Einfallswinkel θ

Die Werte des Lokalen Einfallswinkels schwanken zwischen ca. 10° (sensorzugewandte Hangbereiche in *Near Range*) und ca. 80° (sensorabgewandte Hangbereiche in *Far Range*). Die theoretischen Extrema von 0° bzw. 90° können an Objektgrenzen wie Waldkanten ebenfalls verzeichnet werden.

Der Zusammenhang zwischen θ und Rückstreuintensität wird in erster Linie von den Streuobjekten selbst gesteuert. Im Allgemeinen nimmt die Intensität der Rückstreuung mit steigenden θ ab. Je größer der Lokale Einfallswinkel, desto größer ist der vom Sensor weg reflektierte Anteil der Strahlung. Dieser Zusammenhang gilt für glatte Oberflächen mit dominierender Oberflächenstreuung. Mit zunehmender Rauigkeit sowie Bewuchs steigt der Anteil an Volumenstreuung und die Abhängigkeit der Rückstreuintensität vom Lokalen Einfallswinkel geht zurück (LEWIS 1998, RANEY 1998). Für Waldgebiete ist letztlich ein deutlich geringerer Zusammenhang zwischen θ und der Rückstreuintensität festzustellen. Theoretische Spezialfälle wie Fresnel-, *Double Bounce*- oder Bragg-Streuung werden hier nicht berücksichtigt.

Abb. 4.26 zeigt die landbedeckungsspezifische Abhängigkeit der Rückstreuintensität vom Lokalen Einfallswinkel θ . Stellvertretend für die Intensität wurde der Kanal L-HH gewählt. Dieses Diagramm bestätigt die obigen Aussagen. Der größte Zusammenhang zwischen L-HH und θ ist für glatte Oberflächen zu finden. Für Waldflächen ist die Intensität nahezu unabhängig von θ .

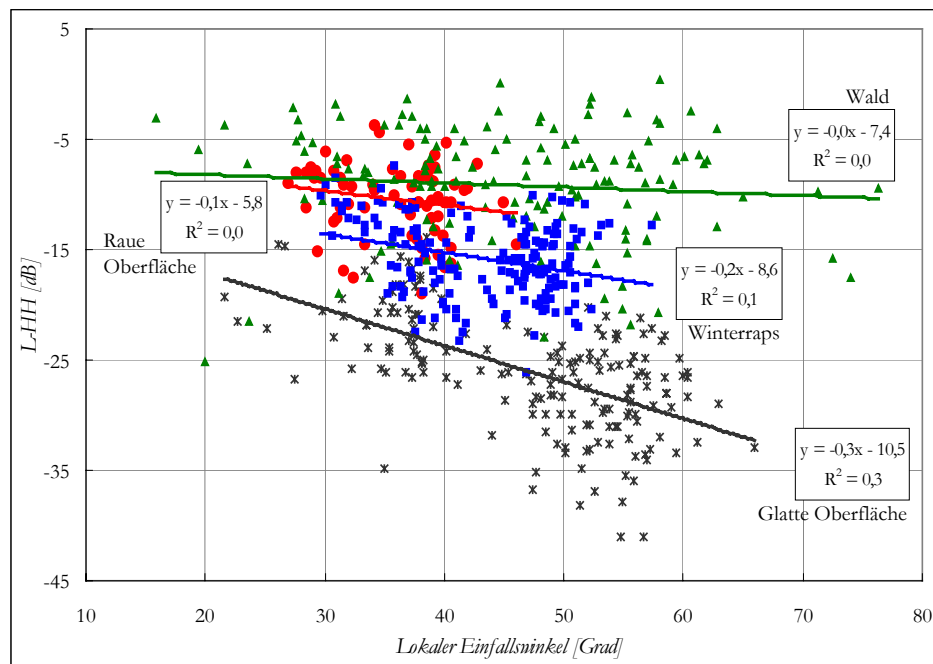


Abb. 4.26: Landbedeckungsspezifische Abhängigkeit der L-HH Intensität von θ

Zwar geht aus Abb. 4.26 hervor, dass der Zusammenhang zwischen L-HH und θ nicht signifikant ist. Gleichwohl kann der Einfluss des Lokalen Einfallswinkels bei der Rückstreumodellierung nicht vernachlässigt werden. Für glatte Oberflächen beispielsweise zieht die Änderung von θ um 30° eine Modifikation der Rückstreuintensität um 9 dB nach sich. Abb. 4.26 macht des Weiteren deutlich, dass θ nicht die einzige Steuergröße für die Rückstreuintensität ist. Die Untersuchung erfolgte unter Berücksichtigung der verschiedenen Landbedeckungen. Dennoch ist zu beachten, dass auch innerhalb einer Landbedeckungskategorie die Vegetationseigenschaften, die Bodenfeuchte oder die Oberflächenrauigkeit variieren.

Die festgestellte Beziehung zwischen θ und Rückstreuintensität ist konform mit den Aussagen der Fachliteratur (z.B. LEWIS 1998, LEWIS & HENDERSON 1998, RANEY 1998). Inwieweit sich jedoch der Lokale Einfallswinkel auf die Polarisationsparameter auswirkt, wurde bislang nicht umfassend analysiert. Da die geometrischen sowie dielektrischen Eigenschaften eines Streuobjektes für dessen Rückstreucharakteristik verantwortlich sind und diese Eigenschaften unabhängig vom Winkel der einfallenden Radarstrahlung bestehen, sollte eine diesbezügliche Unabhängigkeit der Art und Zahl der Streuprozesse anzunehmen sein. Hingegen ist bekannt, dass θ für die Charakterisierung der Rauigkeit einer Oberfläche sehr wohl eine Rolle spielt (ULABY et al. 1986). Ferner nimmt die Rückstreuintensität mit steigendem Lokalen Einfallswinkel ab, was den Anteil an Systemrauschen am Gesamtsignal erhöht. Dieser Effekt wird durch die glatter wirkende Oberfläche bei einem großem θ noch verstärkt. Demnach kann eine Abhängigkeit der Polarisationsparameter von θ nicht ausgeschlossen werden. Im Folgenden wird eine Analyse der Einfallswinkelabhängigkeit für die beiden Polarisationsparameter Alpha und Entropie erbracht.

Abb. 4.27 zeigt den landbedeckungsspezifischen Zusammenhang zwischen α und θ . Die Untersuchung erfolgte erneut für die Beispiellklassen „Wald“, „Winterraps“, „Raue Oberfläche“ und „Glatte Oberfläche“. Die Areale dieser Klassen decken ein ausreichendes Spektrum Lokaler Einfallswinkel ab. Zudem sind unterschiedliche Rückstreuprozesse zu erwarten. Augenfällig ist, dass bei sämtlichen Klassen der Alpha-Winkel mit steigendem Lokalen Einfallswinkel zunimmt. Dieser Trend ist allerdings äußerst schwach, wie die Standardfehler belegen. Die immense Streuung der Stichproben (in Form von Pixels) verhindert eine exakte Trendanalyse. Lediglich für den Bereich glatter Oberflächen kann von einem merklichen Zusammenhang zwischen Lokalem Einfallswinkel und Rückstreuprozess gesprochen werden. Ob-

wohl hier tatsächlich isotropische ungerade Streuung stattfindet, nimmt mit steigendem θ der Anteil anisotropischer gerader Streuung zu. Dies dürfte auf den steigenden Rauschanteil am Gesamtsignal zurückzuführen sein.

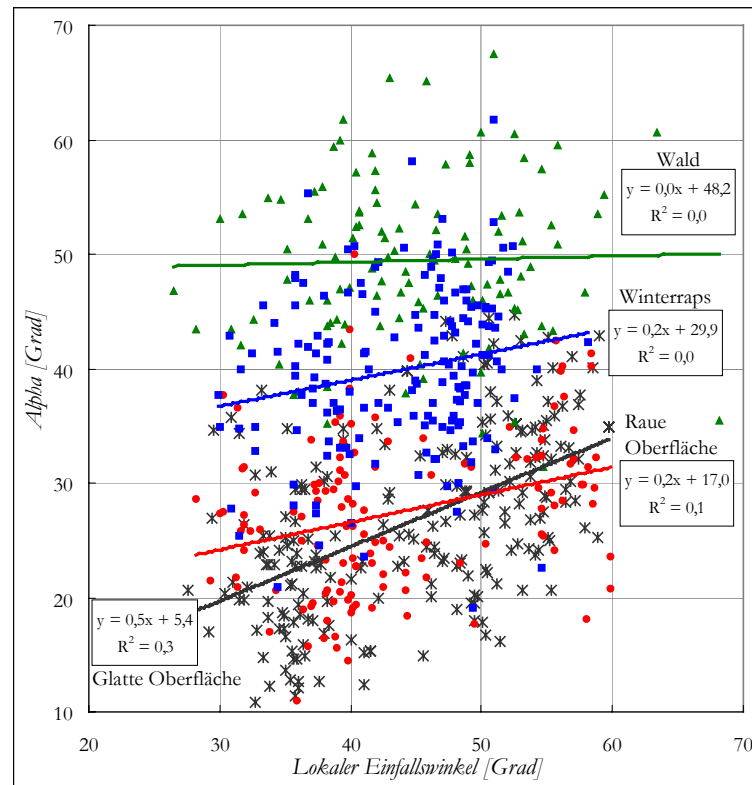


Abb. 4.27: Landbedeckungsspezifischer Zusammenhang zwischen α und θ

Für raue Oberflächen kann eine ähnliche Aussage getroffen werden, wobei dieser Trend aufgrund des höheren Rückstreusignals merklich geringer ausfällt. Auch hier führt der steigende Rauschanteil (Systemrauschen ist durch mittlere Alpha-Winkel typisiert) zu einem Anstieg von α . Die Annahme, dass durch große Lokale Einfallswinkel eine scheinbare Glättung der Oberfläche für das SAR erfolgt (siehe Punkt 2.3.1.1), kann somit nicht belegt werden.

Die ausgeprägte Streuung der Stichproben bei Wald und Winterraps geht in erster Linie auf Differenzen in der Ausprägung der Vegetation zurück. Die Entwicklung des Rückstreutyps mit steigendem θ lässt sich so nur schwer beurteilen. Dennoch ist denkbar, dass verschiedene Einfallswinkel unterschiedliche Rückstreutypen fördern. Bei Wald würde ein θ nahe 90° Volumenstreuung begünstigen. Die Streuung der EM Wellen erfolgt bei diesem flachen Winkel hauptsächlich im Kronendach. Steile Einfallswinkel ($\theta < 40^\circ$) hingegen begünstigen *Double Bounce* oder gar Oberflächenstreuung (wenn θ nahe Null). Ein vergleichbarer Effekt wäre auch für Feldvegetation wie Winterraps denkbar. Für eine Bestätigung dieser Thesen reicht allerdings der Datensatz nicht aus. Hierzu sind verschiedene Aufnahmen jeweils einer Testfläche mit unterschiedlichen Lokalen Einfallswinkeln erforderlich. Die weite Streuung der Alpha-Werte würde sich durch das Ausscheiden des Einflusses störend wirkender Parameter auf ein Minimum reduzieren, θ wäre dann der maßgebliche Parameter.

Ein ähnliches Bild wie für α ist auch für die Entropie zu finden (Abb. 4.28). Die Aussagen bezüglich des Zusammenhangs zwischen α und θ lassen sich durch dieses Diagramm bestätigen bzw. spezifizieren. Raue und glatte Oberflächen weisen hier denselben Trend auf. Die Zahl der Streuprozesse nimmt mit θ etwas

zu. Diese (nicht signifikante) Zunahme ist sicher mit dem steigenden Rauschanteil in Verbindung zu bringen. Noch geringer wirkt sich die Änderung des Lokalen Einfallswinkels für Waldflächen aus. Die schlechte Repräsentation des Zusammenhangs zwischen θ und H anhand der Trendlinie erlaubt keine detaillierte Interpretation. Ein höherer Rauschanteil dürfte hier jedoch aufgrund der hohen Rückstreuung keine Rolle spielen. Im untersuchten Wertebereich kann der Einfluss von θ auf H offenbar vernachlässigt werden. Am deutlichsten ist das Gewicht des Lokalen Einfallswinkels auf die Entropie bei Winterraps. Zwar kann auch hier nicht von einem signifikanten Zusammenhang gesprochen werden, dennoch nimmt für diese Landbedeckung die Zahl der an der Rückstreuung beteiligten Prozesse mit θ spürbar zu (um 0,3). Der mittlere Rückstretyp verändert sich mit θ jedoch kaum. Die Folgerung aus dieser Konstellation lautet somit, dass sich mit zunehmendem Lokalen Einfallswinkel die Anteile an *Double Bounce* und Oberflächenstreuung bzw. geradzahliger und ungeradzahliger anisotropischer Streuung erhöhen. Diese Prozesse besitzen jeweils gegenläufige Zahlenwerte (siehe Abb. 2.13). Im mittleren Streuprozess (a) kann diese Zusammensetzung jedoch nicht aufgelöst werden.

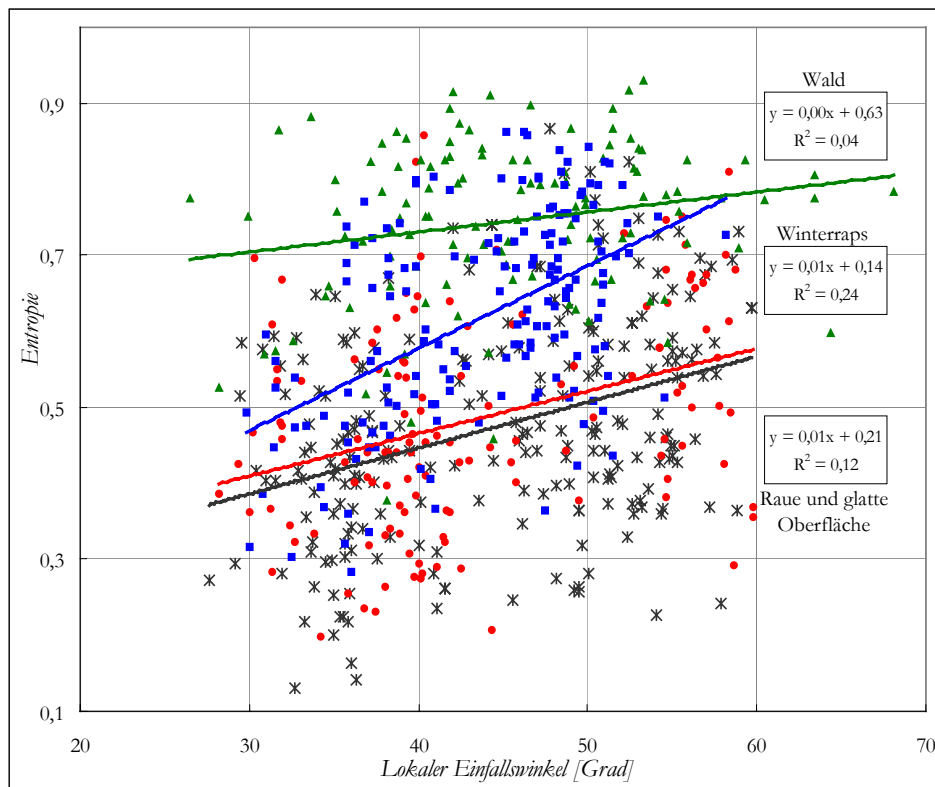


Abb. 4.28: Landbedeckungsspezifischer Zusammenhang zwischen H und θ

Zusammenfassend kann hier angemerkt werden, dass die Art und Zahl der tatsächlich gemessenen Rückstreuprozesse z.T. vom Wert des Lokalen Einfallswinkels beeinflusst werden. Die Ausmaße dieses Zusammenhangs richten sich nach der Landbedeckung bzw. dem Streuobjekt. Ob sich der Streuprozess tatsächlich ändert oder die Messung durch einen höheren Rauschanteil verfälscht wird, ist ebenfalls eine Funktion der Landbedeckung. Anhand der hier zur Verfügung stehenden Daten ist eine umfassende Prüfung der Wirkung des Lokalen Einfallswinkels auf die Polarisationsparameter nicht gegeben.

4.4.2 SAR-Parameter vs. Biomasse

In diesem Abschnitt werden die Geländemessungen der feuchten Biomasse mit den verschiedenen SAR-Parametern korreliert. Die Feldmessungen erfolgten für Winterraps, Feldgras, Winterweizen sowie Maisresiduen in Kilogramm pro Quadratmeter. Unter der Annahme, dass die Pflanzenstruktur zum Zeitpunkt der Befliegung aufgrund des frühen Wachstadiums keinen maßgeblichen Einfluss auf die Ausprägung der SAR-Parameter besitzt, wurde diese Analyse übergreifend für alle Pflanzentypen gemeinsam durchgeführt. Für eine pflanzenartspezifische Untersuchung war der Messprobenumfang nicht ausreichend. Da sich diese Untersuchung über die drei Aufnahmebereiche Rödersdorf, Tegau und Läwitz erstreckt, wirkt der variierende Lokale Einfallswinkel als Störgröße. Allerdings befinden sich alle beprobten Schläge größtenteils im mittleren *Range* Bereich, θ variiert um maximal 20° . Auch der Einfluss der Oberflächenrauigkeit gestaltet sich minimal. Der landwirtschaftliche Feldbearbeitungstyp für alle vier Feldfruchtarten ist Saattiefler. Demnach handelt es sich um glatte Oberflächen (im L-Band). Dennoch können Rauigkeitsschwankungen innerhalb sowie zwischen den Schlägen das Ergebnis beeinflussen. Einen weiteren Störfaktor in dieser Analyse stellt die Bodenfeuchte dar. Sie variiert an den Biomassemesststellen zwischen 15% und 30% volumetrischer Feuchte. Dies kann beispielsweise im Kanal L-VV eine Änderung der Rückstreuintensität von bis zu 5 dB nach sich ziehen (bei $\theta = 45^\circ$, $s = 1$ cm, $l = 4$ cm, siehe Punkt 4.5.4). Die Zusammenfassung verschiedener Pflanzentypen schließt ein weiteres Potenzial an Fehlern ein.

Die folgende Abb. 4.29 zeigt ein Diagramm für den Zusammenhang zwischen SAR-Parametern und feuchter Biomasse. Stellvertretend für eine hohe Korrelation wurde der Parameter a_2 gewählt. Dieser ergibt sich aus dem Streuvektor der zweiten Kohärenzmatrix bei der Dekomposition nach Cloude (Punkt 2.2.2.5). Demzufolge repräsentiert er den zweitrangigen Streuprozess. Die Kenngrößen bezüglich der Regressionsgeraden aller anderen SAR-Parameter sind in Tab. 4.13 zusammengefasst. Dabei steht m für den Anstieg der Geraden, n bezeichnet deren Schnittpunkt mit der Ordinate. Ferner repräsentieren R^2 den Standardfehler und r die Korrelation zwischen SAR-Parameter und Biomasse.

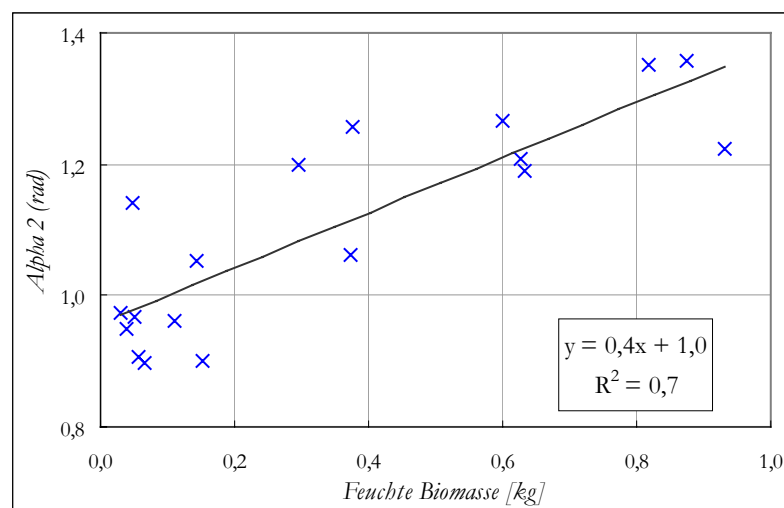


Abb. 4.29: Sensitivität des Parameters a_2 für feuchte Biomasse

Aus Tab. 4.13 geht hervor, dass neben a_2 auch a , a_1 , die Anisotropie sowie die dritte Hauptkomponente ($L-PC_3$) des L-Bandes mit der feuchten Biomasse korreliert sind. Die geringe Menge an feuchter Biomasse reicht offenbar aus, um Einfluss auf den Rückstreuprozess zu nehmen.

Parameter	m	n	R^2	r	Parameter	m	n	R^2	r
α_1	-0,5	0,79	0,57	0,75	$L-HH$	1,8	-13,8	0,05	0,23
α_2	0,4	1,00	0,70	0,84	$L-HV$	-0,9	-22,8	0,01	0,08
α_3	0,04	1,40	0,15	0,38	$L-VV$	-3,7	-11,5	0,29	0,54
α	14,9	26,0	0,63	0,80	$L-PC_1$	-657	62029	0,00	0,04
λ_1	-14900	56502	0,02	0,13	$L-PC_2$	-692	-26834	0,01	0,11
λ_2	3799,7	7617,1	0,04	0,21	$L-PC_3$	-5927	688	0,60	0,77
λ_3	-213,9	3708	0,00	0,02	$X-HH$	0,9	-6,7	0,04	0,20
H	0,2	0,52	0,34	0,58	$X-VV$	0,4	-7,1	0,01	0,08
\mathcal{A}	0,2	0,43	0,49	0,70					

Tab. 4.13: Korrelation zwischen feuchter Biomasse und SAR-Parametern inkl. Kenngrößen der Regressionsgeraden

Die ermittelten linearen Zusammenhänge zwischen den SAR-Parametern a , a_1 , a_2 , \mathcal{A} und $L-PC_3$ und der feuchten Biomasse wurden für die Berechnung von Biomassekarten herangezogen. Aus diesen vier Karten wurde schließlich durch Mittelung eine finale Karte für die feuchte Biomasse abgeleitet. Durch diese Vorgehensweise konnte die Biomasseinformation betont werden, während sich Rauschen und andere Störeinflüsse wie Variationen der Rauigkeit, der Bodenfeuchte sowie des Lokalen Einfallswinkels verringerten. Diese Tatsache bestätigte sich bei der Validierung dieser Karte. Es wurde ein Korrelationskoeffizient von $r = 0,91$ ermittelt. Die Regressionsgerade beginnt im Koordinatenursprung und weist einen Anstieg von $m = 1,04$ auf.

Abb. 4.30 zeigt die auf der vorgestellten Analyse basierende Karte. Die ausmaskierten Bereiche umfassen Wald, Siedlung und Wasser. Die Maske entstammt der Landbedeckungsklassifikation aus Punkt 4.2.1.1 Zur besseren Visualisierung wurden die Schlaggrenzen aus der GIS-Datenbank eingeblendet. Die Biomasseunterschiede zwischen den einzelnen Feldern treten deutlich hervor. Stellenweise stimmen, wie z.B. im Osten des Untersuchungsgebietes, Feld- und Schlaggrenzen nicht überein. Die scharfen Biomassegrenzen sind hier nicht (wie z.T. auf anderen Feldern) durch feldinterne Wachstumsunterschiede bedingt. Gut zu erkennen sind die mit Winterraps bestandenen Schläge (blau). Die feuchte Biomasse ist hier am größten. Im mittleren Bereich liegen Feldgras und Grünland (grün). Winterweizen hingegen ist aufgrund der sehr geringen Biomasse von unbestandenem Boden kaum zu unterscheiden. In diesem Entwicklungsstadium kann der Einfluss von Winterweizen auf das Rückstreusignal vernachlässigt werden. Mit Maisresiduen bestandene Schläge (Biomassemesspunkte bei Tegau, siehe Punkt 3.2.2) sind durch geringe bis mittlere Biomassewerte sowie eine hohe Heterogenität gekennzeichnet. Diese Heterogenität könnte mit der Dichte sowie der Ausrichtung der Maisstrünke in Verbindung gebracht werden. Leider standen diesbezüglich jedoch keine Daten zur Verfügung.

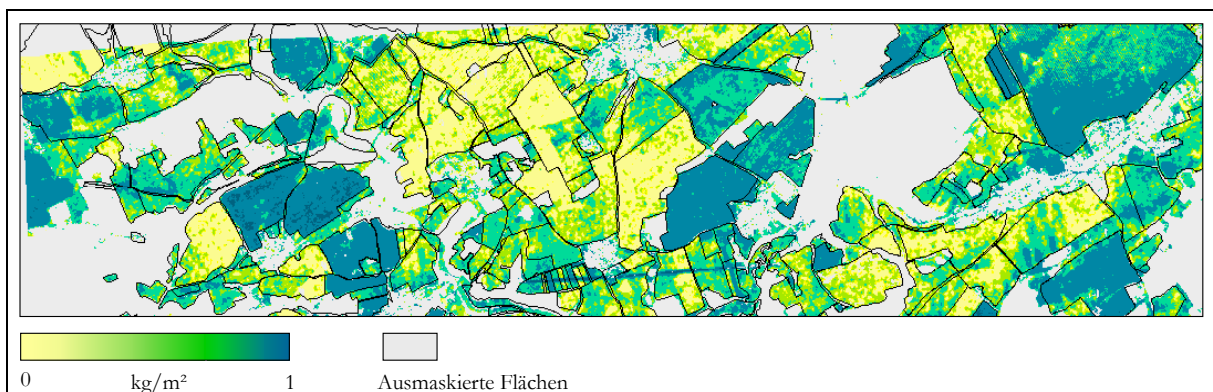


Abb. 4.30: Biomassekarte aus SAR-Daten basierend auf Korrelationsanalyse

4.4.3 SAR-Parameter vs. Oberflächenrauigkeit

Die Analyse der Beziehung zwischen Oberflächenrauigkeit und SAR-Parametern erfolgt analog zum vorherigen Punkt (4.4.2). In diesem Fall wirken die Variationen der Biomasse, der Bodenfeuchte und jene des Lokalen Einfallswinkels störend auf den Zusammenhang zwischen Rauigkeits- und SAR-Parametern. Neben den bereits vorgestellten SAR-Parametern wird zusätzlich die Sensitivität des Realteils der RLL-Kohärenz $\text{Re}[\rho_{\text{RLL}}]$ (Gl. 2.92) hinsichtlich der Rauigkeit überprüft.

Die Oberflächenrauigkeit wurde im Gelände an insgesamt 27 Standorten aufgenommen. Von diesen Messungen konnten allerdings nur 21 ausgewertet werden. Die Bestimmung der Rauigkeitsparameter der restlichen Messpunkte wurde durch zu dichte Feldvegetation verhindert. Ferner konnten die Messungen weiterer fünf Standorte nicht in die Korrelationsanalyse einbezogen werden. Diese Messstellen sind auf den durch Bragg-Streuung gekennzeichneten Schlägen am Nordrand des Untersuchungsgebietes gelegen. Diese spezielle Charakteristik der Rückstreuung (Abb. 4.9) kann nicht mit den erhobenen Parametern Autokorrelationslänge und RMS-Höhe in Verbindung gebracht werden. Zudem befindet sich eine dieser Messungen unterhalb der Hochspannungsleitung. Somit verbleiben für diese Untersuchung 16 Messwerte für s und l , wobei diese jeweils parallel sowie senkrecht zur Flugrichtung des Sensors aufgezeichnet wurden.

Aus Abb. 4.31 ist das Spektrum der Messwerte für k_s und k_l entsprechend der Geländeaufnahmen parallel zur Flugrichtung zu entnehmen. In das Diagramm wurde der Gültigkeitsbereich des SPM skizziert. Der Großteil der Rauigkeitsprofile ließe demnach eine Anwendung dieses Modells zu. Diese Werte erfüllen ebenso die Bedingungen des Fraunhofer Kriteriums für glatte Oberflächen (Gl. 2.60). Die restlichen fünf Rauigkeitsmesswerte liegen außerhalb des Gültigkeitsbereichs der unter Punkt 2.3.2.1.2 vorgestellten theoretischen Rückstreumodelle SPM, GOM und POM. Das IEM Modell kann jedoch über den gesamten Rauigkeitsbereich angewandt werden.

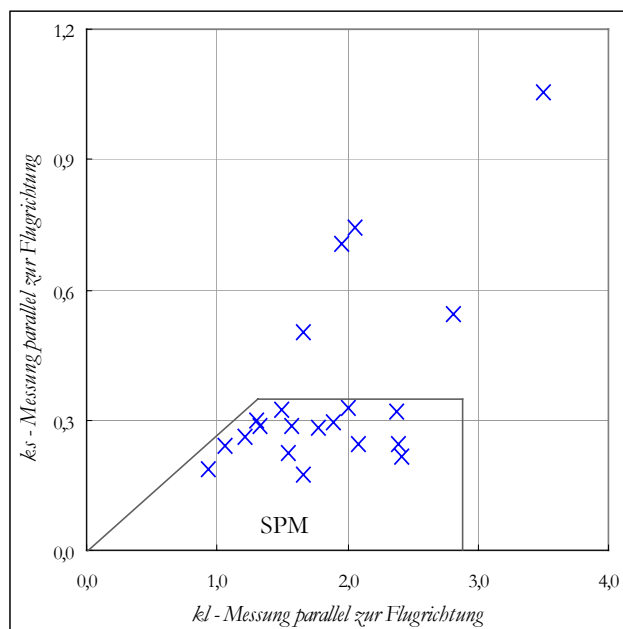


Abb. 4.31: Messwerte für k_s und k_l parallel zur Flugrichtung

Die folgende Abb. 4.32 zeigt beispielhaft den Zusammenhang zwischen der senkrecht zur Flugrichtung gemessenen RMS-Höhe und dem ersten Eigenwert der Kohärenzmatrix (λ_1). Laut dieser Darstellung steigt mit s die Intensität des dominanten Rückstreumechanismus. Die Kenngrößen bezüglich der Regres-

sionsgeraden aller anderen SAR-Parameter sind analog zu Punkt 4.4.2 in den Tabellen 4.14 - 4.17 zusammengefasst. Die beiden ersten Tabellen beinhalten die Zahlenwerte betreffs der RMS-Höhe (zuerst orthogonal, dann parallel zur Flugrichtung), die folgenden beiden bezüglich der Autokorrelationslänge.

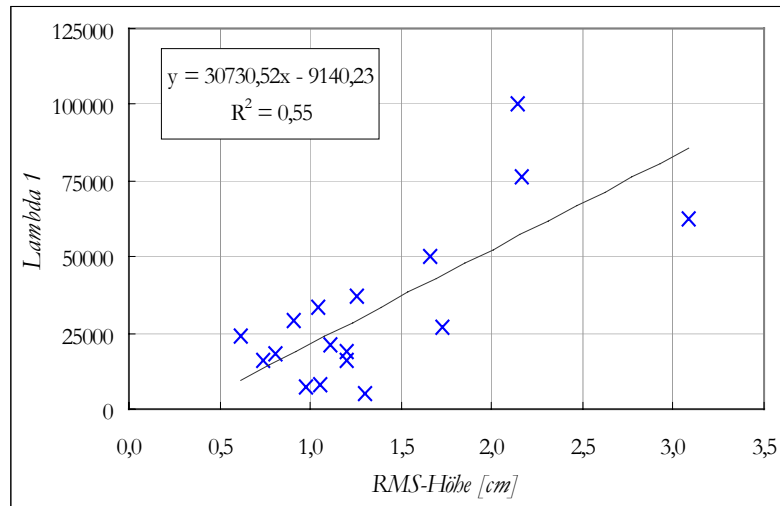


Abb. 4.32: Sensitivität des Parameters λ_1 für die RMS-Höhe (orthogonal zur Flugrichtung)

Parameter	m	n	R^2	r	Parameter	m	n	R^2	r
a_1	0,14	0,38	0,38	0,61	$L-HH$	2,2	-15,8	0,23	0,48
a_2	-0,19	1,36	0,36	0,60	$L-HV$	2,4	-25,1	0,22	0,47
a_3	0,00	1,55	0,00	0,00	$L-VV$	0,9	-14,2	0,11	0,32
a	-1,7	29,2	0,04	0,19	$L-PC_1$	6709	45861	0,21	0,46
λ_1	30731	-9140	0,55	0,74	$L-PC_2$	-879	-26813	0,05	0,23
λ_2	2518	278	0,22	0,47	$L-PC_3$	-1070	124	0,11	0,33
λ_3	1842	-759	0,51	0,72	$X-HH$	0,6	-6,2	0,25	0,50
H	0,01	0,53	0,00	0,07	$X-VV$	0,5	-6,8	0,13	0,35
\mathcal{A}	-0,01	0,47	0,03	0,17					

Tab. 4.14: Korrelation zwischen RMS-Höhe (orthogonal zur Flugrichtung) und SAR-Parametern

Parameter	m	n	R^2	r	Parameter	m	n	R^2	r
a_1	0,08	0,46	0,23	0,48	$L-HH$	1,7	-15,1	0,29	0,53
a_2	-0,11	1,24	0,24	0,49	$L-HV$	1,6	-24,1	0,22	0,46
a_3	0,02	1,53	0,02	0,15	$L-VV$	0,9	-14,2	0,11	0,32
a	-0,80	27,87	0,02	0,13	$L-PC_1$	4678	48668	0,21	0,46
λ_1	22323	2522	0,61	0,78	$L-PC_2$	-714	-27046	0,07	0,27
λ_2	2035	958	0,30	0,55	$L-PC_3$	-1116	172	0,24	0,49
λ_3	1376	-112	0,60	0,78	$X-HH$	0,6	-6,2	0,25	0,50
H	0,03	0,51	0,05	0,22	$X-VV$	0,3	-6,6	0,11	0,33
\mathcal{A}	-0,00	0,45	0,00	0,02					

Tab. 4.15: Korrelation zwischen RMS-Höhe (parallel zur Flugrichtung) und SAR-Parametern

Parameter	m	n	R^2	r	Parameter	m	n	R^2	r
a_1	0,01	0,50	0,02	0,15	$L-HH$	0,3	-14,8	0,05	0,22
a_2	-0,01	1,17	0,01	0,12	$L-HV$	0,1	-22,3	0,00	0,04
a_3	0,02	1,38	0,32	0,57	$L-VV$	-0,2	-11,8	0,02	0,14
a	-0,79	32,49	0,10	0,32	$L-PC_1$	201	53492	0,00	0,05
λ_1	4213	2112	0,13	0,37	$L-PC_2$	-50	-27665	0,00	0,04
λ_2	479	236	0,10	0,32	$L-PC_3$	-600	2995	0,44	0,66
λ_3	312	-511	0,19	0,44	$X-HH$	0,2	-6,8	0,16	0,40
H	0,02	0,41	0,15	0,39	$X-VV$	0,2	-7,4	0,19	0,43
\mathcal{A}	0,01	0,41	0,07	0,27					

Tab. 4.16: Korrelation zwischen der Autokorrelationslänge (orthogonal zur Flugrichtung) und SAR-Parametern

Parameter	m	n	R^2	r	Parameter	m	n	R^2	r
a_1	0,01	0,47	0,06	0,25	$L-HH$	0,2	-14,4	0,04	0,21
a_2	-0,02	1,25	0,07	0,27	$L-HV$	0,2	-23,0	0,02	0,13
a_3	0,01	1,48	0,09	0,29	$L-VV$	0,0	-13,2	0,00	0,03
a	-0,85	32,53	0,14	0,38	$L-PC_1$	462	51835	0,02	0,13
λ_1	3911	6189	0,14	0,37	$L-PC_2$	-96	-27357	0,01	0,10
λ_2	169	2551	0,02	0,12	$L-PC_3$	-285	589	0,12	0,35
λ_3	232	173	0,13	0,36	$X-HH$	0,1	-5,8	0,03	0,16
H	0,01	0,51	0,02	0,12	$X-VV$	0,1	-6,6	0,03	0,18
\mathcal{A}	-0,00	0,46	0,01	0,08					

Tab. 4.17: Korrelation zwischen der Autokorrelationslänge (parallel zur Flugrichtung) und SAR-Parametern

Grundsätzlich ist zu diagnostizieren, dass die RMS-Höhe eher mit den SAR-Parametern in Verbindung gebracht werden kann als die Autokorrelationslänge. Insbesondere die Rückstreuintensitäten inklusive der Eigenwerte werden durch diesen Rauigkeitsparameter beeinflusst. Ebenso ist eine gewisse Abhängigkeit des ersten sowie des zweiten Streumechanismus (a_1 & a_2) von s festzustellen. Die Messrichtung der Rauigkeit besitzt offenbar keinen ausgeprägten Einfluss auf die Korrelationen. Dies war allerdings zu erwarten, da bezüglich der RMS-Höhe eine deutliche Abhängigkeit zwischen beiden Messrichtungen offengelegt wurde (Abb. 4.4).

Dennoch muss festgehalten werden, dass die Datenlage keine sichere Korrelationsanalyse erlaubt. Diesbezüglich ist ein weiteres Spektrum an Rauigkeitsdaten erforderlich. Vor allem mangelt es an Messpunkten mit hohen Werten für s und l . Des Weiteren ist zu beachten, dass die ersten beiden Rückstreumechanismen a_1 & a_2 ebenfalls eine Sensitivität für die feuchte Biomasse besitzen. Inwieweit diese Sensitivitätsüberlagerung aus Zusammenhängen zwischen Biomasse und Rauigkeit hervorgeht (z.B. sind frisch gepflügte Felder i.d.R. vegetationsfrei, bestandene Felder sind vorzugsweise glatt), kann nicht eindeutig geklärt werden. Für diese Tatsache sprächen allerdings die entgegengesetzten Trends für a_1 und a_2 . Außerdem kann bezüglich der Beziehungen zwischen RMS-Höhe und SAR-Parametern kaum von Korrelationen gesprochen werden. Dies gilt insbesondere für die Polarisationsparameter a , H und \mathcal{A} . Das vorgefundene Spektrum an Oberflächenrauigkeiten genügt demnach nicht, um im L-Band verschiedene Rückstreuprozesse hervorzurufen. Lediglich der erste sowie der dritte Eigenwert eignen sich für eine SAR-datenbasierte Ableitung von s . Allerdings stützt sich auch dieser Zusammenhang nur auf wenige Messwerte im hohen Rauigkeitsbereich. Auf die Generierung einer RMS-Höhenkarte wurde daher verzichtet.

Die Autokorrelationslänge ist mit keinem SAR-Parameter direkt korreliert. Dies betrifft beide Messrichtungen. Dieser Parameter spielt offenbar bei der Beschreibung der SAR-relevanten Rauigkeit landwirtschaftlicher Nutzflächen verglichen mit der RMS-Höhe eine untergeordnete Rolle. Hier wird / vor allem dann interessant, wenn die Oberfläche als Folge der Bearbeitung (unter Berücksichtigung von θ) die Bragg-Rückstreukonditionen erfüllt. Sind keine Reihenstrukturen vorhanden oder verläuft das Messprofil parallel zur Bearbeitungsrichtung, besitzt die Autokorrelationslänge, welche die periodischen Elemente im Rauigkeitsprofil erfassen soll, eine geringe Aussagekraft. Auf der anderen Seite muss erwähnt werden, dass die Autokorrelationslänge im Gelände aufgrund der zu kurzen Messprofile (siehe LE TOAN et al. 1998 und DAVIDSON et al. 2000) eventuell nicht korrekt bzw. nicht in der SAR-relevanten Skala erfasst werden konnte (vgl. Punkt 2.3.1.1).

MATTIA et al. (1997) als auch SCHULER et al. (2001 & 2002) stellten in ihren Untersuchungen fest, dass mit steigender Oberflächenrauigkeit eine Abnahme der polarimetrischen Kohärenz zwischen zwei kopolarisierten Kanälen zu verzeichnen ist. Besondere Eignung für die Ableitung der RMS-Höhe erfährt dabei der Realteil der polarimetrischen Kohärenz in der zirkulären Basis $\text{Re}[\rho_{\text{RRL}}]$. Dieser Parameter besitzt eine hohe Sensitivität für die Rauigkeit, wird jedoch durch Feldvegetation kaum beeinflusst (siehe Punkt 2.3.2.2.3). In der folgenden Abb. 4.33 werden Absolutwert und Realteil der RRL-Kohärenz für den zentralen Teil des Untersuchungsgebietes (hier erfolgten die Geländeaufnahmen) vorgestellt.

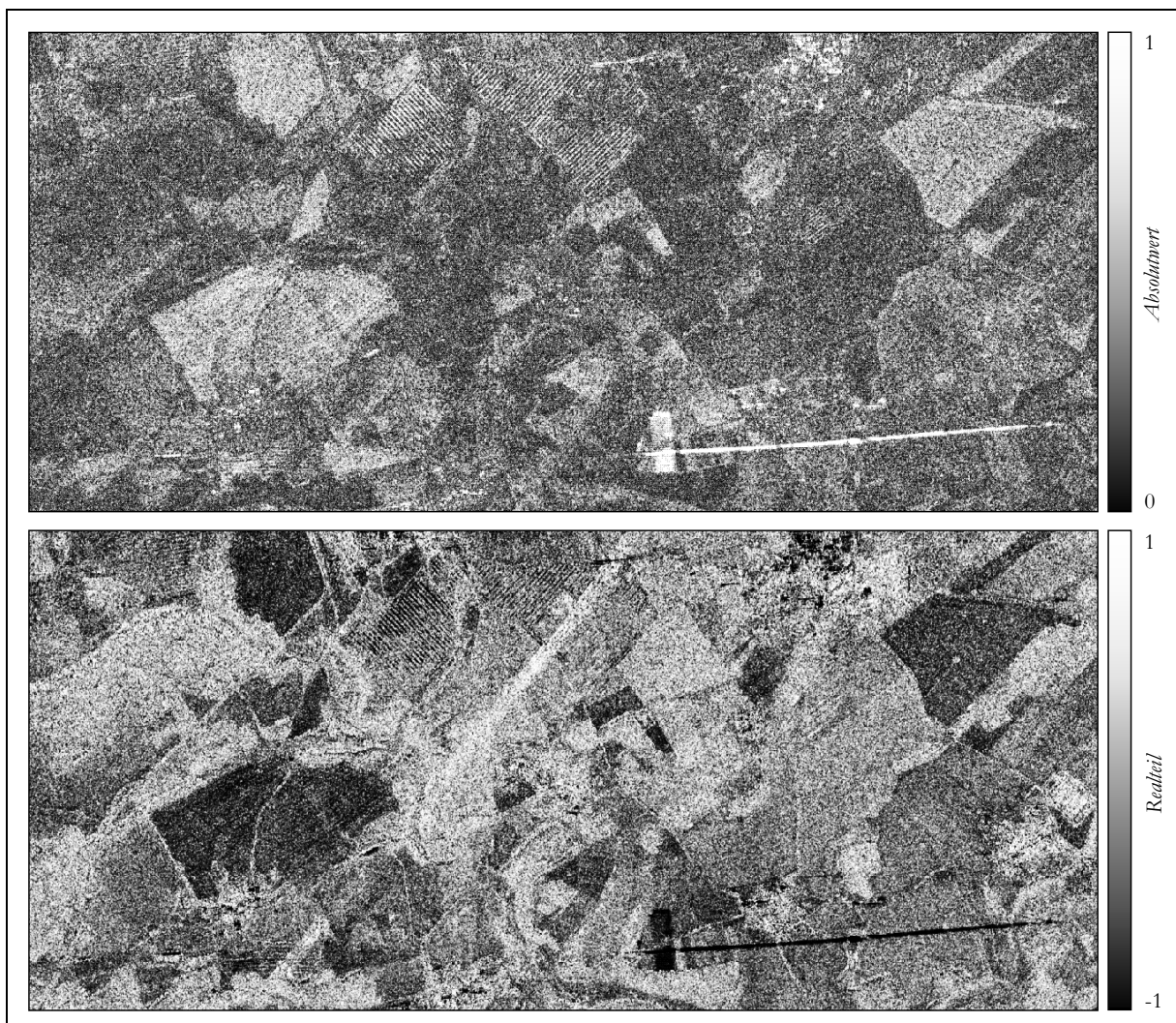


Abb. 4.33: Absolutwert und Realteil der RRL-Kohärenz

Das obere Bild zeigt den Absolutwert der RRLK-Kohärenz. Helle Areale repräsentieren hohe Kohärenzwerte. Dies sind beispielsweise die *Double Bounce* Bereiche in Siedlungen, die in Flugrichtung verlaufende Hochspannungsleitung oder glatte Oberflächen mit einer ausreichenden Rückstreuintensität. Im Gegensatz dazu stehen Waldflächen oder sehr raue Felder. Hier werden nur sehr geringe Kohärenzwerte erreicht. In diesen Fällen sind Phase und Amplitude der rückgestreuten EM-Welle von der Polarisation der ausgesandten Welle abhängig.

Der Realteil der RRLK-Kohärenz (unteres Bild in Abb. 4.33) kann Werte zwischen +1 und -1 annehmen. Zwar ist $\text{Re}[\rho_{\text{RRLK}}]$ stark mit dem Absolutwert korreliert. Der Vorteil dabei besteht jedoch im geringeren Vegetationseinfluss (Feldvegetation) auf diesen Parameter (SCHULER et al. 2001 & 2002). Die Werte für $\text{Re}[\rho_{\text{RRLK}}]$ nehmen mit der Rauigkeit zu. SCHULER et al. (2001 & 2002) stellten fest, dass diese Abhängigkeit bis $k_s = 1$ besteht. Bei weiter steigender Rauigkeit kommt es zu einer vollständigen Dekorrelation und die Werte für die RRLK-Kohärenz sind zufallsverteilt. Die zur Verfügung stehenden Daten für k_s überschreiten diesen Grenzwert jedoch nicht.

Das Diagramm in Abb. 4.34 zeigt den Zusammenhang zwischen $\text{Re}[\rho_{\text{RRLK}}]$ und RMS-Höhe. Auffällig ist die Überschätzung des Realteils der RRLK-Kohärenz für RMS-Höhen kleiner 0,9 cm. Für eine ideale lineare Korrelation müssten die Werte für $\text{Re}[\rho_{\text{RRLK}}]$ um etwa 0,3 kleiner sein. Dieses Problem betrifft dabei sämtliche Bildbereiche mit sehr geringer Rückstreuintensität. So wurde ebenfalls für Wasserflächen eine vollständige Dekorrelation zwischen beiden kopolarisierten Kanälen in der zirkulären Basis diagnostiziert. Aufgrund der idealen glatten Oberfläche wäre allerdings eine sehr hohe Kohärenz zu erwarten. Offenbar verfälscht auch hier der mit der Abnahme der Rückstreuintensität steigende Anteil an Phasenrauschen den Messwert der RRLK-Kohärenz. Dies gilt insbesondere für die äußerst geringen Rückstreuintensitäten der Kreuzpolarisationen in der linearen HV-Basis. Für die Basistransformation in die zirkuläre RL-Basis ist jedoch die komplette Streumatrix inklusive der Kreuzpolarisationen notwendig. Eventuelle Messfehler wie Phasenrauschen sind demnach als Folgefehler auch in den Kopolarisationen der RL-Basis zu finden.

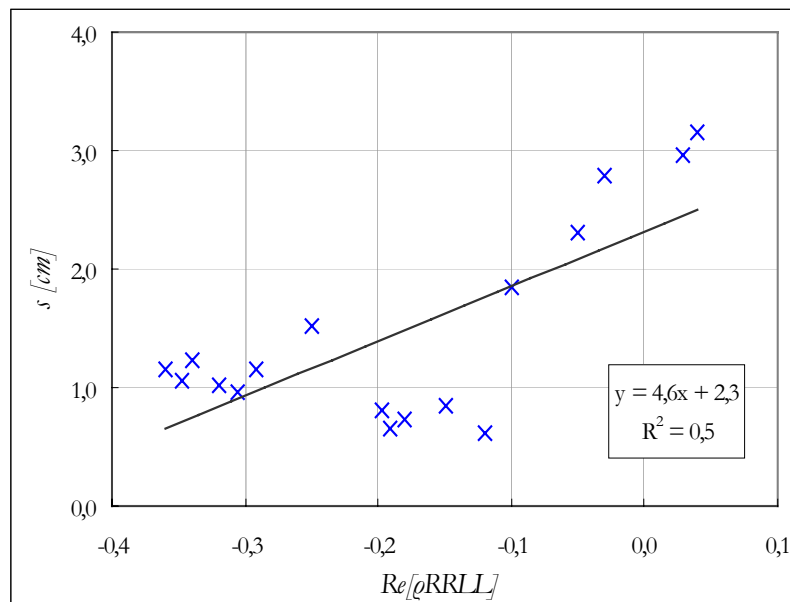


Abb. 4.34: $\text{Re}[\rho_{\text{RRLK}}]$ vs. RMS-Höhe (Messung parallel zur Flugrichtung)

Aus diesem Grund wurden später Bildbereiche mit einer L-HV Rückstreuintensität kleiner -30 dB ausmaskiert. Die Berechnung der RMS-Höhe für das übrige Gebiet erfolgte auf Basis der linearen Korrelation zwischen s und $\text{Re}[\rho_{\text{RRLK}}]$, wobei die Herleitung dieses Zusammenhangs unter Ausschluss der besagten RMS-Höhen ($s < 0,9$) vollzogen wurde. Um Rauigkeitswerte für die ausmaskierten Areale zu gewinnen,

wurde hier die L-HV Rückstreuintensität mit der RMS-Höhe in Beziehung gesetzt. Die geringe Schwankungsbreite der Rauigkeit für $s < 0,9$ erlaubt zwar diesbezüglich keine exakte Analyse. Da es sich jedoch bei den ausmaskierten Bereichen nur um kleine Flächen handelt, kann dieses Vorgehen gebilligt werden. Die folgende Abb. 4.35 zeigt das Resultat der Ableitung der Oberflächenrauigkeit aus polarimetrischen SAR-Daten in Form einer Karte der RMS-Höhe für Acker- und Grünlandflächen. Alle restlichen Bildbereiche wurden ausmaskiert. Die Homogenisierung erfolgte anhand eines 7×7 m Mittelwertfilters. Zur besseren Lesbarkeit der Karte sind die Feldgrenzen abgebildet. Deutlich erkennbar sind die Rauigkeitsunterschiede zwischen den verschiedenen Feldern, während die feldinternen Varianzen in den Hintergrund treten. Ausnahmen bilden Felder mit uneinheitlichem Bearbeitungszustand. Zu beachten ist, dass im Bereich von Überlandhochspannungsleitungen fehlerhafte RMS-Höhen berechnet werden. Der Standardfehler R^2 der 1:1 Linie zwischen gemessener und abgeleiteter RMS-Höhe lautet 0,86.

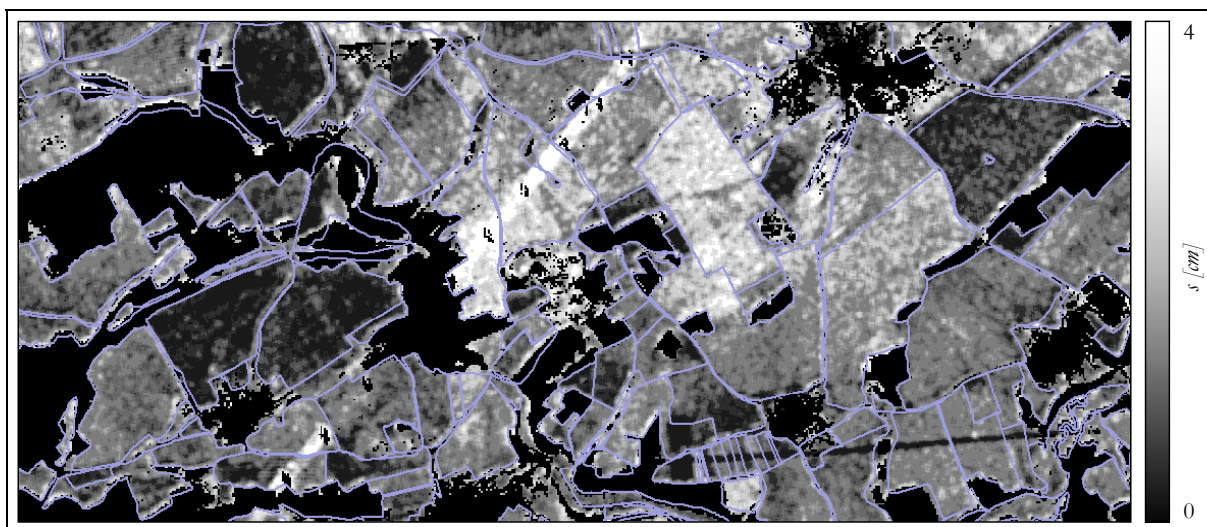


Abb. 4.35: Anhand $\text{Re}[\rho_{\text{RRL}}]$ abgeleitete Karte für s (orthonormal zur Flugrichtung)

Analog zur RRL-Kohärenz wurde die RMS-Höhe auch dem Grad der Polarisation der EM-Welle (vgl. Punkt 2.2.2.3.1) gegenübergestellt. Der Grundgedanke dieses Ansatzes ist, dass sich mit steigender Oberflächenrauigkeit der Anteil polarisierter Strahlung an der Rückstreuung verringert. Dieser Zusammenhang konnte zwar bestätigt werden, dennoch ist die Abhängigkeit des Polarisationsgrades von der RMS-Höhe weniger signifikant als jene der RRL-Kohärenz. Daher wurde diese Methode nicht weiter verfolgt.

4.4.4 SAR-Parameter vs. Bodenfeuchte

Die empirische Analyse der Sensitivität der SAR-Parameter hinsichtlich Bodenfeuchte kann nicht für das Untersuchungsgebiet als ganzes durchgeführt werden. Der Einfluss der Variabilität der Biomasse, der Oberflächenrauigkeit sowie des Lokalen Einfallswinkels θ auf das Rückstreusignal übersteigt den Effekt der Bodenfeuchte auf die Radarrückstreuung. Als Untersuchungseinheiten für die empirische Analyse eignen sich in der Regel einzelne Felder. Als Bewirtschaftungseinheiten weisen diese eine annähernd konstante Rauigkeit sowie Biomasse auf. Allerdings ist hier auf eine eventuelle Variabilität der Bearbeitungsrichtung sowie Unterschiede in der Ausprägung der Feldvegetation (topographische Effekte, Störungen bei der Aussaat, etc.) zu achten. Bezüglich des Lokalen Einfallswinkels ist festzustellen, dass dieser aufgrund seiner geringen Schwankungen innerhalb eines Feldes das Rückstreusignal kaum beeinflusst. Even-

tuelle Ausnahmen ergeben sich, sofern sich ein Feld über ein topographisch variables Areal (Senke, Kuppe o.ä.) erstreckt und dadurch ein immenses Spektrum für θ hervorgerufen wird.

Insgesamt wurden auf neun verschiedenen Feldern Bodenfeuchteprofile aufgenommen (vgl. Abb. 3.3). Die beiden nördlichen Felder aus dem Aufnahmebereich Tegau müssen aufgrund der Bragg-Streuung aus der Untersuchung ausgeschlossen werden. Das südliche Feld dieses Aufnahmebereichs weist große Unterschiede im Bearbeitungszustand auf. Es ist nur zum Teil frisch gepflügt mit RMS-Höhen um 3 cm (Feld Tegau Süd, Bereich Nord). Auf dem mittleren Teil (Feld Tegau Süd, Bereich Mitte) sind bei mittlerer Rauigkeit Maisresiduen des Vorjahres zu finden. Das südliche Areal (Feld Tegau Süd, Bereich Süd) ist vegetationsfrei und besitzt ebenfalls eine mittlere Rauigkeit. Für die Untersuchung wurde dieses Feld entsprechend unterteilt. Das südlichste (kleinste) Feld im Aufnahmebereich Rödersdorf wird von einer Hochspannungsüberlandleitung abgeschirmt. Eine korrekte Messung der Radarparameter ist hier nicht zu erwarten. Somit bleiben sechs Felder für die Untersuchung, wobei zwei dieser Felder mit Winterraps bestanden sind. Auf einem dritten Feld wurde Futtergras angebaut. Die Feldfrüchte dieser Schläge, insbesondere jene mit Winterraps, weisen bereits eine hohe Biomasse auf. Eine entsprechende Dämpfung des Bodenfeuchtesignals ist hier zu erwarten.

Aus der Korrelationsanalyse geht hervor, dass vor allem die Radarintensitäten des L-Bandes sowie die auf diesen Intensitäten beruhenden SAR-Parameter, wie die Eigenwerte der Kohärenzmatrix und die Hauptkomponenten des L-Bandes, sensitiv für Bodenfeuchte sind. In Bezug auf die L-Band Intensitäten weist insbesondere der Kanal L-VV eine hohe Empfindlichkeit für die dielektrischen Eigenschaften des Bodens auf (vgl. Abb. 4.36). Diese Beobachtung deckt sich zudem mit den Aussagen theoretischer Rückstreumodelle. Die besten Korrelationen zwischen Bodenfeuchte und SAR-Parametern wurden für die Felder Tegau Süd, Bereich Süd und Läwitz West gefunden. Beide Felder besitzen ein hohes Bodenfeuchtespektrum. Die Werte liegen in etwa zwischen 10% und 35% volumetrischer Bodenfeuchte (siehe z.B. Abb. 4.36). In diesem Bereich besitzt die Bodenfeuchte die größte Wirkung auf das Rückstreusignal. Außerdem sind beide Felder nahezu vegetationsfrei. Die Oberflächenrauigkeit des Feldes Läwitz West ist gering, jene des Feldes Tegau Süd, Bereich Süd liegt im mittleren Spektrum. Es bestehen ideale Verhältnisse für die Extrahierung der Bodenfeuchteinformation aus dem Radarsignal. Tab. 4.18 und 4.19 fassen die Kennwerte der Korrelationsanalyse analog zu den Punkten 4.4.2 & 4.4.3 für beide Felder zusammen.

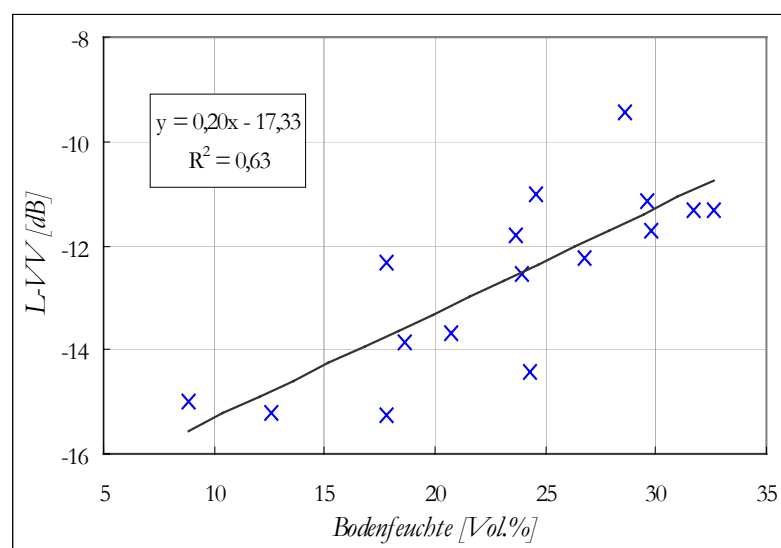


Abb. 4.36: L-VV vs. Bodenfeuchte, Feld Tegau Süd, Bereich Süd

Parameter	m	n	R^2	r	Parameter	m	n	R^2	r
a_1	0,00	0,57	0,07	0,26	$L-HH$	0,05	-13,6	0,13	0,36
a_2	-0,00	1,06	0,05	0,22	$L-HV$	0,14	-23,6	0,56	0,75
a_3	-0,00	1,59	0,10	0,32	$L-VV$	0,12	-14,4	0,46	0,68
a	0,19	34,0	0,07	0,26	$L-PC_1$	354,6	50697	0,54	0,74
λ_1	664,9	9583,3	0,34	0,58	$L-PC_2$	-11,9	-27790	0,00	0,04
λ_2	63,7	1279,2	0,28	0,53	$L-PC_3$	106,8	-2608,1	0,70	0,84
λ_3	31,8	647,7	0,28	0,53	$X-HH$	0,05	-6,7	0,21	0,46
H	-0,00	0,48	0,00	0,01	$X-VV$	0,07	-7,5	0,15	0,39
\mathcal{A}	0,00	-0,77	0,00	0,01					

Tab. 4.18: Korrelation zwischen volumetrischer Bodenfeuchte und SAR-Parametern, Feld Lävitz West

Parameter	m	n	R^2	r	Parameter	m	n	R^2	r
a_1	0,00	0,55	0,01	0,10	$L-HH$	0,11	-13,9	0,33	0,57
a_2	-0,00	1,14	0,03	0,17	$L-HV$	0,06	-21,3	0,10	0,32
a_3	0,01	1,45	0,35	0,59	$L-VV$	0,20	-17,3	0,63	0,79
a	-0,07	36,8	0,02	0,13	$L-PC_1$	425,8	49491	0,46	0,68
λ_1	1126,7	-975,3	0,45	0,67	$L-PC_2$	-222,8	-21801	0,33	0,57
λ_2	138,8	1099,5	0,32	0,56	$L-PC_3$	80,7	-4949	0,36	0,61
λ_3	49,9	785,0	0,24	0,49	$X-HH$	0,07	-7,52	0,23	0,48
H	-0,01	0,71	0,22	0,47	$X-VV$	0,08	-8,07	0,45	0,70
\mathcal{A}	0,00	0,57	0,25	0,50					

Tab. 4.19: Korrelation zwischen volumetrischer Bodenfeuchte und SAR-Parametern, Feld Tegau Süd, Bereich Süd

Die Korrelationen für die restlichen Felder sind weniger deutlich ausgeprägt. Ursachen hierfür sind zum einen das geringe Bodenfeuchtespektrum und der damit in Verbindung stehende geringe Effekt auf das Rückstreusignal (Feld Rödersdorf West). Zum anderen wird offenbar das Bodenfeuchtesignal durch den Bewuchs (v.a. bei Winterraps) derart gedämpft, dass keine signifikante Korrelation zwischen Bodenfeuchte und Radarparametern festzustellen ist (Felder Rödersdorf Nord & Lävitz Süd). Diese Dämpfung fällt bei dem mit Futtergras bestandenen Feld Lävitz Nord, das ein breites Spektrum an Bodenfeuchtwerten besitzt, deutlich geringer aus. Hier wurden mäßige Korrelationen ($r \approx 0,65$) ermittelt. Gute Korrelationen ($r \approx 0,85$) sind trotz des eher geringen Bodenfeuchtespektrums für den mit Maisresiduen bestandenen Teil des Feldes Tegau (Feld Tegau Süd, Bereich Mitte) zu finden. Die Zahl der Messungen ist allerdings für eine fundierte statistische Analyse zu gering. Dies gilt ebenfalls für das frisch gepflügte Feld Tegau Süd, Bereich Nord. Hier ist ohnehin kein Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und SAR-Parametern zu verzeichnen. In diesem Rauhgkeitsbereich ist die Rückstreuung sehr sensitiv für geringe Rauhgkeitsänderungen. Zudem stellt die verlässliche Erfassung der Bodenfeuchte im Gelände unter diesen Bedingungen eine schwierige Aufgabe dar.

Für die visuelle Interpretation wurden für die Felder Lävitz West & Tegau Süd, Bereich Süd auf Basis der Korrelationsanalyse Bodenfeuchtekarten erstellt. Die Vorgehensweise erfolgte dabei analog zu den vorherigen Punkten (Umrechnung der Zahlenwerte der Radarparameter in Bodenfeuchte, anschließende Mittelung). Verwendung fanden die Radarparameter $L-HV$, $L-VV$, $L-PC_1$ und $L-PC_3$. Als Beispiel wird die Bodenfeuchtekarte für das Feld Lävitz West in Abb. 4.37 (Mitte) gezeigt. Die Korrelation der berechneten Bodenfeuchte dieser Karte mit den Geländemesswerten beträgt $r = 0,85$. Zum Vergleich sind in Abb. 4.37 ebenfalls die regionalisierten TDR-Messwerte (einfache Interpolation anhand *Spline*-Verfahren) als auch die *Maximum Storage Capacity* nach SCHULTZ & ENGMAN (2000) dargestellt. Die *Maximum Storage Capacity*

berücksichtigt Boden- und Pflanzenparameter für die Berechnung eines Richtwertes des maximalen pflanzenverfügbaren Wasserspeichervermögens eines Bodens (für eine exakte Beschreibung des Verfahrens siehe SCHULTZ & ENGMAN 2000). Unter der gegebenen Voraussetzung, dass die Entleerung eines umfangreichen Bodenwasserspeichers einen größeren Zeitraum in Anspruch nimmt als jene bei geringem Speichervermögen, kann unter günstigen Umständen (z.B. nach Sättigung des Speichers für einen gewissen Zeitraum keine Niederschläge) das Verteilungsmuster der Bodenfeuchte auf die *Maximum Storage Capacity* zurückgeführt werden.

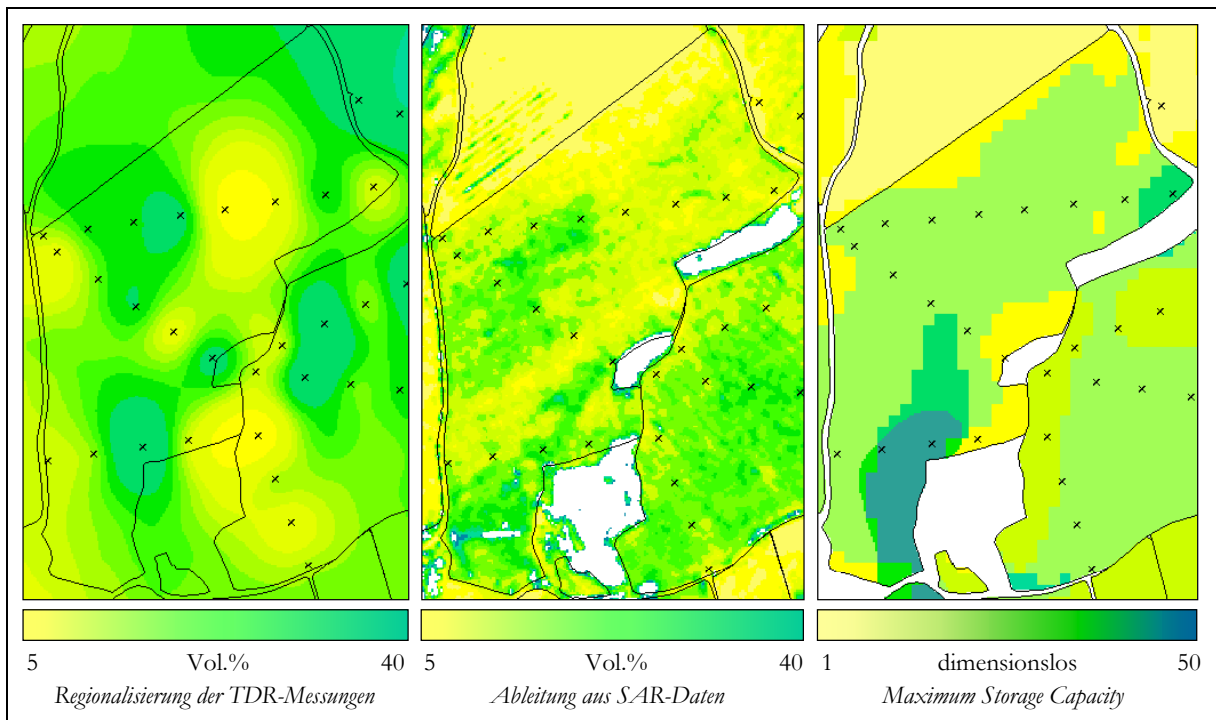


Abb. 4.37: Bodenfeuchtekarten, Feld Lävitz West

Bei Betrachtung der Abb. 4.37 sind deutliche Parallelen zwischen den regionalisierten TDR-Messungen und der aus SAR-Daten abgeleiteten Bodenfeuchtekarte erkennbar. Aufgrund des undichten Messnetzes ist lediglich die Analyse der Werte im Bereich der Messpunkte (schwarze Kreuze) zulässig. Auch die *Maximum Storage Capacity* (MSC) ist ansatzweise in der Lage, das Verteilungsmuster der Bodenfeuchte wiederzugeben. Im oberen Bereich des Feld ist die MSC allerdings indifferent. Die Boden- und Pflanzeigenschaften sind hier konstant. Weshalb dennoch Bodenfeuchteunterschiede vorzufinden sind, kann auf dieser Datenbasis nicht geklärt werden. Mögliche Erklärungsansätze könnten sich auf das Relief oder die im gesamten Untersuchungsgebiet installierten Drainageleitungen beziehen. Letztlich sind auch Fehler in der synthetischen Bodenkarte (Punkt 3.2.1) nicht auszuschließen.

4.4.5 Zusammenfassung der Korrelationsanalysen

In den obigen Punkten wurde die Analyse der Beziehungen zwischen SAR- und Oberflächenparametern zusammengefasst. Auffällig ist, dass jeder Landoberflächenparameter mit anderen SAR-Parametern verknüpft ist. So korreliert die Bodenfeuchte vor allem mit den L-Band Intensitäten L-VV und L-HV sowie der ersten und dritten Hauptkomponente (L-PC₁ und L-PC₃) des L-Bandes. Sensitiv für Rauigkeit (RMS-Höhe) hingegen zeigten sich vor allem die Parameter λ_1 und λ_3 . Zusätzlich konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen s und dem Realteil der RRL-Kohärenz nachgewiesen werden. Bezüglich der Feuchten Biomasse besitzen die Streumechanismen (a , a_1 , a_2) und die Anisotropie eine hohe Sensitivität. Die Korrelationsanalyse zwischen SAR- und Oberflächenparametern ist als Grundlage für die folgende Radarrückstreumodellierung zu sehen. Nur wenn tatsächlich die unter Punkt 4.4 genannten Voraussetzungen für messbare Zusammenhänge zwischen Rückstreucharakteristik und Ausprägung der Oberflächenparameter gegeben sind, kann die Simulation der Radarrückstreuung in Abhängigkeit von Bodenfeuchte, Oberflächenrauigkeit und Lokalem Einfallswinkel brauchbare Ergebnisse liefern. Zudem wurde durch die Korrelationsanalyse die Wirkung der Biomasse auf die Radarrückstreuung deutlich. Da in den hier verwendeten Rückstreumodellen der Effekt der Biomasse keine Berücksichtigung erfährt, müssen eventuell einige Teilflächen mit hohen Biomassewerten ausgeschlossen werden.

4.5 Modellierung der Radarrückstreuung

Im vorherigen Kapitel 4.4 wurde deutlich, dass das Rückstreusignal eines SAR durch die Ausprägung mehrerer Oberflächen- und Systemparameter gesteuert wird. In der komplexen Streumatrix ist demnach eine Vielzahl an Informationen über die Landoberfläche enthalten. Der direkte Zugriff darauf wird allerdings durch die Vermischung aller Einflüsse im Rückstreusignal behindert. In Abschnitt 4.4 bestand der Versuch der Entmischung der Gesamtinformation darin, lediglich Variationen eines einzelnen Oberflächenparameters zuzulassen. Die Rolle des Lokalen Einfallswinkels wurde dabei zum Großteil vernachlässigt. Ebenso fand bei den Punkten 4.4.1.-4.4.3 (Untersuchung der Abhängigkeit der SAR-Parameter von θ , der Biomasse sowie s und l) keine Berücksichtigung des Einflusses der Bodenfeuchte statt.

Mit Radarrückstreumodellen wird versucht, dass Wirkungsgefüge aller maßgeblichen Parameter auf die Radarrückstreuung zu simulieren. Die Wirkung jedes einzelnen Parameters kann auf diese Weise separat nachempfunden werden. Viele Modelle konzentrieren sich auf die Oberflächenparameter Bodenfeuchte und Rauigkeit. Außerdem erfolgt die Berücksichtigung des Lokalen Einfallswinkels, der Radarfrequenz sowie der Polarisierung. Ein solches Modell ist in der Lage, entsprechend der Wertvorgaben für diese Parameter die Rückstreuintensität zu berechnen (*Forward Approach*). Existiert ein Verfahren für die Inversion des Rückstreumodells, ist anhand der gemessenen Rückstreuintensitäten (sowie des Lokalen Einfallswinkels) die Bestimmung der Oberflächenparameter Bodenfeuchte und Rauigkeit im Idealfall ohne *a priori* Wissen gegeben. Hauptziel der Rückstreumodellierung ist die Entmischung aller im Rückstreusignal enthaltener Informationen bezüglich der Landoberfläche. Die hier verwendeten Rückstreumodelle berücksichtigen die dielektrischen Eigenschaften sowie die Rauigkeit der jeweiligen Oberfläche. Sie wurden für Oberflächen ohne bzw. mit spärlichem Bewuchs entwickelt. Vorhandene Biomasse kann zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen.

Im Folgenden werden die Modellergebnisse (*Forward Approach* und Inversion) der Rückstreumodelle nach OH et al. (1992) (*Oh-Modell*), DUBOIS et al. (1995) (*Dubois-Modell*), CHEN et al. (1995) (*Chen-Modell*) und FUNG (1994) (*Integral Equation Method Model – IEM*) vorgestellt. Die Diskussion konzentriert sich dabei auf die Analyse des IEM-Modells.

4.5.1 Oh-Modell

Das Oh-Modell berechnet die Rückstreuintensität der Ko- und Kreuzpolarisationen in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit, der Bodenfeuchte und des Lokalen Einfallswinkels. Als Inputparameter für die Rauigkeit geht ausschließlich die RMS-Höhe in das Modell ein, die Bodenfeuchte wird in Form des Realteils der Dielektrizitätskonstante ε' berücksichtigt. In Abhängigkeit dieser Parameter erfolgt die Berechnung des Ko- und Kreuzpolarisationsverhältnisses p und q (siehe Punkt 2.3.2.1.4).

Ist das Modell in der Lage, die gemessenen Radarparameter anhand der gegebenen Werte der Oberflächenparameter korrekt zu simulieren, ist eine Inversion der Radarintensitäten in Bodenfeuchte und Rauigkeit möglich. Für die Inversion des Oh-Modells gilt es, Gl. 2.84 zu lösen. Für diesen Schritt bietet sich ein iteratives Näherungsverfahren an. Der auf diese Weise erlangte Wert der Fresnel Reflexivität Γ_0 wird anhand der folgenden Gl. 4.3 in ε' umgerechnet.

$$\varepsilon' = \left(\frac{1 + \sqrt{\Gamma_0}}{1 - \sqrt{\Gamma_0}} \right)^2 \quad 4.3$$

Bezüglich der Umrechnung von ϵ' in Bodenfeuchte siehe Punkt 2.3.1.2 bzw. MAHR & HORN 1991, DASBERG & HOPMANS 1992, ROTH et al. 1992, DIRKSEN & DASBERG 1993, HEIMOVAARA 1993, JACOBSON & SCHJØNNING 1993, MAHESHWARLA et al. 1995, PEPIN et al. 1995, BOHL 1996, DATHE & DIEKKRÜGER 1996 sowie MALLANTS et al. 1996.

Anhand des mittels Gl. 2.84 berechneten Zahlenwertes für Γ_0 wird im Folgenden Arbeitsschritt die Oberflächenrauigkeit in Form von k_s abgeleitet (Gl. 4.4):

$$k_s = -\ln \frac{\sqrt{p} - 1}{\left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^{\frac{1}{3\Gamma_0}}} \quad 4.4$$

Die Durchführung der Modellierung erfolgte erneut unter Ausschluss der durch Bragg-Streuung gekennzeichneten Felder. Zudem wurden jene Schläge eliminiert, die aufgrund ihres erheblichen Vegetationsbestandes keine zuverlässige Erfassung der Oberflächenrauigkeit im Gelände ermöglichten. Unter diesen Voraussetzungen verblieben (Einschließlich der Dreiteilung des Feldes Tegau Süd) sieben separate Testflächen. Diese Flächen erfüllen die Konditionen für die Anwendung des Modells. Die *Forward* Modellierung wurde für alle auf diesen Feldern befindlichen Bodenfeuchtemesspunkten (TDR-Messungen) gesondert (Abb. 4.38 links) als auch für die Feldmittelwerte (Abb. 4.38 rechts) vollzogen.

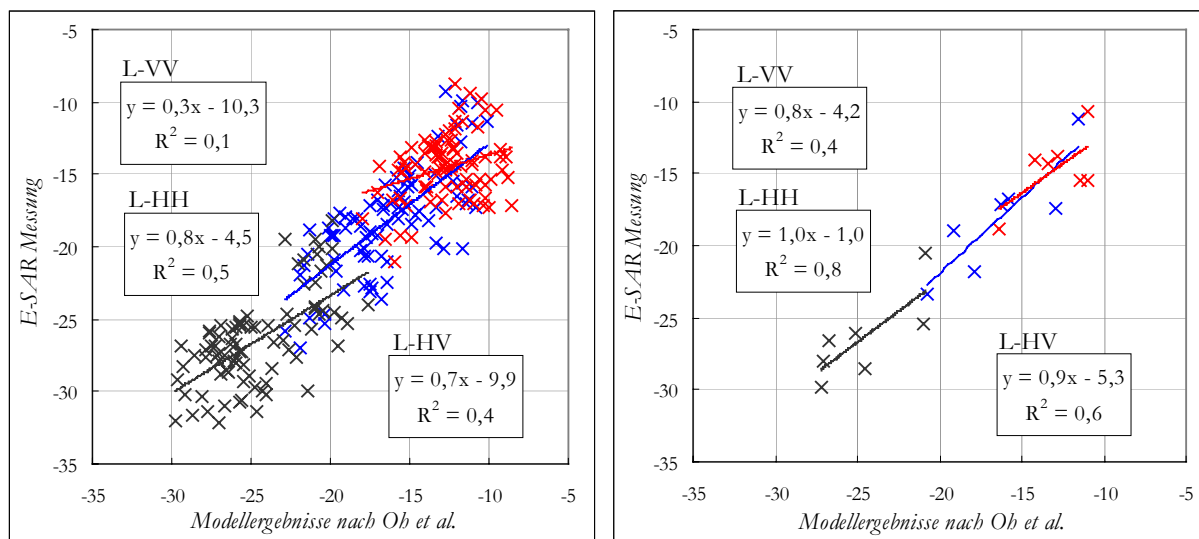


Abb. 4.38: *Forward* Ergebnisse [dB] mit Oh-Modell, L-Band (links: Einzelmessungen, rechts: Feldmittelwerte)

Abb. 4.38 spiegelt die Fähigkeit des Oh-Modells wider, eine prinzipielle Abbildung der Systemzusammenhänge zwischen Oberflächenparametern und Rückstreucharakteristik zu liefern. Das Verhältnis der Rückstreuintensitäten der verschiedenen Polarisationen zueinander wird korrekt wiedergegeben. Vor allem bei den Feldmittelwerten sind die Modellergebnisse gut mit den Messungen korreliert. Nichts desto trotz fällt bei allen Polarisationen eine leichte Übersimulation durch das Modell auf. Des Weiteren ist eine hohe Streuung in der Beziehung zwischen Mess- und Modellergebnissen, bezogen auf die Einzelmessungen, zu verzeichnen. Diese wirkt sich negativ auf den Zusammenhang zwischen beiden Parametern (v.a. für L-VV) aus.

Die Hintergründe hierfür sind vielfältig. Beispielsweise wurde aus den Rauigkeitsmessungen pro Feld eine mittlere Rauigkeit ermittelt. Diese mittlere Rauigkeit wurde im Rahmen der Modellierung jedem Messpunkt für Bodenfeuchte zugewiesen. Auf diese Weise werden Rauigkeitsschwankungen innerhalb

eines Schläges vernachlässigt. Außerdem ist mit zufälligen Messfehlern bei der Aufnahme der Geländedaten zu rechnen. Dies schließt die Verortung der Bodenfeuchtemesspunkte und vor allem die Repräsentativität dieser Messungen für den jeweiligen Standort ein. Letztlich kann die hohe Streuung in der Beziehung zwischen Mess- und Modellergebnissen der Intensitäten auch auf die Fernerkundungsdaten zurückgeführt werden. Zwar erfolgte durch geeignete Filter eine Minderung des Speckle. Zudem wurden die Zahlenwerte der Rückstreuintensität durch Mittelung mehrerer Pixels abgeleitet. Dennoch sind Rückstände des Speckle in den L-Band Messdaten enthalten.

Die Übersimulation hingegen deutet (unter der Annahme der korrekten Simulation der Radarrückstreuung durch das Modell) auf systematische Fehler hin. Die stete Überschätzung der Oberflächenparameter (zu hohe Werte für die Bodenfeuchte als auch für die Rauigkeit) sind hier als eine Möglichkeit zu nennen. Weitere systematische Fehler entstehen durch Ungenauigkeiten bei der Kalibrierung der SAR-Daten. Probleme betreffs des Lokalen Einfallswinkels können nach eingehender Prüfung ausgeschlossen werden.

Durch die befriedigenden Ergebnisse der *Forward* Modellierung sind die Voraussetzungen für die Inversion des Modells gegeben. Im ersten Schritt erfolgte die Kalkulation von Γ_0 , anschließend wurde κ_s berechnet. Ein Vergleich zwischen gemessener und simulierter Fresnel Reflexivität ergab allerdings keinen signifikanten Zusammenhang. Die berechneten Werte für Γ_0 sind zudem um den Faktor 2 zu hoch. Die Analyse wurde feldweise sowie für das gesamte Gebiet auf Basis der Einzelmesspunkte der Bodenfeuchte (TDR-Messungen) als auch für das gesamte Gebiet auf Basis der Feldmittelwerte durchgeführt. Lediglich bei der nach Schlägen separierten Untersuchung kann von geringen Zusammenhängen gesprochen werden. Die Erstellung einer Bodenfeuchtekarte auf Basis dieser Simulation ist jedoch nicht gegeben.

Die Inversion des Modells erfolgt ohne Berücksichtigung der im Gelände gemessenen Parameter. Lediglich die L-Band Intensitäten sowie θ werden benötigt. Dennoch wird das Modell schlussendlich anhand der Geländedaten validiert. Für den Fall der Fresnel Reflexivität scheiden allerdings Fehler hinsichtlich der Rauigkeitsmessung aus. Demnach sind die Ursachen für das ungenügende Modellergebnis in den Bodenfeuchtemessungen, den Inputdaten oder im Modell selbst zu suchen. Die Inversion des Modells bezüglich der Rauigkeit in Form von κ_s liefert deutlich bessere Ergebnisse. Die Gegenüberstellung zwischen Feldmessungen und Modellergebnissen wird in Abb. 4.39 präsentiert.

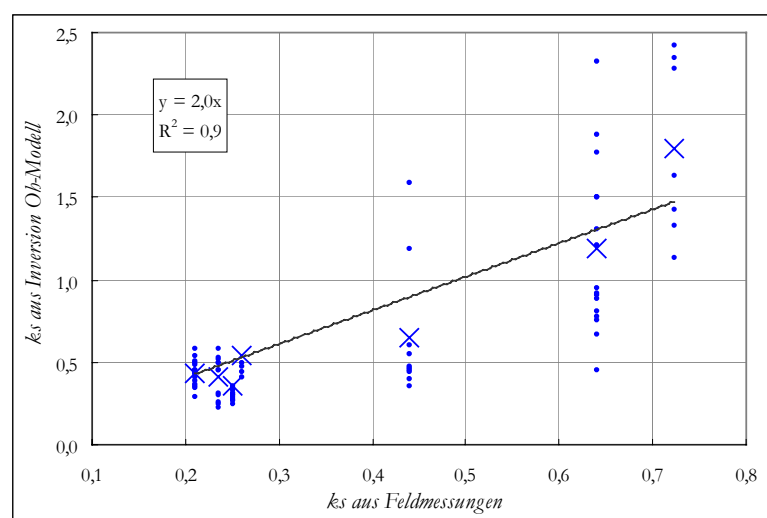


Abb. 4.39: Auf Oh-Modell basierende Inversion bezüglich κ_s

Die Kreuze stehen für die mittlere Rauigkeit der insgesamt sieben Schläge. Die Punkte repräsentieren die durch das Modell errechneten k_s Werte pro Einzelmesspunkt der Bodenfeuchte. Die Trendlinie gilt für die Feldmittel. Analog zu Γ_0 werden die berechneten k_s Werte um den Faktor 2 überschätzt. Dass die im Gelände erhobene Rauigkeit um diesen Faktor unterschätzt wurde, ist allerdings unwahrscheinlich. Ein auf den Bearbeitungszustand der Felder bezogener Vergleich mit Literaturdaten stützt diese These. Die Hauptursache ist hier in Problemen bei der Kalibrierung der verschiedenen Polarisationen sowie im Oh-Modell zu suchen.

Die Streuung der simulierten k_s Werte für die Einzelmesspunkte der Bodenfeuchte um das aus ihnen berechnete Feldmittel ist zum Teil damit zu erklären, dass diese k_s Werte mit der mittleren Rauigkeit eines Schlages (ermittelt auf Basis der Feldmessungen) verglichen werden. Für eine Validierung der k_s Werte für die Einzelmesspunkte fehlt die Datengrundlage. Des Weiteren können Rückstände von Speckle eine Streuung der simulierten k_s Werte verursachen. Bezogen auf Feldmittelwerte wurde eine hohe Korrelation zwischen gemessenen und simulierten k_s Werten festgestellt. Allerdings ist dieser Trend aufgrund der geringen Zahl verfügbarer Messwerte sowie der heterogenen Verteilung dieser Daten über das Rauigkeitsspektrum nur eingeschränkt interpretierbar.

4.5.2 Dubois-Modell

Anhand des Dubois-Modells erfolgt eine rein konzeptionelle Darstellung der Beziehung zwischen Oberflächenparametern und Radarrückstreuung. Eine physikalisch determinierte Komponente besteht nicht. Anhand der Oberflächenparameter s und ε' sowie der Systemparameter θ und λ erfolgt die Berechnung der Intensitäten beider Kopolarisationen. Die Kreuzpolarisation wird lediglich zur Kalkulation eines Gültigkeitskriteriums für das Modell herangezogen (Gl. 2.85).

Für die Inversion des Dubois-Modells ist das Gleichungssystem aus Gl. 2.86 numerisch zu lösen. Die RMS-Höhe sowie der Realteil der Dielektrizitätskonstante können anschließend direkt und unabhängig voneinander berechnet werden (Gl. 4.5). Für die Inversion werden analog zum Modell von OH et al. (1992) keine Oberflächenparameter benötigt. Der Input besteht aus den Intensitäten (σ^0 in dB) der Kopolarisationen, der Wellenlänge sowie dem Lokalen Einfallswinkel.

$$\varepsilon' = \frac{1,1A - 1,4B}{-0,0336 \tan \theta} \quad 4.5$$

$$k_s = 10^{\frac{0,028B - 0,046A}{-0,0336}}$$

wobei gilt:

$$A := 2,75 - \log \left(\frac{\cos^{1,5} \theta \cdot \lambda^{0,7}}{\sin^5 \cdot \sigma_{hh}^0} \right) - 1,4 \log \sin \theta$$

$$B := 2,35 - \log \left(\frac{\cos^3 \theta \cdot \lambda^{0,7}}{\sin^3 \cdot \sigma_{vv}^0} \right) - 1,1 \log \sin \theta$$

Die Modellierung erfolgte unter denselben Prämissen des vorherigen Punktes. Unter diesen Voraussetzungen stehen wiederum sieben separate Testflächen (Einschließlich der Dreiteilung des Feldes Tegau Süd) zur Verfügung. Die gemessenen Oberflächenparameter dieser Flächen erfüllen ebenfalls die Konditionen für die Anwendung des Dubois-Modells. Die Berechnung des Gültigkeitskriteriums nach Gl. 2.85 (Ausschluss von Bereichen mit störender Vegetation) ergab allerdings die Ausgrenzung einiger Bodenfeuchtemesspunkte aus der Modellierung. Jedoch war der Boden im Bereich dieser Messpunkte zum Großteil völlig vegetationsfrei. Diese Tatsache deutet erneut auf Probleme betreffs der relativen Kalibrierung zwischen den verschiedenen Polarisationen hin.

Die *Forward* Modellierung wurde wie im Punkt 4.5.1 für alle Bodenfeuchtemesspunkte (TDR-Messungen) gesondert (Abb. 4.40 links) sowie für die Feldmittelwerte (Abb. 4.40 rechts) durchgeführt. Während die Rückstreuintensität der HH-Polarisation hinlänglich simuliert wird, treten erneut größere Probleme bei der VV-Polarisation auf. Allerdings ist im Gegensatz zum Oh-Modell eine Untersimulation festzustellen. Der Anstieg der Trendlinien ist mit Werten < 1 mit den Ergebnissen des Oh-Modells vergleichbar.

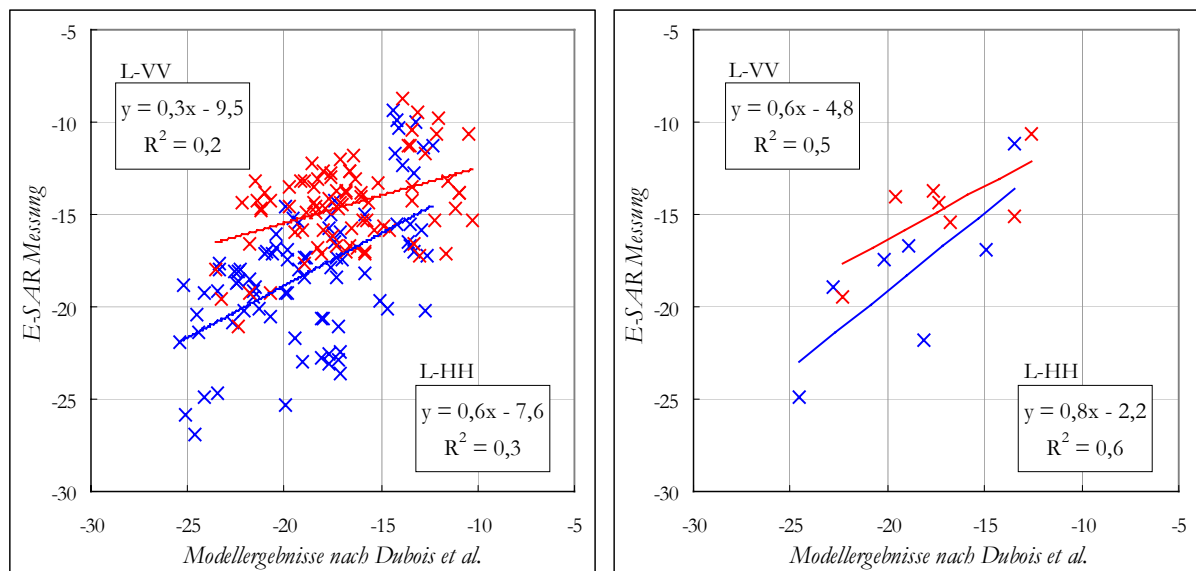


Abb. 4.40: *Forward* Ergebnisse [dB] mit Dubois-Modell, L-Band (links: Einzelmessungen, rechts: Feldmittelwerte)

Die hohe Streuung zwischen Mess- und Modellergebnissen bezogen auf die Einzelmessungen begründet sich wie oben (Punkt 4.5.1). Für die Untersimulation (speziell im Kanal L-VV) kommen vor allem systematische Fehler infolge von Kalibrierungsungenauigkeiten der SAR-Daten in Frage. Flüchtig betrachtet scheinen sich zwar die Ursachen für die Simulationsfehler beider Modelle zu widersprechen. Dieselben systematischen Fehler werden zur Begründung der Übersimulation des Oh-Modells sowie der Untersimulation des Dubois-Modells herangezogen. Hier gilt es allerdings zu beachten, dass das Oh-Modell mit Polarisationsverhältnissen arbeitet. Im Gegensatz dazu werden im Dubois-Modell die absoluten Werte der Kopolarisationen verwendet. Somit ist im Dubois-Modell die absolute Kalibrierengenauigkeit der Kopolarisationen von entscheidender Bedeutung, während das Oh-Modell eine Anfälligkeit für relative Kalibrierungsfehler (zwischen den verschiedenen Polarisationen) besitzt. Systematische Fehler bei der Erhebung der Oberflächenparameter sind in diesem Zusammenhang (Übersimulation durch das Oh-Modell sowie Untersimulation durch das Dubois-Modell) eher auszuschließen.

Trotz der weniger befriedigenden Ergebnisse der *Forward* Modellierung erfolgte die Inversion des Dubois-Modells. Abb. 4.41 zeigt ein Diagramm für den Vergleich zwischen gemessener und anhand des Modells berechneter RMS-Höhe. Die Kreuze stehen wie oben (Abb. 4.39) für die mittlere Rauigkeit, die Punkte

repräsentieren die durch das Modell errechneten Werte für s pro Einzelmesspunkt der Bodenfeuchte. Die Trendlinie wurde für die Feldmittel berechnet. Im Vergleich zum Oh-Modell erfolgt eine deutlich bessere Berechnung der RMS-Höhe. Die Regressionsgerade ist deckungsgleich mit der 1:1 Linie. Eine Erklärung für die Streuung der simulierten s Werte für die Einzelmesspunkte der Bodenfeuchte um das aus ihnen berechnete Feldmittel wurde oben (Punkt 4.5.1) bereits geliefert.

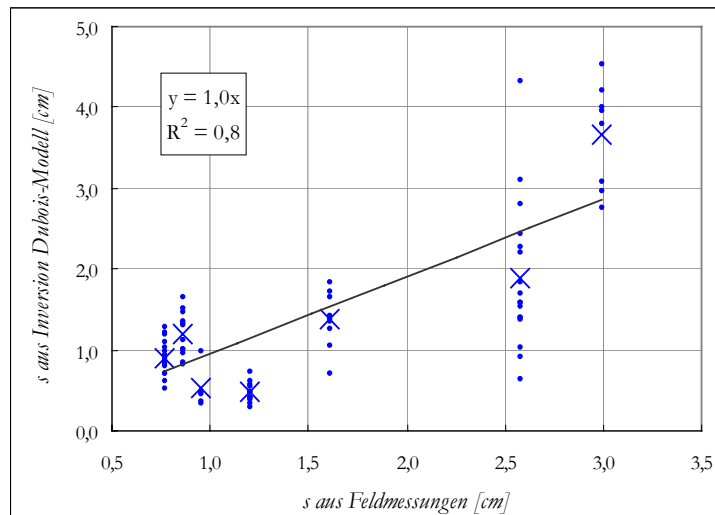


Abb. 4.41: Auf Dubois-Modell basierende Inversion bezüglich s

Die Inversion des Modells bezüglich ε' führte bei einigen Schlägen zu guten Korrelationen zwischen gemessenen und simulierten Werten. Als Beispiel sind in Abb. 4.42 für die Testflächen „Feld Tegau Süd, Bereich Süd“ und „Feld Läwitz West“ (für diese beiden Schläge wurden ebenfalls die höchsten Korrelationen zwischen Rückstreuintensität und Bodenfeuchte festgestellt, siehe Punkt 4.4.4) die jeweiligen Resultate dargestellt. Allerdings weichen die absoluten Modellergebnisse zum Teil deutlich von den Messungen ab. Zudem ist der Anstieg der Trendlinie deutlich kleiner Eins.

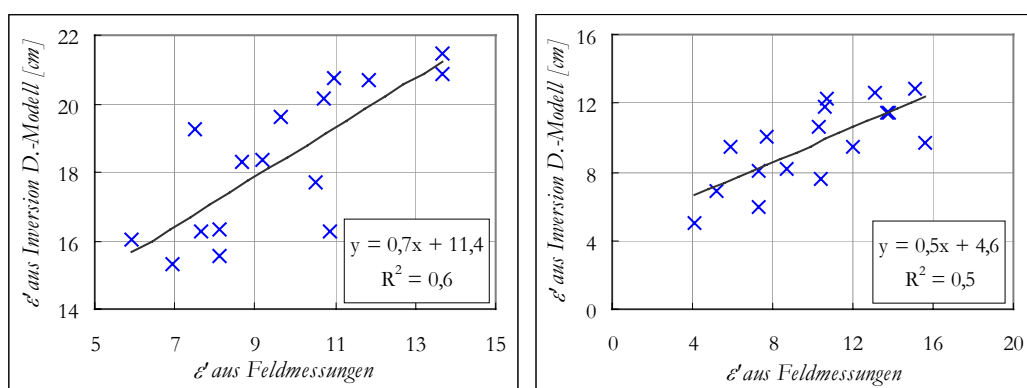


Abb. 4.42: Auf Dubois-Modell basierende Inversion bezüglich ε'
(links: Feld Tegau Süd, Bereich Süd, rechts: Feld Läwitz West)

Unter der Voraussetzung einer konstanten Rauigkeit innerhalb der Schläge sowie der korrekten Berechnung des Lokalen Einfallswinkels kommen lediglich die folgenden Ursachen für den zu geringen Anstieg der Trendlinie in Frage. Zum einen ist der Grund im Modell selbst zu suchen. Offenbar ist es nicht ausreichend sensitiv für die im Radarsignal enthaltene Information der Bodenfeuchtevariation. Eine Sensitivitätsanalyse des Dubois-Modells erbrachte, dass dessen Empfindlichkeit für Bodenfeuchte nicht von der

Oberflächenrauigkeit bestimmt wird. Eine andere Möglichkeit besteht in systematischen Fehlern bei der Bodenfeuchtemessung im Gelände. Allerdings ist diese Ursache eher auszuschließen. Die Messung der Dielektrizitätskonstante von Böden anhand des TDR-Verfahrens basiert auf bekannten physikalischen Zusammenhängen und hat sich vielfach bewährt (siehe Punkt 2.3.1.2). Zudem waren mehrere TDR-Sonden in Gebrauch. Dass sämtliche Sonden dieselben Fehlfunktionen aufweisen, ist nicht anzunehmen. Wahrscheinlicher ist, dass ein Fehler aufgrund der unterschiedlichen Messtiefen beider Messverfahren (TDR: 16 cm, SAR: ca. 5 cm) entsteht.

Neben der zu geringen Sensitivität des Modells für Bodenfeuchtevariationen innerhalb der Schläge ist ein konstanter absoluter Fehler für den Großteil der einzelnen Testflächen festzustellen. Dies wird vor allem dann deutlich, wenn die gemessenen gegen die modellierten Feldmittelwerte der Bodenfeuchte in einem Koordinatensystem gegeneinander aufgetragen werden. Der *Offset* variiert dabei für die verschiedenen Felder. Folglich kann nicht von einem signifikanten Zusammenhang zwischen den gemessenen und modellierten Bodenfeuchtwerten für das gesamte Untersuchungsgebiet gesprochen werden ($r \approx 0,5$). Auffällig ist, dass der *Offset* für ϵ' mit dem absoluten Fehler der simulierten RMS-Höhe in Verbindung steht (Abb. 4.43). Eine Unterschätzung von s führt zu einem hohen positiven *Offset* für ϵ' . Für Felder mit überschätzter RMS-Höhe ist der absolute Fehler für ϵ' nahe Null.

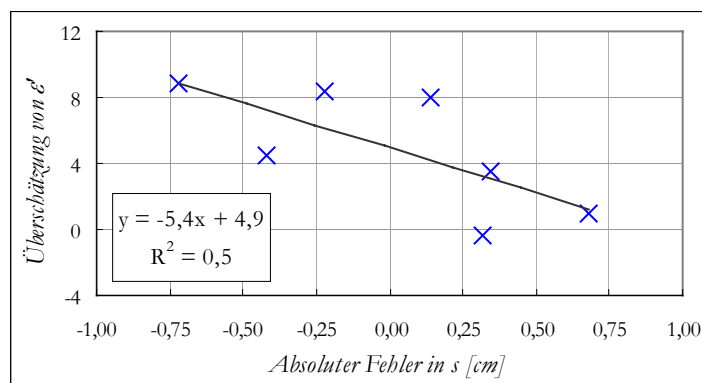


Abb. 4.43: Zusammenhang zwischen den absoluten Fehlern für s und ϵ'

Unter Ausschluss von Fehlern im Dubois-Modell lässt sich der Zusammenhang zwischen dem *Offset* für ϵ' und dem absoluten Fehler für s in einer ungenauen Kalibrierung der SAR-Daten begründen. Das Polarisationsverhältnis HH/VV ist zu niedrig. Eine Anhebung dieses Quotienten würde im Modellergebnis in größeren RMS-Höhen und geringeren Werten für ϵ' resultieren. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der *Forward* Modellierung. Für L-VV wurden höhere Werte gemessen als simuliert.

Trotz der oben erläuterten Schwierigkeiten wurde anhand des Dubois-Modells die Radarrückstreuung für das gesamte Gebiet in Oberflächenrauigkeit (s) und Bodenfeuchte (ϵ') invertiert. Abb. 4.44 enthält die entsprechenden Karten für ϵ' (oben) und s (unten). Ausmaskiert wurden neben Wald-, Siedlungs- und Wasserflächen auch jene Bildbereiche, die das Gültigkeitskriterium des Modells nach Gl. 2.85 nicht erfüllen. Beim Vergleich beider Karten fällt auf, dass sich das Verteilungsmuster der Bodenfeuchte von jenem der Oberflächenrauigkeit unterscheidet. Der Großteil der Schläge ist durch eine bestimmte RMS-Höhe gekennzeichnet. Die Schwankungen dieses Parameters innerhalb eines Feldes sind klein im Vergleich zu den Unterschieden zwischen den Feldern. Mit ϵ' verhält es sich genau entgegengesetzt. Diese Beobachtung entspricht den tatsächlichen Verhältnissen.

Betreffs der Interpretation beider Karten ist zu beachten, dass für die Validierung auf Basis von Feldmittelwerten lediglich sieben Testflächen zur Verfügung standen. Zudem besteht zwischen den gemessenen und modellierten Werten für ϵ' nur ein geringer Zusammenhang.

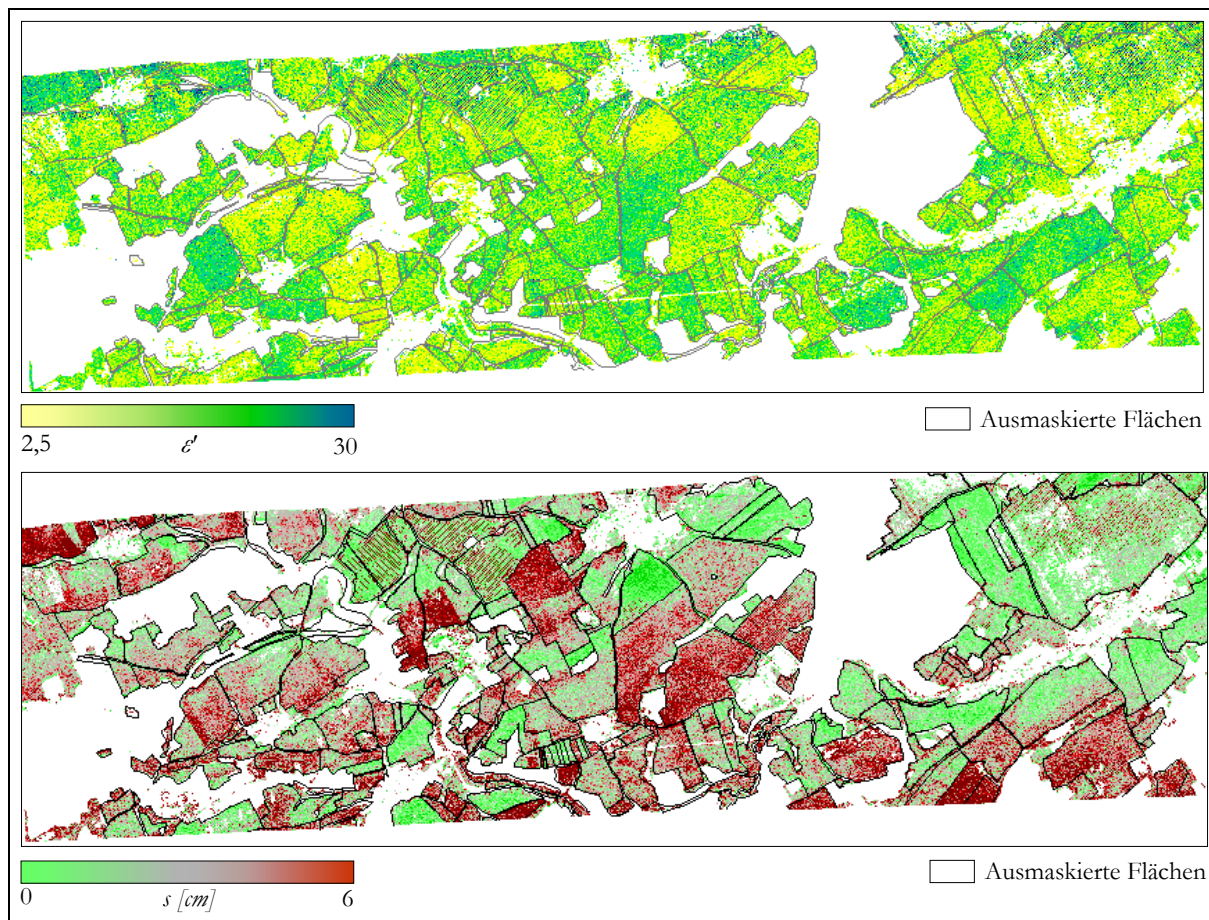


Abb. 4.44: Kartendarstellung der Parameter s und ϵ' , basierend auf der Inversion des Dubois-Modells

4.5.3 Chen-Modell

CHEN et al. (1995) versuchten anhand ihres Modells die komplexen und in Form theoretischer Modelle erfassten Prozesse der Radarrückstreuung in simpler Form abzubilden. Grundlage hierfür bilden Simulationsergebnisse des *Integral Equation Method Model* (FUNG 1994). Eine *Forward* Modellierung ist im Chen-Modell nicht vorgesehen. Auf Basis der alleinigen Verwendung des Kopolarisationsverhältnisses $\sigma^{0}_{(hh)/(vv)}$ als SAR-Input wird die Radarrückstreuung in Bodenfeuchte invertiert. Die Oberflächenrauigkeit kann, so CHEN et al. (1995), durch diese Vorgehensweise vernachlässigt werden. Allerdings steht diese Annahme im drastischen Gegensatz zur Funktionsweise des Oh-Modells. Hier wird das Verhältnis der Kopolarisationen für die Berechnung der RMS-Höhe herangezogen.

Hinsichtlich der Gültigkeitskriterien des Modells machen die Autoren keine spezifischen Angaben. Anhand der Wertebereiche der in der Simulation von CHEN et al. (1995) verwendeten Parameter lässt sich jedoch ableiten, dass die hier vorliegenden Daten ohne Einschränkung verwendet werden können.

CHEN et al. (1995) liefern in ihrer Arbeit ein Beispiel für die Ergebnisse der Inversion. Offenbar kommt es vor allem bei hohen Bodenfeuchtwerten zur Untersimulation. Diese Tatsache lässt sich anhand der hier vorliegenden Daten (die Resultate für die Feldmittelwerte einbezogen) bestätigen (Abb. 4.45). Zwar können für einige Testflächen gute Korrelationen zwischen Messung und Modellergebnis festgestellt werden, die Absolutwerte der Simulation weichen jedoch klar von den Feldmessungen ab. Der *Offset* der Trendlinie ist relativ gering, der Anstieg hingegen ist jedoch (wie bei CHEN et al. 1995) deutlich kleiner 1.

Bei Betrachtung der Modellgleichung (Gl. 2.87) wird deutlich, dass das Kopolarisationsverhältnis $\sigma^{0}_{(hh)/(vv)}$ den einzigen Inputparameter mit einer möglichen Fehlerbehaftung darstellt. Ungenauigkeiten bezüglich der absoluten sowie relativen SAR-Datenkalibrierung als Fehlerursache wurden bereits im Rahmen der Modellierung anhand der Modelle von OH et al. (1992) und DUBOIS et al. (1995) diskutiert. Da allerdings bei CHEN et al. (1995) vergleichbare Probleme aufgetreten sind, obwohl die Autoren mit einem anderen Datensatz arbeiteten, ist als Ursache für die offensichtlich zu geringe Sensitivität bezüglich der Bodenfeuchte das Modell selbst zu nennen. Das Kopolarisationsverhältnis ist augenscheinlich nicht uneingeschränkt als Parameter für die Abschätzung dieses Oberflächenparameters geeignet.

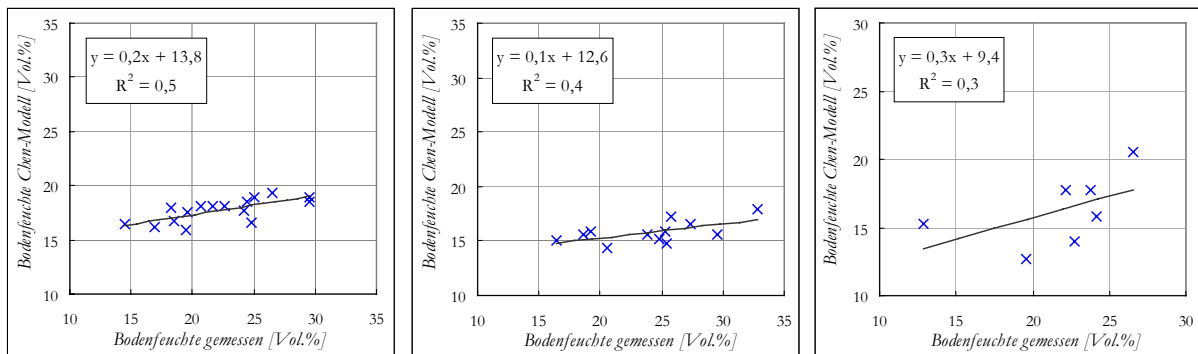


Abb. 4.45: Auf Chen-Modell basierende Inversion bezüglich der Bodenfeuchte (links: Feld Lävitz West, Mitte: Feld Lävitz Nord, rechts: Feldmittelwerte)

Diese These wird bei der Betrachtung der anhand des Chen-Modells berechneten und in Abb. 4.46 flächenhaft dargestellten Bodenfeuchte bestätigt (ausmaskiert sind dieselben Bereiche wie in Abb. 4.44). Es werden große Feuchteunterschiede zwischen den einzelnen Schlägen deutlich. Hohe Werte ergeben sich für vegetationsarme und glatte Felder, für raue oder mit Winterraps bestandene Felder wird eine niedrige Bodenfeuchte berechnet. Dieser Trend nimmt wie bei CHEN et al. (1995) in *Range*-Richtung zu.



Abb. 4.46: Kartendarstellung der Bodenfeuchte, basierend auf Chen-Modell

Eine Abhängigkeit der Bodenfeuchte vom Bearbeitungszustand bzw. vom Bewuchs war bei der Auswertung der Felddaten nicht festzustellen. Dennoch können analog zu den obigen Punkten systematische Fehler bei der Erhebung der Bodenfeuchtedaten nicht ausgeschlossen werden. Da das Chen-Modell nicht mit der Dielektrizitätskonstante, sondern mit volumetrischen Bodenfeuchtwerten arbeitet, kommt eine mangelhafte Kalibrierung der Messgeräte als zusätzliche Ursache systematischer Fehler in Frage. Zufällige Fehler im Rahmen der Bodenfeuchtemessung scheiden als Erklärung der festgestellten Probleme aus.

4.5.4 Integral Equation Method Model – IEM

Das IEM-Modell nach FUNG (1994) vereint die theoretischen Ansätze des SPM, des GOM sowie des POM. Durch dieses integrative Verfahren wurden deren Definitionsbereiche bezüglich der Parameter Bodenfeuchte (ε'), Oberflächenrauigkeit (s , l) sowie Lokaler Einfallswinkel derart erweitert, dass sie in Form der *Integral Equation Method* nahezu für alle natürlichen und künstlichen Landoberflächen einsetzbar sind (siehe Punkt 2.3.2.1.3).

In dieser Arbeit kommt das *Single Scattering* IEM-Modell für den Rückstreufall (monostatisches System) zum Einsatz. Die mathematische Komplexität dieses Modells hat zum Nachteil, dass bislang keine numerische Lösung bezüglich der Oberflächenparameter (Inversion) existiert. Zudem ist eine eindeutige Inversion zweier SAR-Parameter (σ_{hh}^0 , σ_{vv}^0) in drei Oberflächenparameter (ε' , s , l) prinzipiell nicht möglich. Einige Inversionsverfahren umgehen zwar die mathematischen Hindernisse durch die Verwendung Neuronaler Netze (DAWSON et al. 1997, SATALINO et al. 1999, SATALINO et al. 2001a) oder von *Lookup Tables* (VAN OEVELEN & HOEKMAN 1999). Allerdings können auch diese Methoden keine eindeutigen Ergebnisse liefern, da mehrere Kombinationsmöglichkeiten für die Zahlenwerte der Oberflächenparameter existieren, um dieselben SAR-Parameter zu generieren. Ein anderer Weg der Inversion besteht in der Verwendung von *a priori* Information (DAVIDSON et al. 2001, SATALINO et al. 2001b). Diese Möglichkeit wird in dieser Arbeit ausgeschöpft. BINDLISH & BARROS (2000) eliminierten das im Rahmen der Inversion auftretende Unterbestimmtheitsproblem der Modellgleichungen durch die Zuhilfenahme weiterer Radarfrequenzen. Sie arbeiteten mit insgesamt drei Bändern (L, C, X) und je zwei Kopolarisationen. Anhand dieser sechs SAR-Parameter ist eine eindeutige Inversion in die drei Oberflächenparameter ε' (bzw. m_v in BINDLISH & BARROS 2000), s & l gewährleistet.

Die im IEM abgebildeten Verknüpfungen zwischen Oberflächenparametern und Radarrückstreuung lassen sich aufgrund dessen komplexer Struktur nicht ohne weiteres erfassen. Aus diesem Grund geht der *Forward* Modellierung eine Sensitivitätsanalyse voraus. Die funktionalen Zusammenhänge zwischen Oberflächen- und SAR-Parametern werden anhand einzelner Abbildungen analysiert und interpretiert.

4.5.4.1 Sensitivitätsanalyse

Im IEM-Modell werden die dielektrischen Oberflächeneigenschaften anhand des Realteils ε' sowie des Imaginärteils ε'' der komplexen Dielektrizitätskonstante berücksichtigt. Dabei stehen ε' und ε'' in einem funktionalen Zusammenhang (HALLIKAINEN et al. 1985). Demzufolge ist es ausreichend, den Realteil der Dielektrizitätskonstante im Rahmen der Sensitivitätsanalyse zu berücksichtigen.

Die Sensitivitätsanalyse umfasst vorwiegend die für diese Arbeit relevanten Wertebereiche aller Parameter. Der Definitionsbereich des Modells wird folglich nicht ausgereizt. Zunächst steht die Untersuchung der Änderung der Rückstreuintensität in Abhängigkeit der Variabilität einer einzelnen Größe an. Da die einzelnen Parameter nicht unabhängig voneinander sind, erfolgt im Anschluss die Analyse auf Basis der Wertekombination zweier Parameter. In den meisten Fällen wird die Intensität der Radarrückstreuung in Dezibel angegeben. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass durch die logarithmische Skalierung (dekadisch) die Linearität von Beziehungen inklusive deren Vergleichbarkeit verloren gehen.

Abb. 4.47 zeigt die Sensitivität der simulierten Rückstreuintensität (L-HH und L-VV) hinsichtlich der Parameter θ , ε' , s und l (von links oben nach rechts unten). Der Wertebereich der variablen Größe ist fett abgedruckt, darunter befinden sich jeweils die Konstanten. Bei der Analyse dieser Diagramme wird deutlich, dass beide Kopolarisationen ähnlich auf die Schwankungen des entsprechenden Parameters reagieren. Zudem gilt bis auf wenige Einschränkungen: $\sigma_{L-HH}^0 < \sigma_{L-VV}^0$.

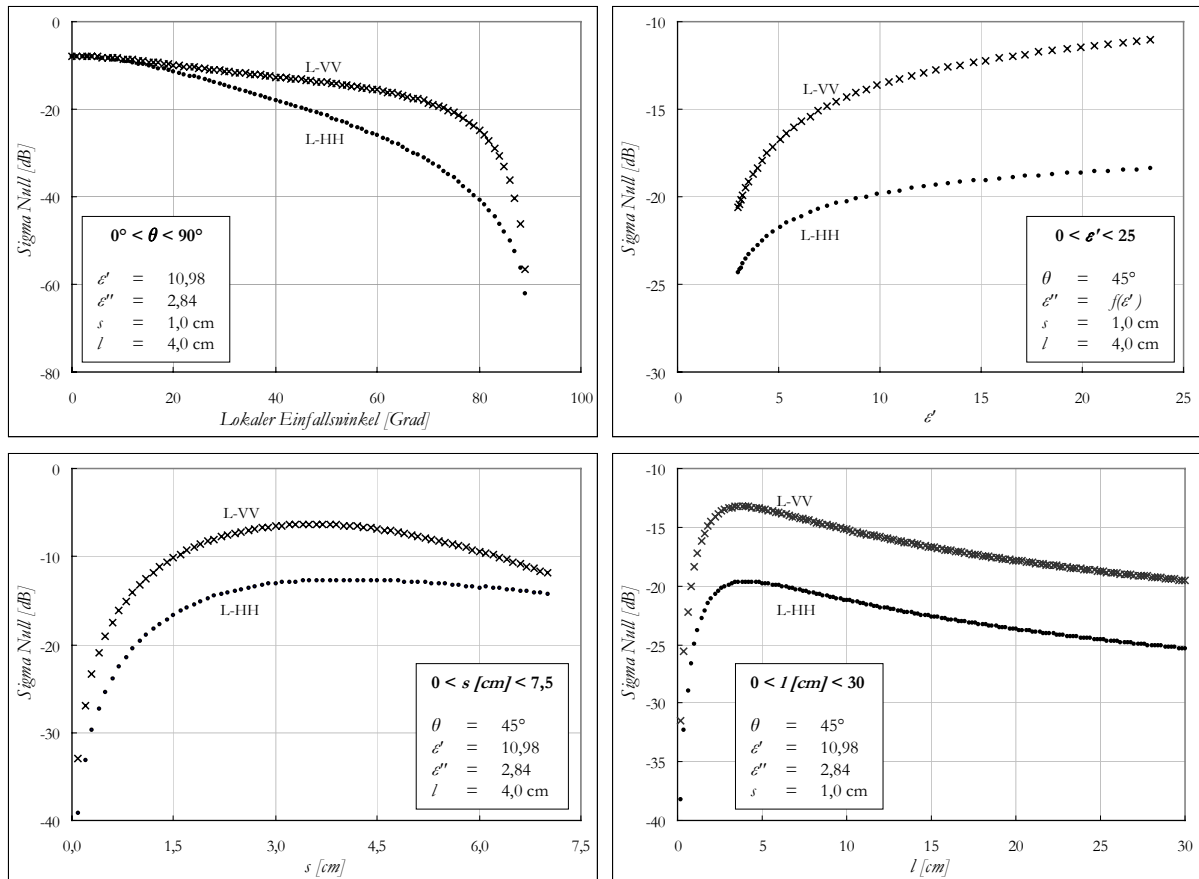


Abb. 4.47: Sensitivität der simulierten Rückstreuintensität hinsichtlich verschiedener Parameter

Mit zunehmendem Lokalen Einfallswinkel vermindert sich die Intensität der Radarrückstreuung beider Kopolarisationen. Im für diese Untersuchung relevanten Wertebereich ($20^\circ < \theta < 70^\circ$) besitzt θ einen deutlich höheren Einfluss auf die horizontale Kopolarisation. In Nadirnähe unterscheidet sich die Rückstreuintensität beider Kanäle kaum. Geht θ gegen 90° , geht die Rückstreuintensität von L-HH und L-VV gegen Null (bzw. gegen $-\infty$, da σ^0 in dB).

Der Anstieg der Dielektrizitätskonstante resultiert in einer Zunahme der Rückstreuintensität. Der Startwert für ϵ' liegt etwa bei 2,5. Dies entspricht einer Bodenfeuchte von Null. Mit steigenden Werten für ϵ' geht der Einfluss dieses Parameters auf die Rückstreuung zurück (siehe hierzu auch Abb. 4.48). Die vertikale Kopolarisation reagiert offensichtlich empfindlicher hinsichtlich der Variation von ϵ' .

Der Rauigkeitsparameter s besitzt einen immensen Einfluss auf die Rückstreuintensität. Im Gegensatz zu den bisher diskutierten Größen θ und ϵ' erfolgt durch eine kontinuierliche Steigerung von s der Anstieg von σ^0_{L-HH} und σ^0_{L-VV} nur bis zu einem gewissen Punkt. Eine fortschreitende Anhebung dieser Größe resultiert dann in einer geringen Verminderung der Rückstreuintensität. Für die horizontale Kopolarisation liegt dieser Schwellenwert für s bei ca. 4 cm, für L-VV beträgt er etwa 3,5 cm. In diesem Bereich liegen auch die Maximalwerte der Geländemessungen für diesen Oberflächenparameter. Besonders sensitiv reagiert die Rückstreuintensität auf Änderungen der RMS-Höhe im Bereich geringer Rauigkeiten.

Analog verhält es sich mit der Autokorrelationslänge l . Auch die jeweiligen Schwellenwerte sind mit denen für s vergleichbar. Somit gilt bei glatten Oberflächen ($s = 1$ cm) für L-VV erneut ein geringerer Schwellenwert als für L-HH. Innerhalb des relevanten Wertebereichs bewirken Variationen dieses Rauigkeitsparameters, verglichen mit jenen der RMS-Höhe, deutlich geringere Reaktionen der Rückstreuintensität.

Nachfolgend wird die Sensitivität der simulierten Rückstreuung auf Bodenfeuchteänderungen genauer analysiert (Abb. 4.48). In diesem Zusammenhang werden lineare Sigma Null Werte verwendet (Gl. 4.6).

$$\sigma_{lin}^0 = 10^{\frac{\sigma_{dB}^0}{10}}$$

4.6

Die eingesetzten Werte der Bodenfeuchte liegen zwischen 0 und 50 Vol.%. Dies entspricht in etwa dem folgenden Wertebereich für den Realteil der komplexen Dielektrizitätskonstante: $2,5 < \epsilon' < 38$ (Abb. 4.48, rechts). Der in Abb. 4.48 rechts dargestellte funktionale Zusammenhang zwischen volumetrischer Bodenfeuchte und ϵ' gilt für lehmige Böden mit hohem Schluffanteil ($f = 1,4$ GHz, $T = 23^\circ\text{C}$, siehe HALLIKAINEN et al. 1985).

Das linke Diagramm der Abb. 4.48 zeigt den Zusammenhang zwischen volumetrischer Bodenfeuchte und Rückstreuintensität. Die Sigma Null Werte der vertikalen Kopolarisation sind um den Faktor 5 höher als jene der horizontalen Kopolarisation. Zudem offenbart die vertikale Kopolarisation eine höhere Sensitivität bezüglich der Bodenfeuchte. Der Anstieg der Kurve ist wesentlich steiler und geradliniger (zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der primären und sekundären Ordinate). Das mittlere Diagramm der Abb. 4.48 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Hierbei handelt es sich um die erste Ableitung der funktionalen Zusammenhänge des ersten Diagramms (Abb. 4.48, links). Demzufolge gibt es Auskunft über den Anstieg dieser Kurven und beschreibt somit die Sensitivität der Rückstreuung bezüglich einer Bodenfeuchteänderung in Abhängigkeit von deren Wertebereich. Klar erkennbar ist die höhere Sensitivität im Kanal L-VV. Am empfindlichsten reagiert die Rückstreuintensität auf Änderungen der Bodenfeuchte im Bereich um 20 Vol.%. Die Sensitivität geht sowohl mit steigender als auch mit sinkender Bodenfeuchte zurück. Eine Sättigung der Empfindlichkeit im Bereich hoher Bodenfeuchte (50 Vol.%) ist allerdings nicht festzustellen. Im Gegensatz dazu geht die Sensitivität von σ_{L-VV}^0 gegen Null, wenn die Bodenfeuchte Werte nahe Null annimmt. Die horizontale Kopolarisation reagiert im Bodenfeuchtebereich um 12 Vol.% am sensitivsten auf Änderungen dieses Parameters. Im Bereich hoher Bodenfeuchtwerte wirken sich Änderungen dieses Parameters jedoch kaum auf die Rückstreuintensität aus. Für Bodenfeuchteuntersuchungen ist demnach der Kanal σ_{L-VV}^0 zu bevorzugen.

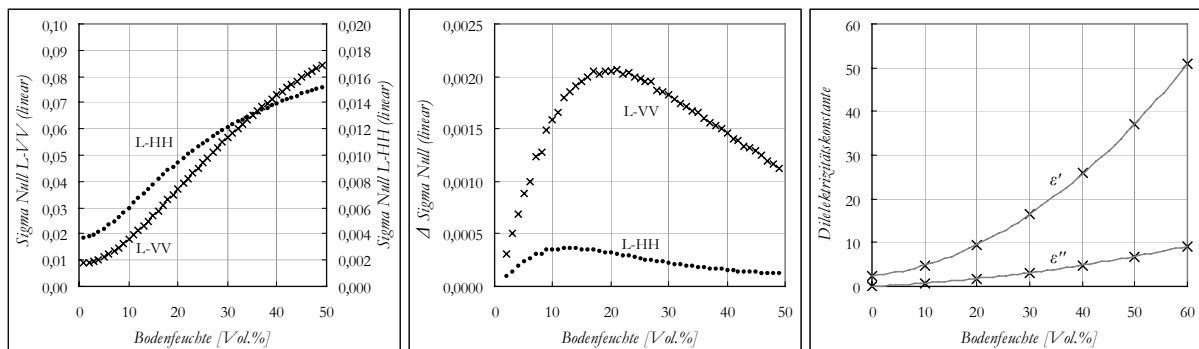


Abb. 4.48: Sensitivität betreffs der Bodenfeuchte in Abhängigkeit von deren Ausprägung

Im Folgenden wird die Empfindlichkeit der Rückstreuintensität für je zwei Parameter in Kombination analysiert. Auf diese Weise kann die Sensitivität des Modells hinsichtlich des ersten Parameters in Abhängigkeit vom zweiten Parameter betrachtet werden (und umgekehrt).

Abb. 4.49 zeigt die Rückstreuintensität als Funktion der beiden Rauigkeitsparameter s und l . Beide Kopolarisationen (links: horizontal, rechts: vertikal) zeigen ähnliche Reaktionen auf die Änderung von s und l . Für geringe Autokorrelationslängen nimmt (wie oben bereits diskutiert) die Rückstreuintensität mit der RMS-Höhe bis zu einem gewissen Punkt zu. Steigt s weiter, nimmt die Rückstreuintensität ab. Diese Beobachtung trifft indes nicht zu, wenn l /hohe Werte annimmt. Hier bewirkt eine stete Zunahme von s einen ebenfalls kontinuierlichen Anstieg der Rückstreuintensität. Dasselbe Bild ergibt sich bezüglich der Autokorrelationslänge. Der Wert der RMS-Höhe bestimmt den Zusammenhang zwischen l und σ^0 . Im Fall der

vertikalen Kopolarisation bewirken zwar auch hohe Zahlenwerte für s mit der Zunahme von l keine kontinuierliche Steigerung von σ_{L-VV}^0 . Hier existiert allerdings ein Schwellenwert für l , nach dessen Überschreitung ein weiterer Anstieg dieses Parameters keine entscheidende Wirkung mehr auf die Rückstreuintensität besitzt. Eine parallele Zunahme beider Rauigkeitsparameter zieht allerdings eine kontinuierliche Erhöhung der Rückstreuintensität nach sich.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Rahmen der für diese Arbeit relevanten Wertebereiche für s ($1 \text{ cm} < s < 3 \text{ cm}$) und l ($3 \text{ cm} < l < 10 \text{ cm}$) die RMS-Höhe einen immensen Einfluss auf die Rückstreuintensität besitzt. Im Vergleich zu s spielt die Autokorrelationslänge eine untergeordnete Rolle. Hier gilt es dennoch zu beachten, dass die Parameter θ und m_v (volumetrischen Bodenfeuchte) in dieser Analyse Konstanten sind. Die Verwendung anderer Zahlwerte für diese Größen (vor allem für θ) könnte zu abweichenden Ergebnissen führen.

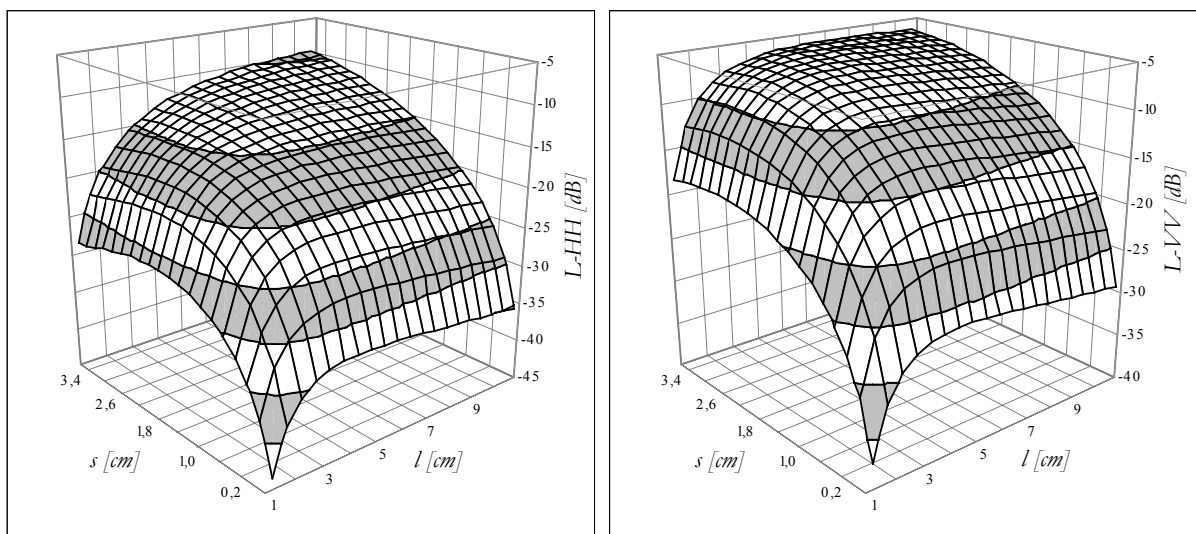


Abb. 4.49: Sensitivität der simulierten Rückstreuintensität hinsichtlich s und l ($\theta = 45^\circ$, $m_v = 20\%$)

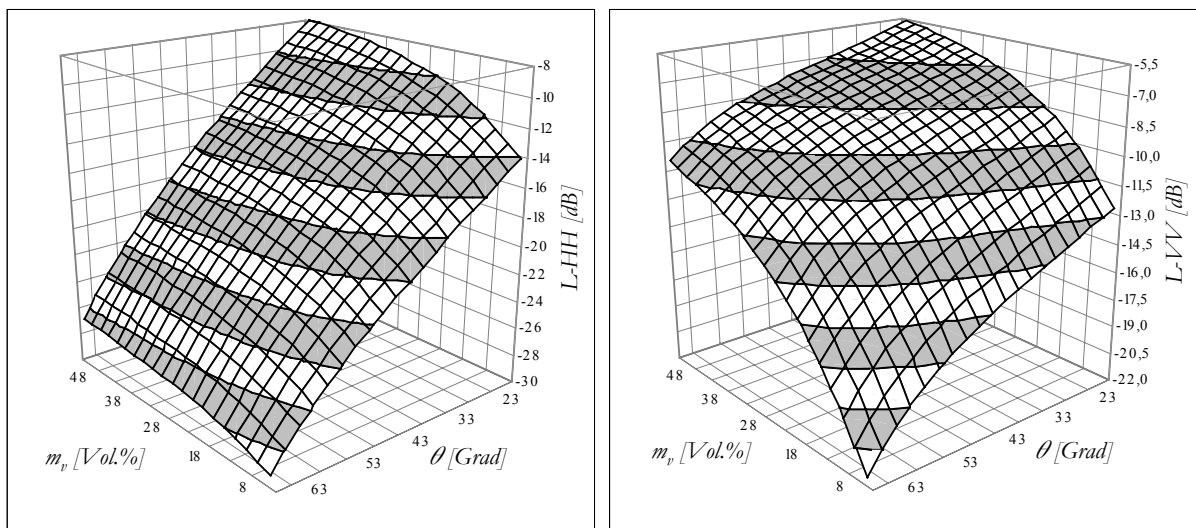


Abb. 4.50: Sensitivität der simulierten Rückstreuintensität hinsichtlich m_v und θ ($s = 1,5 \text{ cm}$, $l = 3,85 \text{ cm}$)

Abb. 4.50 zeigt die simulierte Radarrückstreuintensität in Abhängigkeit der Parameter m_v und θ . Hier bestehen klare Differenzen zwischen beiden Kopolarisationen. Während die Werte für L-HH in erster Linie eine Funktion des Lokalen Einfallswinkels sind, wird die Ausprägung der vertikalen Kopolarisation eher

durch die Bodenfeuchte bestimmt. Für beide Fälle gilt ohne Einschränkung: eine Zunahme der Bodenfeuchte sowie eine Abnahme des Lokalen Einfallswinkels resultieren in einem Anstieg der Rückstreuintensität. Der Grad dieses Anstieges ist wiederum von der Wahl der Wertepaare beider Parameter abhängig. Für L-VV beispielsweise gilt: mit der Zunahme von θ steigt die Sensitivität für Bodenfeuchte. Mit steigender Bodenfeuchte sinkt der Einfluss von θ . Gegensätzliches ist für die horizontale Kopolarisation festzustellen. Daraus kann (wie oben) geschlossen werden, dass die vertikale Kopolarisation für Bodenfeuchteanwendungen zu bevorzugen ist. Ebenfalls gilt es wie oben zu beachten, dass die Verwendung anderer Zahlenwerte für die konstant gehaltenen Parameter zu abweichenden Resultaten führen kann.

In der folgenden Abb. 4.51 wird die Rückstreuintensität mit der Oberflächenrauigkeit und der Bodenfeuchte in Beziehung gebracht. Da bei synthetischen Oberflächen (Acker) die Rauigkeitsparameter s und l nicht unabhängig voneinander sind (DAVIDSON et al. 2000 & 2001), wurde l aus s auf Basis des in DAVIDSON et al. (2001) vorgestellten linearen Zusammenhangs berechnet und in der Sensitivitätsanalyse eingesetzt. Die einzige Konstante ist θ . Beide Kopolarisationen reagieren gleichartig auf Veränderungen der Oberflächenparameter. Das Gewicht der Rauigkeit auf die Rückstreuintensität ist deutlich größer als jener der Bodenfeuchte. Verglichen mit der horizontalen Kopolarisation ist der Einfluss der Bodenfeuchte bei L-VV geringfügig größer, die Wirkung von Rauigkeitsänderungen (v.a. im Bereich hoher Rauigkeit) ist etwas geringer. Dies prädestiniert wiederum die vertikale Kopolarisation für Bodenfeuchteanwendungen. Zudem kann festgehalten werden, dass die Sensitivität hinsichtlich des einen Parameters nicht spürbar von der Ausprägung des jeweils anderen Oberflächenparameters bedingt wird.

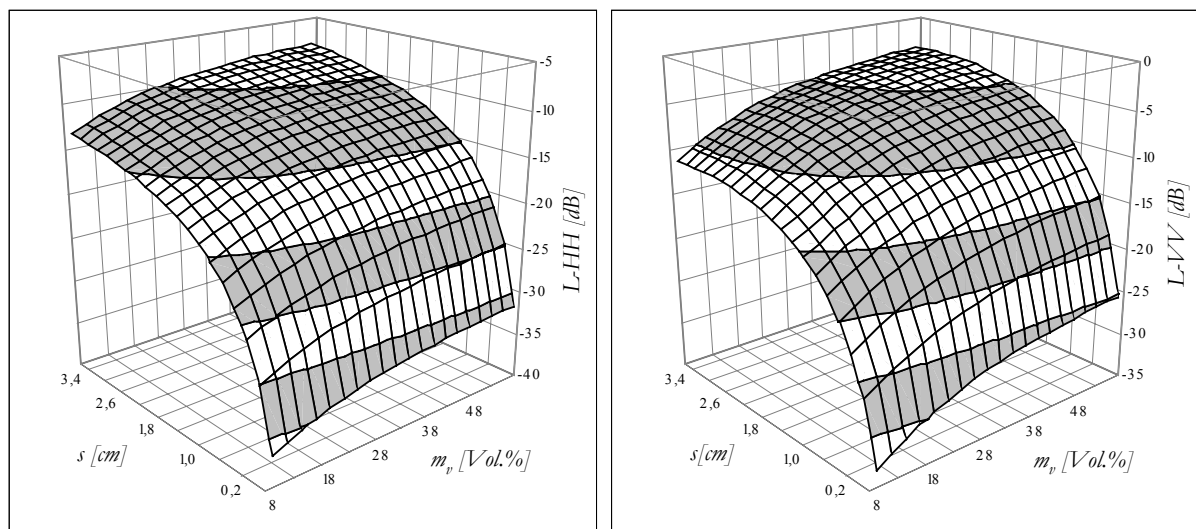


Abb. 4.51: Sensitivität der simulierten Rückstreuintensität hinsichtlich s und m_v ($\theta = 45^\circ$, $l = f(s)$)

Im letzten Fall (Abb. 4.52) wird die Abhängigkeit der Rückstreuintensität von der Oberflächenrauigkeit und dem Lokalen Einfallswinkel untersucht. Die Autokorrelationslänge wird wie zuvor aus der RMS-Höhe berechnet, die Bodenfeuchte ist konstant. Zwar reagieren die Kopolarisationen prinzipiell ähnlich auf Änderungen der variablen Parameter, dennoch können einige Unterschiede herausgestellt werden. Beispielsweise ist das Verhältnis zwischen der Sensitivität für θ und jener für die Rauigkeit bei L-HH wesentlich höher als jenes bei L-VV. Zudem besitzt σ_{L-HH}^0 einen größeren Wertebereich als σ_{L-VV}^0 . Bei der horizontalen Kopolarisation bewirkt eine Abnahme von θ in jedem Fall eine Zunahme der Rückstreuintensität. Im Fall der vertikalen Kopolarisation hingegen bewirkt bei hohen Rauigkeiten die stete Verminderung des Lokalen Einfallswinkels ab einem bestimmten Schwellenwert für θ eine geringe Abnahme der Rückstreuintensität. Für beide Kopolarisationen gilt: mit steigender Rauigkeit sinkt der Einfluss des Lo-

kalen Einfallswinkels. Des Weiteren ist die Sensitivität der Rückstreuung hinsichtlich der Oberflächenrauigkeit von θ abhängig. Bei hohen Lokalen Einfallswinkeln bewirkt die stete Zunahme der Rauigkeit einen kontinuierlichen Anstieg der Rückstreuintensität. Ist θ hingegen klein, nimmt die Rückstreuintensität bis zu einer bestimmten Rauigkeit (mittlere Rauigkeitswerte) zu, danach ist ein leichter Rückgang zu verzeichnen. Dafür besteht bei einem niedrigen Lokalen Einfallswinkel eine höhere Sensitivität für Rauigkeitsänderungen im unteren und mittleren Rauigkeitsbereich.

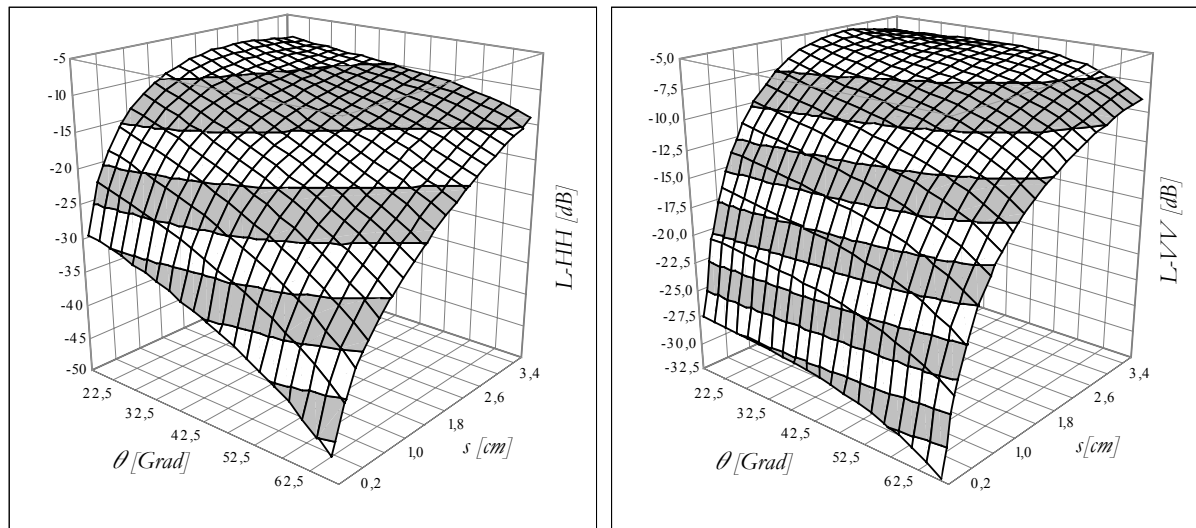


Abb. 4.52: Sensitivität der simulierten Rückstreuintensität hinsichtlich θ und s ($l = f(s)$, $m_v = 20\%$)

Die durch die Sensitivitätsanalyse gewonnenen Erkenntnisse erleichtern die folgende Diskussion der Modellergebnisse. Die bedeutendsten Fakten können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die vertikale Kopolarisation besitzt eine höhere Sensitivität für Bodenfeuchteänderungen.
- Die Sensitivität der Radarrückstreuung für m_v ist nahezu unabhängig von der Rauigkeit, sie wird aber geringfügig von θ gesteuert.
- Die Sensitivität der Radarrückstreuung für Änderungen der Oberflächenrauigkeit übersteigt deutlich jene hinsichtlich der Bodenfeuchte.
- Bezüglich der Rauigkeitsparameter besitzt die RMS-Höhe gegenüber der Autokorrelationslänge den fühlbar größeren Einfluss.
- Die Zunahme lediglich eines Oberflächenrauigkeitsparameters bewirkt nur bis zu einem gewissen Schwellenwert auch eine Zunahme der Radarrückstreuung (im *Single Scattering* IEM werden multiple Streuprozesse wie Volumenstreuung nicht berücksichtigt).
- Ein paralleler Anstieg von s und l zieht im Rahmen der betrachteten Wertebereiche eine kontinuierliche Erhöhung der Rückstreuintensität nach sich. Die Sensitivität geht jedoch mit steigender Rauigkeit zurück.
- Mit Zunahme der Rauigkeit nimmt die Sensitivität der Rückstreuintensität für θ ab.

Die in der obigen Analyse festgestellten Beziehungen zwischen Inputparametern und Rückstreuintensität sind konform mit den aus der SAR-Fernerkundung bekannten Grundsätzen. Diese Tatsache spricht für die Qualität des Modells. Dennoch könnten Probleme bei der Anwendung darauf beruhen, dass in der Simulation multiple Streuprozesse nicht berücksichtigt werden. Allerdings sind diese aufgrund der Verwendung großer Wellenlängen (L-Band) bei nahezu vegetationsfreien Oberflächen gering einzuschätzen.

4.5.4.2 Forward Modellierung

Die *Forward* Modellierung wurde wie bei den bereits diskutierten Modellen auf Basis der Einzelmessungen als auch anhand der Feldmittelwerte vollzogen (Abb. 4.53). Aus gegebenen Gründen fanden dieselben Messpunkte und Testflächen wie oben Verwendung.

Beide Diagramme der Abb. 4.53 demonstrieren das Potenzial des Modells, die Radarrückstreuung anhand der gegebenen Inputparameter zu simulieren. Die Gegenüberstellung der simulierten und gemessenen Rückstreuintensitäten zeigt für die Einzelmessungen gute, für die Feldmittelwerte sehr gute Korrelationen. Die Streuung der Punkte bei den Einzelmessungen wurde bereits im Rahmen der Diskussion der anderen Modelle begründet. Bezüglich der systematischen, in beiden Diagrammen evidenten Fehler (Anstieg der Trendlinie kleiner 1, Untersimulation), können die folgenden Ursachen angeführt werden: der zu geringe Anstieg der Trendlinie kann darauf hindeuten, dass das Modell zu empfindlich auf Variationen der Oberflächenparameter (Rauhigkeit & Feuchte) reagiert. Eine zu hohe Sensitivität bezüglich θ kann ausgeschlossen werden, da sich die Testflächen unterschiedlicher Rauhigkeiten über den gesamten Einfallswinkelbereich erstrecken. Eine weitere mögliche Ursache für den zu geringen Anstieg ist, dass bei den Feldmessungen das Wertespektrum der Oberflächenparameter überschätzt wurde. Für glatte Oberflächen wurden zu niedrige Rauhigkeitswerte ermittelt, sehr raue Oberflächen werden zu rau dargestellt. Ein entsprechender Effekt ist betreffs der Bodenfeuchte nicht auszuschließen.

Mit dem zu geringen Anstieg der Trendlinie steht die Untersimulation des Modells im Zusammenhang. Hiervon sind in erster Linie die niedrigen Rückstreuwerte und die horizontale Kopolarisation betroffen. Demzufolge können ähnliche Argumente wie zuvor als Ursachen angeführt werden. Bezüglich der korrekten Erfassung der Oberflächenparameter gilt, dass die Feldmessverfahren diese Größen im niedrigen Wertebereich unterschätzen. Ein weiterer möglicher Grund für die Untersimulation des Modells ist, wie im vorherigen Punkt bereits angesprochen, die Vernachlässigung multipler Streuprozesse. Nicht zuletzt können auch Ungenauigkeiten in den SAR-Daten als Fehlerursache herangezogen werden. Zu nennen sind hier in erster Linie Kalibrierungsfehler.

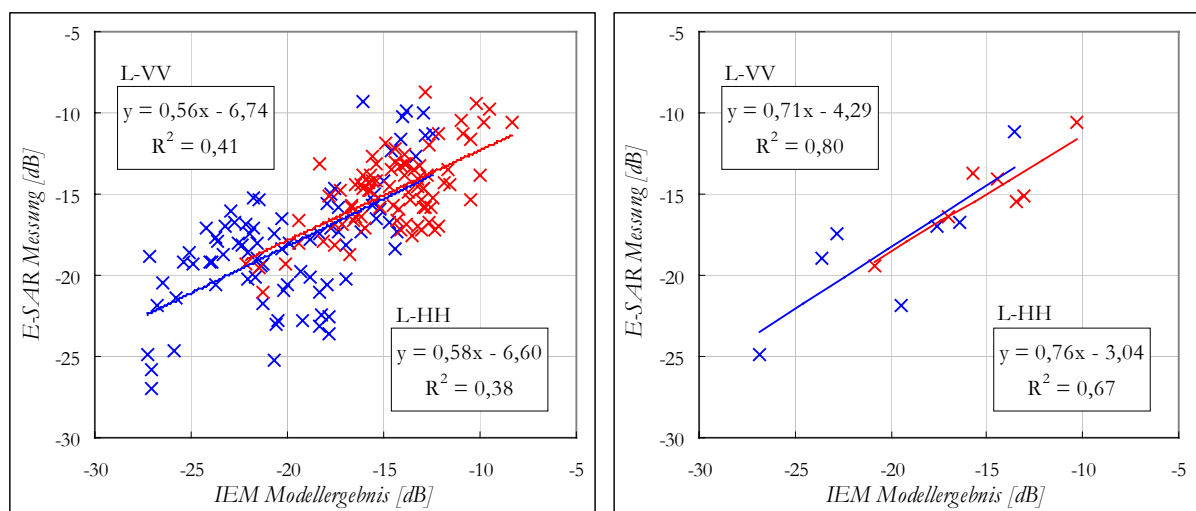


Abb. 4.53: *Forward* Ergebnisse mit IEM-Modell, L-Band (links: Einzelmessungen, rechts: Feldmittelwerte)

Dennoch kann zusammenfassend von guten Ergebnissen für die *Forward* Modellierung gesprochen werden. Die Abweichungen bei den Feldmittelwerten sind gering, die Trendgerade liegt hier nahe der 1:1 Linie. Allerdings ist aufgrund der geringen Zahl der Wertepaare eine sichere Analyse dieses Sachverhaltes nicht möglich. Im Hinblick auf die Gegenüberstellung zwischen Modellergebnis und SAR-Daten auf Basis der Einzelmessungen ist zu beachten, dass Rauhigkeitsschwankungen innerhalb einer Testfläche nicht

berücksichtigt werden konnten. Für den Fall, dass die Messung der Rauigkeit einer Testfläche für diese nicht repräsentativ ist, kommt es zu einer Verzerrung aller modellierten Rückstreuwerte dieser Fläche.

4.5.4.3 Inversion

Anhand der nachfolgenden Abb. 4.54 wird das Vorgehen der Inversion des IEM-Modells bezüglich der Dielektrizitätskonstante erläutert. Dieses Schema wurde in ähnlicher Weise ebenfalls für die Inversion betreffs der Oberflächenrauigkeit verwendet.

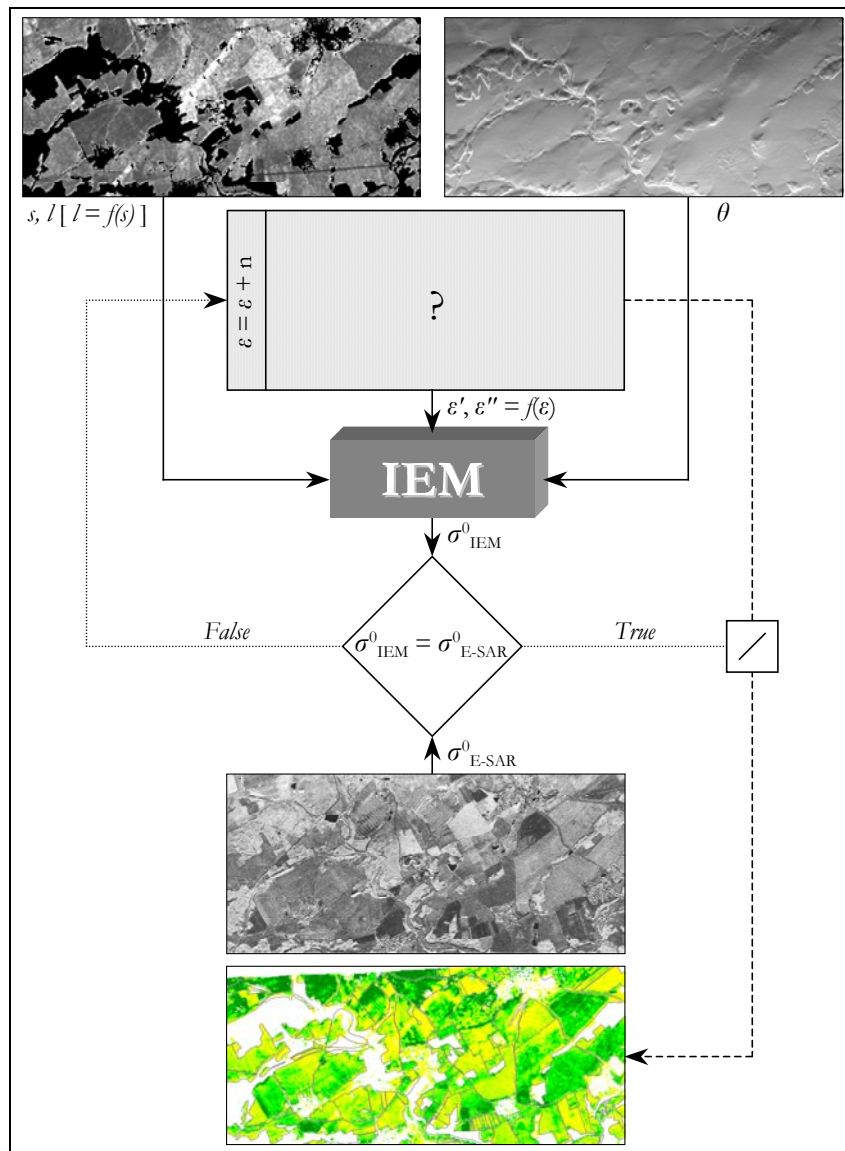


Abb. 4.54: Schema der Inversion des IEM-Modells

Für die Inversion wird das IEM-Modell in seiner ursprünglichen Form eingesetzt. Eine numerische Lösung der Modellgleichungen betreffs der gesuchten Parameter ϵ' und ϵ'' wurde nicht angestrebt. Demnach erfolgte die Ausführung des Modells im *Forward* Modus. Die Parameter s , l , θ und f (Frequenz, $f = 1,3$ GHz) gehen als pixel-spezifische Fixwerte in die Simulation ein. Die Dielektrizitätskonstante hingegen ist variabel und wird für jedes Pixel angepasst. Der Wertebereich wurde so gewählt, dass Minimum

und Maximum jeweils einer Bodenfeuchte von Null bzw. Einhundert Volumenprozent entsprechen. Die Anpassung erfolgt anhand eines iterativen Näherungsverfahrens. Ziel dieser Adaptation ist die Annäherung des simulierten Rückstreukoeffizienten an den tatsächlichen Messwert des Sensors. Unterschreitet die Differenz zwischen beiden Rückstreuintensitäten einen zuvor festgelegten Schwellenwert, werden Real- und Imaginärteil der Dielektrizitätskonstante in einer entsprechenden Matrix gespeichert. Dasselbe gilt für die Differenz zwischen simulierter und tatsächlicher Rückstreuintensität. Auf diese Weise kann im Anschluss geprüft werden, ob anhand der Anpassung von ϵ' und ϵ'' der jeweilige Rückstreukoeffizient im Rahmen des gültigen Wertebereichs der Dielektrizitätskonstante erreicht wurde.

Die Werte des Inputparameters θ entstammen der entsprechenden vom DLR gelieferten Karte. Die *a priori* Information bezüglich der RMS-Höhe basiert auf der unter Punkt 4.4.3 (Abb. 4.35) vorgestellten Rauheitskarte. Die Autokorrelationslänge wurde anhand dieser Daten für jedes Pixel berechnet. Die Kalkulation wurde auf Basis des in DAVIDSON et al. (2001) vorgestellten linearen Zusammenhangs zwischen s und l vollzogen. Eine ähnliche Beziehung zwischen beiden Größen konnte zwar auch in dieser Arbeit festgestellt werden. Dennoch wurde aufgrund der bereits diskutierten Schwierigkeiten im Rahmen der Erhebung der Autokorrelationslänge die Gleichung nach DAVIDSON et al. (2001) vorgezogen. Große Fehler als Folge dieser vereinfachenden Annahme ($l = f(s)$) sind nicht zu erwarten, da eine Änderung der Autokorrelationslänge (insbesondere im Bereich der hier auftretenden Werte) lediglich geringfügige Reaktionen der Rückstreuintensität bewirkt. Der entscheidende Rauheitsparameter ist die RMS-Höhe. Aus der Sensitivitätsanalyse geht hervor, dass die vertikale Kopolarisation eine höhere Sensitivität für Bodenfeuchte bzw. die dielektrischen Eigenschaften einer Oberfläche besitzt. Rauigkeit und Lokaler Einfallswinkel sind hier weniger relevant als für die horizontale Kopolarisation. Aus diesem Grund erfolgte die Inversion bezüglich der Dielektrizitätskonstante anhand des Kanals L-VV. Später wird die Inversion bezüglich der Rauigkeit vorgestellt. Für diesen Ansatz wird die horizontale Kopolarisation aufgrund ihrer hohen Sensitivität für Rauigkeit herangezogen.

Die drei Diagramme der Abb. 4.55 stellen das Verhältnis zwischen gemessener und der anhand der Inversion des IEM-Modells berechneter Dielektrizitätskonstante (Realteil) dar. Die ersten beiden Schaubilder präsentieren beispielhaft die Korrelation innerhalb je eines Feldes, das letzte beinhaltet feldübergreifend sämtliche Messpunkte der sieben verwendeten Testflächen. Die berechneten Werte für ϵ' entsprechen jeweils dem Mittelwert mehrerer benachbarter Pixels. Der Fehlerindikator steht für die Standardabweichung von ϵ' der in die Mittelwertberechnung einfließenden Pixels.

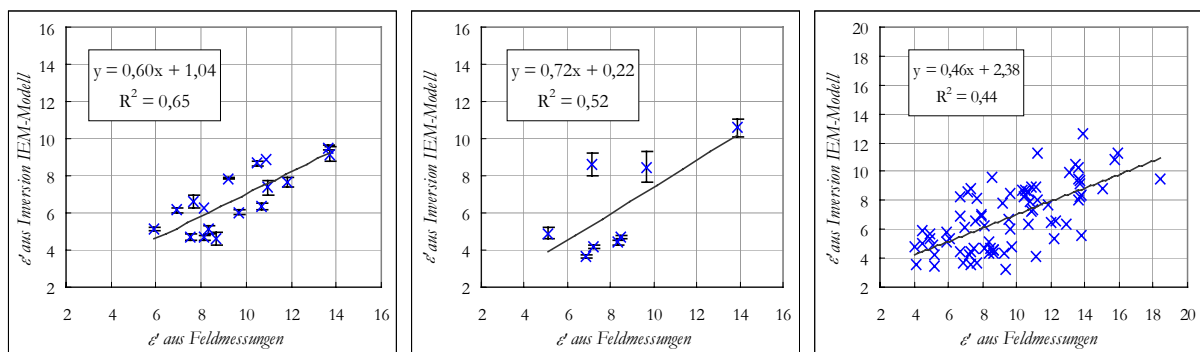


Abb. 4.55: Auf IEM-Modell basierende Inversion bezüglich ϵ'

(links: Feld Läwitz West, Mitte: Feld Tegau Mitte, rechts: sämtliche Messpunkte der sieben Testflächen)

In Bezug auf die feldübergreifende Gegenüberstellung von Messwert und Simulation konnte hier für ϵ' im Vergleich mit den anderen Modellen das beste Ergebnis erreicht werden. Trotz des immensen Einflusses

der Rauigkeit auf den Rückstreukoeffizienten sind die berechneten Werte der Dielektrizitätskonstante zwischen den Testflächen vergleichbar. Offenbar können die Einflüsse von Rauigkeit und Bodenfeuchte auf den Rückstreukoeffizienten anhand dieser Methode besser getrennt werden. Dabei gilt es dennoch zu beachten, dass dieser Art der Inversion des IEM-Modells eine zusätzliche Quelle möglicher Fehler inneohnt. Die flächenbezogene Oberflächenrauigkeit inklusive der Schwierigkeiten bei deren Bestimmung ist hier einer der Inputparameter. Die Ableitung der RMS-Höhe vom Realteil der RRLK-Kohärenz basiert auf einer empirischen Analyse inklusive der damit einhergehenden Unsicherheiten. Zwar bieten SCHULER et al. (2001) ansatzweise eine physikalische Erklärung für die Beziehung zwischen Rauigkeit und RRLK-Kohärenz, eine fundierte Formulierung des physikalischen Zusammenhangs (theoretisches Modell) steht allerdings noch aus. Unter diesen Aspekten kann von einer erfolgreichen Inversion des Modells gesprochen werden.

Die Streuung der einzelnen Punkte um die Trendlinie kann zum Großteil wie bei den zuvor diskutierten Modellen begründet werden. Eine Ausnahme stellt hier allerdings die Rolle der Rauigkeit dar. Bislang wurde diese Größe im Rahmen der Modellinversion unabhängig von den tatsächlichen Feldmessungen für jedes Pixel berechnet. Die Validierung erfolgte anschließend anhand der Geländeaufnahmen hinsichtlich der mittleren Rauigkeit einer Testfläche. Für die Inversion des IEM-Modells wird jedem Bildelement ein separater Rauigkeitswert zugewiesen. Demnach werden auch Rauigkeitsschwankungen innerhalb eines Feldes berücksichtigt. Da die einbezogene Rauigkeitskarte zum Großteil auf der RRLK-Kohärenz basiert, fließen die auf Phasenrauschen beruhenden Störungen (durch eine Filterung konnte der Effekt abgeschwächt, jedoch nicht beseitigt werden) ebenfalls in den Inversionsprozess ein. Die Wirkung des Speckle ist analog zu den anderen Modellen. Um den Effekt der räumlichen Variabilität der SAR-Daten bzw. der anhand dieser Daten generierten Rauigkeitskarte auf die Berechnung von ϵ' zu kontrollieren, wurde der Fehlerindikator hinzugefügt (Abb. 4.55, links und Mitte). Vor allem in Bezug auf das Feld Lävitz West kann die Variabilität der Dielektrizitätskonstante der in die Mittelwertberechnung einfließenden Pixels vernachlässigt werden. Die Standardabweichungen der Pixels aller Messpunkte sind klar geringer als die Differenzen zwischen den Messpunkten. Dies gilt im Prinzip ebenso für das Feld Tegau Mitte, auch wenn hier stellenweise höhere Standardabweichungen berechnet wurden. Neben den oben diskutierten Ursachen für eine Standardabweichung größer Null ist zu erwähnen, dass diesbezüglich auch tatsächlich vorliegende Schwankungen der Bodenfeuchte verantwortlich sein können.

Die Korrelation zwischen den anhand der Inversion berechneten sowie den gemessenen Werten für ϵ' ist durchaus zufriedenstellend. Dennoch weicht das durch die Trendlinie repräsentierte Verhältnis zwischen beiden Datenreihen deutlich von der 1:1 Linie ab. Die Schwankungsbreite der Messwerte ist in etwa doppelt so hoch wie jene der Modellergebnisse. Der Anstieg der Trendlinie ist mit ca. 0,5 zu gering. Ein merklicher *Offset* existiert jedoch nicht. Das Modell reagiert demnach zu sensitiv auf Änderungen des Bodenfeuchteinputs. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der *Forward* Modellierung. Hier berechnete das Modell anhand der gegebenen Oberflächenparameter einen größeren Wertebereich für die Rückstreuintensität, als tatsächlich durch den Sensor gemessen wurde.

Ein anderer Ansatz der Erklärung zielt erneut auf die Repräsentativität der Bodenfeuchtemessungen für die Radarrückstreuung ab. Während der Wassergehalt im Oberboden (ca. 5 cm) unter Umständen im gesamten Untersuchungsgebiet nur wenig variiert, kommt der große Wertebereich der gemessenen Bodenfeuchte durch den Einfluss von Bodenfeuchteschwankungen in größeren Messtiefen zustande. Dieses Szenario ist allerdings aufgrund der gegebenen hydrometeorologischen Situation nicht wahrscheinlich (siehe Punkt 4.1.1.1).

Als weitere Ursache der zu geringen Dynamik der simulierten Werte für ϵ' muss die Rolle der Rauigkeit geprüft werden. Ein fehlerhafter Rauigkeitsinput zieht falsche Resultate betreffs ϵ' nach sich. Wurde die Rauigkeit überschätzt, kommt es zur Unterschätzung der Dielektrizitätskonstante (analog zu Punkt

4.5.2). Dieses Gefüge führt allerdings nicht zu den festgestellten systematischen Fehlern. Zufällige Fehler der Rauigkeit bedingen zufällige Fehler von ϵ' . Eine systematische Unter- bzw. Überschätzung resultiert in einem positiven bzw. negativen *Offset* der berechneten Dielektrizitätskonstante. Der Anstieg der Trendlinie wird davon indes kaum beeinflusst. Eine weitere Möglichkeit systematischer Fehler im Hinblick auf den Rauigkeitsinput besteht in der Unter- bzw. Überschätzung der Rauigkeit in Abhängigkeit von den Rauigkeitswerten selbst. Denkbar wären zu hohe Werte im Bereich niedriger Rauigkeit, während hohe Rauigkeiten unterschätzt werden (bzw. entgegengesetzt). Da allerdings Bodenfeuchte und Oberflächenrauigkeit unabhängig voneinander sind, bzw. das Feuchtespektrum nicht durch die Rauigkeit bestimmt wird, kann der zu geringe Anstieg der Trendlinie auch durch derartige Fehler nicht begründet werden.

Eine letzte mögliche Erklärung bezieht sich erneut auf die Vernachlässigung multipler Streuprozesse in der verwendeten Version des IEM-Modells. Die primären Rückstreumechanismen spärlich bewachsener bzw. vegetationsfreier Oberflächen im L-Band sind Oberflächen- und Volumenstreuung, wobei der Anteil an Oberflächenstreuung überwiegt. Das jeweilige (für monostatische Systeme) sensorrelevante Verhältnis zwischen beiden Mechanismen wird in erster Linie durch die Oberflächenrauigkeit und den Lokalen Einfallswinkel gesteuert. Dabei steigt der Anteil der Volumenstreuung mit der Rauigkeit und θ . Dieser Zusammenhang führt allerdings nicht zur Klärung der zu geringen Dynamik der simulierten Werte für ϵ' , da das Spektrum der Bodenfeuchte mit keinem von beiden Parametern in Zusammenhang steht. Allerdings besteht ebenfalls eine Beziehung zwischen Volumenstreuanteil und Bodenfeuchte. Mit steigender Bodenfeuchte sinkt aufgrund der höheren Dielektrizitätskonstante die Fähigkeit der EM-Welle, in dieses Medium einzudringen. Der Anteil an Oberflächenstreuung steigt. Bei trockenen Böden hingegen dringt die Radarstrahlung tiefer ein, die EM-Welle wird innerhalb des Bodens aufgrund dessen Heterogenität gestreut. Ein Teil dieser Energie gelangt in größtenteils depolarisierter Form (Volumenstreuung) zurück zum Sensor. Dieser Anteil wird vom Modell nicht berücksichtigt. Infolgedessen wird die Dielektrizitätskonstante für Areale geringer Bodenfeuchte überschätzt. Der Betrag dieser Überschätzung nimmt mit steigender Bodenfeuchte und somit sinkendem Volumenstreuanteil ab. Somit ließe sich der relative systematische Fehler bezüglich der simulierten Werte für ϵ' auf diese Weise begründen. Eine Aussage bezüglich des in diesem Zusammenhang stehenden absoluten systematischen Fehlers ist anhand der zur Verfügung stehenden Daten nicht möglich. Ein Rückstreumodell für Volumenstreuung oder die Zerlegung der Rückstreuintensität nach Streumechanismen könnte hier Aufschluss bringen. Die Begründung des zu geringen Anstiegs der Trendlinie (siehe oben) durch das bodenfeuchteabhängige Auftreten von Volumenstreuung beinhaltet allerdings gleichzeitig die Aussage, dass eine Eliminierung der Volumenstreuung in einem negativen *Offset* bzw. einer Unterschätzung von ϵ' für dessen gesamten Wertebereich resultiert. Unter Annahme der Unabhängigkeit dieses *Offsets* vom jeweiligen Zahlenwert für ϵ' ergeben sich im wesentlichen zwei Erklärungen für diesen konstanten Fehler. Zum einen besteht die Möglichkeit der Überschätzung der Oberflächenrauigkeit, zum anderen kann dieser Fehler aus einer ungenauen absoluten Kalibrierung der SAR-Daten hervor gehen.

Trotz der zu geringen Dynamik der simulierten Werte für ϵ' besteht zwischen Inversionsergebnis und Messung eine zufriedenstellende Korrelation. Abb. 4.56 präsentiert die anhand der Inversion des IEM-Modells aus den SAR-Daten abgeleitete Karte des Realteils der Dielektrizitätskonstante für den zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes. Alle Testflächen liegen innerhalb dieses Areals. Ausmaskiert wurden erneut alle Bildbereiche, die nicht der Klasse „niedrige/keine Vegetation“ angehören. Flächen mit niedriger Vegetation, wie beispielsweise Winterrapsfelder, wurden folglich nicht ausmaskiert. Die Tatsache, dass hier trotz des frühen Wuchsstadiums der Pflanzen eine Wirkung auf das Rückstreusignal festgestellt wurde (siehe z.B. Punkt 4.4.2), gilt es bei der Interpretation der Karte zu berücksichtigen.

Das Verteilungsmuster von ϵ' (resp. der Bodenfeuchte) orientiert sich weniger an den Feldgrenzen. Die Variabilität innerhalb der Felder ist größtenteils höher als jene zwischen den Schlägen. Oberflächenrauig-

keit und Bodenfeuchte sind demnach voneinander unabhängig. Im Vergleich mit dem Interferometrischen Höhenmodell fällt auf, dass einige besonders feuchte Areale an Senken oder Mulden gebunden sind. Dennoch existieren einige Erscheinungen im Verteilungsmuster, die auf Unstimmigkeiten hindeuten. Dies betrifft in erster Linie Bereiche mit sehr glatter Oberfläche. Hier wurden vermutlich (für diese Flächen existieren keine Messwerte) zu niedrige Werte für ϵ' berechnet. Dies stünde dann im Zusammenhang mit einer Überschätzung der Oberflächenrauigkeit für diese Felder. Des Weiteren treten einige Bildbereiche aufgrund der im Verhältnis zur Umgebung hohen Werte für ϵ' hervor. Hier wurde möglicherweise die Rauigkeit unterschätzt. Als weitere mögliche Ursache kommt die Auswirkung von Feldvegetation auf den Rückstreukoeffizienten in Frage. Vor allem im L-VV steigt die Rückstreuintensität mit der Biomasse (Punkt 4.4.2). Im Modell werden derartige Effekte nicht kompensiert. Letztlich fallen einige Felder am Nordrand des Befliegungsstreifens wegen der hohen Bodenfeuchtwerte ins Auge. Dieser Bereich des Untersuchungsgebietes befindet sich im äußersten *Near Range*. Die Felder unterscheiden sich sowohl in ihrer Rauigkeit als auch in der Menge ihrer Biomasse. Hintergrund der zu hohen Werte für ϵ' ist vermutlich eine zusätzliche kohärente Komponente im Rückstreusignal. Dadurch erhöht sich zum einen die Rückstreuintensität, zum anderen wird die RRLL-Kohärenz verstärkt, was wiederum eine Unterschätzung der Rauigkeit bedingt.

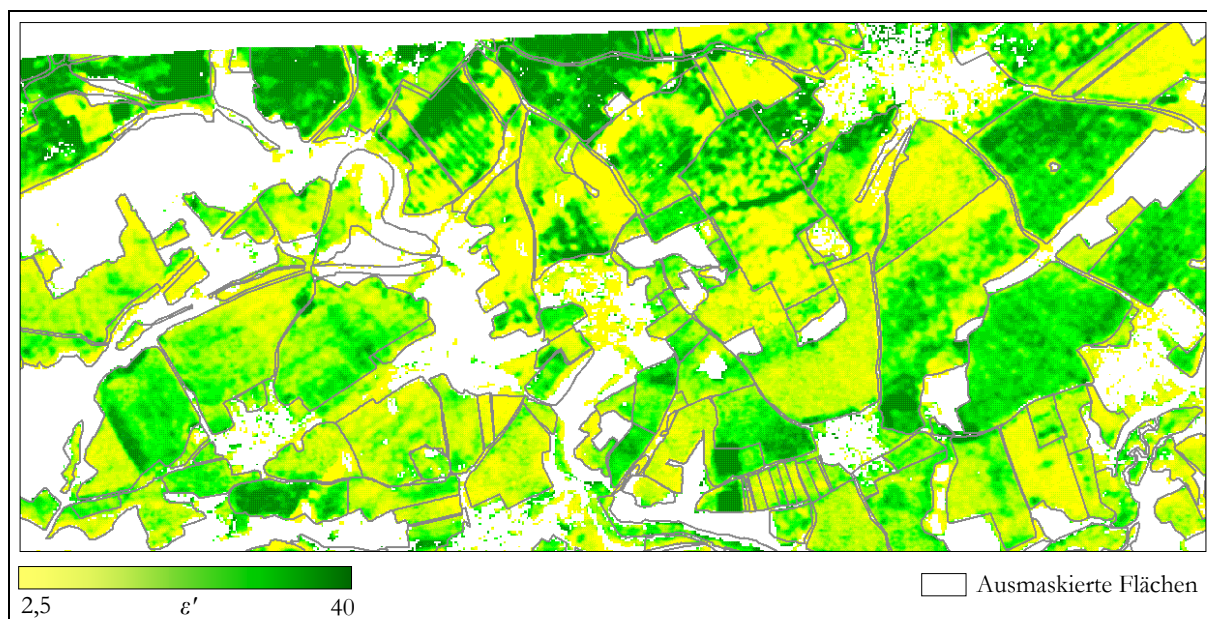


Abb. 4.56: Kartendarstellung von ϵ' , basierend auf der Inversion des IEM-Modells

Analog zum vorgestellten Verfahren kann die Inversion des IEM-Modells hinsichtlich der Bodenfeuchte ebenso auf Basis der horizontalen Kopolarisation durchgeführt werden. Zwar ist dieser Radarparameter weniger sensitiv für Bodenfeuchteänderungen, ein vergleichbares Ergebnis sollte dennoch erzielt werden. Voraussetzung ist eine ausreichende Kalibrierengenauigkeit der SAR-Daten. Dieser Schritt kann gleichsam als Kontrolle des Inversionsergebnisses betrachtet werden. Treten greifbare Differenzen zwischen beiden Resultaten auf, ist die Ursache möglicherweise im fehlerhaften Rauigkeitsinput zu suchen. Andererseits ist zu prüfen, inwieweit Vegetationseinflüsse für die Abweichungen zu verantworten sind. Im Rahmen dieser Arbeit war eine Inversion auf Basis der horizontalen Kopolarisation nicht möglich. Der für die Bodenfeuchte festgelegte Definitionsbereich reichte bei weitem nicht aus, um den Wertebereich der SAR-Daten zu erreichen. Auch bei maximaler Bodenfeuchte waren die berechneten Werte für σ_{L-HH}^0 um etwa 2 dB niedriger als die Messwerte. Die Ursache ist vermutlich in Problemen bei der Kalibrierung zu suchen.

Wie oben angedeutet, wurde das IEM-Modell ebenfalls hinsichtlich der Oberflächenrauigkeit invertiert. Das Schema der Inversion ist analog zum oben erklärten Ansatz (Abb. 4.54). Statt der Bodenfeuchte wird hier die Rauigkeit angepasst. Die Autokorrelationslänge wird erneut von der RMS-Höhe abgeleitet. Die Dielektrizitätskonstante ist unveränderlich und entspricht einer Bodenfeuchte von 25 Vol.%. Diese Vereinfachung der Inversion (Bodenfeuchte = konstant) wird dadurch legitimiert, dass der Einfluss der Rauigkeit auf das Rückstreusignal jenen der Bodenfeuchte um ein Mehrfaches übersteigt (Abb. 4.51). Dieses systematische Gefüge gilt insbesondere für L-HH, weshalb dieser Kanal für die Berechnung der Rauigkeit herangezogen wurde. Dennoch wird die im Gelände auftretende Variabilität der Bodenfeuchte zu einem zufälligen Fehler der anhand der Inversion ermittelten Rauigkeitswerte führen.

Abb. 4.57 zeigt den Vergleich zwischen Modellergebnissen und Messwerten der RMS-Höhe. In dieser Gegenüberstellung werden alle (16) verfügbaren Rauigkeitsmessungen separat berücksichtigt. Bei den anderen Modellen wurde mit Feldmittelwerten gearbeitet. In den Vergleich gehen beide Messrichtungen der Rauigkeit ein (links: orthogonal zur Flugrichtung, rechts: parallel). Der Fehlerindikator steht für die Standardabweichung von s der in die Mittelwertberechnung einfließenden Pixels. Die beiden einzigen Variablen dieser Inversion sind der Lokale Einfallswinkel sowie die Intensität der horizontalen Kopolarisation. Die Variabilität beider Größen steuert folglich die Standardabweichung von s . Da θ über den Bereich der Mittelung von s nahezu konstant ist und die Einfallswinkelabhängigkeit der Rückstreuung durch das Modell berücksichtigt wird, verbleibt σ_{L-HH}^0 als einziger Parameter mit einem Einfluss auf die Standardabweichung. Hauptursachen für die regionale Variabilität dieser Größe sind der Speckle sowie Unterschiede der Rauigkeit, Vegetation sowie der Bodenfeuchte. Diese Variabilität spielt allerdings für die Modellergebnisse keine Rolle. Die Standardabweichungen sind deutlich geringer als die Differenzen zwischen den Messpunkten.

Beide Diagramme zeigen eine gute Korrelation zwischen Modellergebnissen und Messwerten. Jedoch ist erneut darauf hinzuweisen, dass dieser Zusammenhang aufgrund der wenigen Messungen im oberen Rauigkeitsbereich unsicher ist. Der immense Einfluss der wenigen hohen Werte für s wird beim Vergleich beider Diagramme deutlich. Für den Anstieg der Trendgleichung sind primär die drei größten Wertepaare der RMS-Höhe verantwortlich. Die restlichen Punkte sind mehr oder weniger zufällig um die Trendlinie angeordnet. Somit resultiert eine geringe Modifikation jener Werte in einer immensen Änderung des Anstieges der Trendlinie. Diese Umstände lassen keine fundierte Interpretation der Diagramme zu.

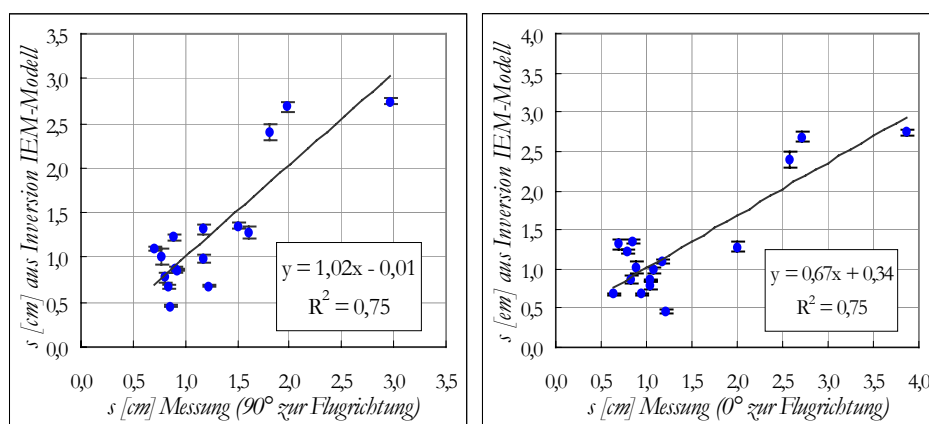


Abb. 4.57: Auf IEM-Modell basierende Inversion bezüglich s

Die Inversionsergebnisse für s werden ebenfalls in Kartenform präsentiert (Abb. 4.58). Dargestellt sind dieselben Bildbereiche wie in Abb. 4.56. Im Kontrast zum Abbild von ε' (Abb. 4.56) sind die Differenzen zwischen den Schlägen stärker ausgeprägt als innerhalb. Ein Großteil der Felder grenzt sich durch die jeweils spezifische Rauigkeit von den umliegenden Bereichen klar ab. Sehr glatte Oberflächen sind durch dunkelgrüne Farbtöne, glatte Oberflächen durch hellgrüne Farbtöne erkennbar. Rote Areale kennzeichnen sehr raue Oberflächen, während mittlere Rauigkeiten graue Schattierungen aufweisen.

Unter der idealen Voraussetzung, dass die geringen Vegetationsunterschiede bezüglich ihrer Wirkung auf σ_{L-HH}^0 zu vernachlässigen sind (vgl. Punkt 4.4.2), eine effektive Speckle-Filterung erfolgte und dass die tatsächliche Rauigkeit innerhalb eines Schlages konstant ist, sind die berechneten Rauigkeitsdifferenzen innerhalb der Felder auf Variationen der dielektrischen Eigenschaften der Oberfläche (Bodenfeuchte) zurückzuführen. Inwieweit diese Bedingungen tatsächlich zutreffen, kann im Detail zwar nicht geprüft werden. Fest steht jedoch, dass die vereinfachende Annahme einer konstanten Bodenfeuchte zu einem Fehler für die anhand der Inversion berechneten RMS-Höhe führt. Aus der Sensitivitätsanalyse geht hervor, dass eine Schwankung der Bodenfeuchte von ± 20 Vol.% bezüglich der Rückstreuintensität für L-HH einer Variation von ca. $\pm 0,5$ cm für s entspricht. Dieses Verhältnis ändert sich jedoch moderat in Abhängigkeit vom Wertebereich der Modellparameter. Geht man allerdings davon aus, dass die mittlere Bodenfeuchte aller Felder annähernd gleich ist, sind die berechneten Rauigkeitswerte zumindest im Feldmittel realistisch.

Im Gegensatz zur Karte für ε' fällt bei der Darstellung der RMS-Höhe der störende Einfluss der in Flugrichtung verlaufenden Überlandleitung im Südosten des Untersuchungsgebiets auf. Diese Leitung verursacht als Dipolstreuer eine immense Rückstreuung in der horizontalen Kopolarisation. Im Kanal L-VV hingegen ist sie für das SAR nahezu unsichtbar.

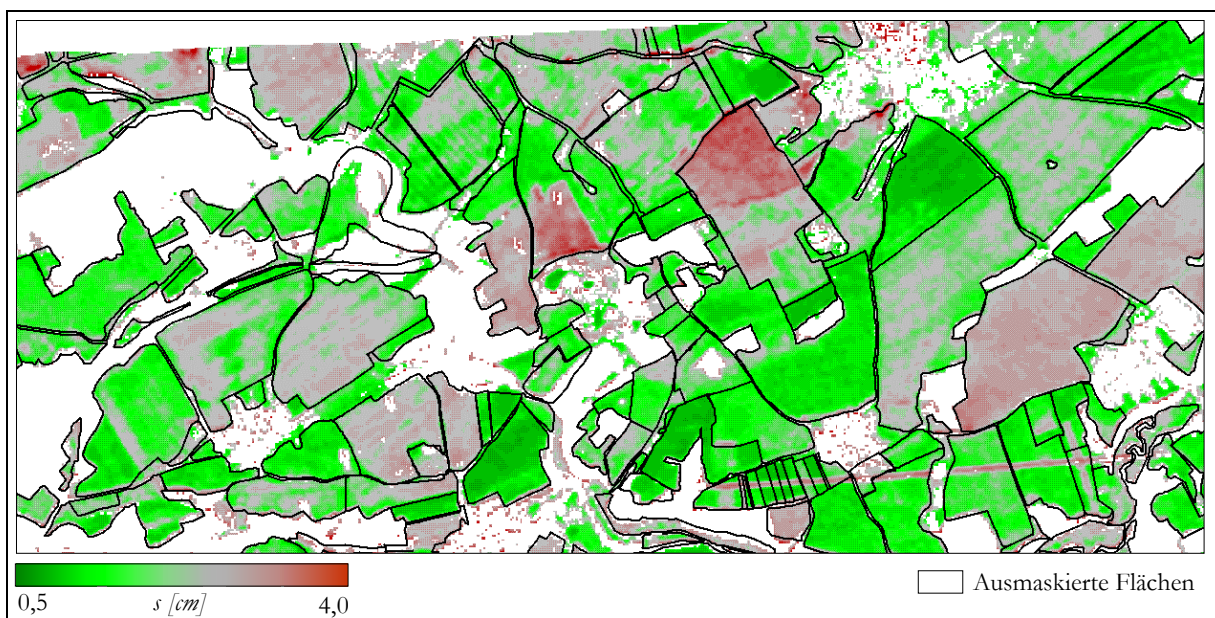


Abb. 4.58: Kartendarstellung von s , basierend auf der Inversion des IEM-Modells

4.5.3 Zusammenfassung der Radarrückstreumodellierung

Das Kapitel 4.5 befasste sich mit der modellgestützten Inversion der Radarrückstreuung in Bodenfeuchte und Oberflächenrauigkeit. Das Ziel war letztlich, die im Radarsignal vorliegende Mischinformation bezüglich dieser beiden Umweltparameter zu separieren. Der Einfluss der Vegetation auf die Rückstreuintensität wurde z.T. aufgrund der minimalen Biomasse vernachlässigt bzw. wurden Bereiche mit einem maßgeblichen Biomasseanteil aus der Modellierung ausgeschlossen.

Für die Modellierung wurden insgesamt vier verschiedene Modelle eingesetzt. Diese Modelle unterschieden sich im Grad der Kausalität, der Komplexität, dem Definitionsbereich sowie der Inversionsstrategie. Das Dubois-Modell (DUBOIS et al. 1995) sowie das Chen-Modell (CHEN et al. 1995) sind einfache empirische Ansätze für die Inversion der Radarrückstreuung in Bodenfeuchte und Oberflächenrauigkeit. Sie enthalten keine theoretischen Komponenten. Das Dubois-Modell kann numerisch invertiert werden, das Chen-Modell funktioniert ausschließlich im Inversionsmodus für Bodenfeuchte. Das Oh-Modell (OH et al. 1992) beinhaltet neben den empirischen Elementen mit dem Ansatz der Fresnel Reflexivität eine theoretische Komponente. Die vorliegende mathematische Komplexität erschwert die numerische Inversion des Modells. Anhand eines Näherungsverfahrens kann dieses Hindernis umgangen werden. Das IEM-Modell (FUNG 1994) ist ein komplexes theoretisches Verfahren für die Berechnung der Radarrückstreuung. Aufgrund der Unterbestimmung ist eine eindeutige Inversion der Radarrückstreuung in Bodenfeuchte und Oberflächenrauigkeit nicht möglich. In dieser Arbeit wurde dieses Problem durch die Anwendung von *a priori* Informationen und vereinfachende Annahmen eliminiert. Für die Inversion wurde ebenfalls ein Näherungsverfahren eingesetzt.

Im Hinblick auf die *Forward* Modellierung (ausgenommen Chen-Modell) kann zusammengefasst werden, dass alle Modelle prinzipiell in der Lage sind, die Radarrückstreuung als Funktion des Lokalen Einfallswinkels sowie der Oberflächenparameter zu simulieren. Speziell für die testflächenspezifischen Mittelwerte wurden hohe Übereinstimmungen erreicht. Dennoch ist bei sämtlichen Modellen eine Überschätzung des Wertebereichs der simulierten Rückstreuoeffizienten festzustellen. Dies äußert sich in einem zu geringen Anstieg der Trendgleichungen ($m < 1$, vgl. Abb. 4.38, 4.40 & 4.53). Am deutlichsten ist dieser Effekt beim Dubois-Modell, am geringsten und fast zu vernachlässigen beim Oh-Modell. Mögliche Ursachen wurden bereits ausführlich im Text (oben) diskutiert. Prägnant zusammengefasst sind dies:

- eine Übergewichtung des Einflusses der Umweltparameter in den Modellen,
- systematische Fehler bei der Geländeaufnahme der Umweltparameter (siehe Text oben) und
- Ungenauigkeiten im Rahmen der Kalibrierung der SAR-Daten.

Dabei ist es eher unwahrscheinlich, dass sämtliche Modelle unabhängig voneinander einen gleichartigen Fehler aufweisen. Zudem widersprüche diese These den Aussagen der entsprechenden Publikationen.

Die Resultate der Inversion spiegeln zum Teil die Schwierigkeiten der *Forward* Modellierung wider. Vor allem die Inversion der SAR-Daten in Bodenfeuchte ist problembehaftet. In sämtlichen Fällen (insbesondere beim Chen-Modell) wird die Dynamik der Bodenfeuchte unterschätzt. Der Anstieg der Trendlinie (die Modellergebnisse sind jeweils auf der Ordinate abgetragen) ist deutlich kleiner 1. Demnach reagieren die Modelle zu sensitiv auf Änderungen von m . Im Fall der Inversion bedeutet dies, dass die Variabilität der Rückstreuung nicht in ausreichendem Maße auf Bodenfeuchteschwankungen zurückgeführt wird. Ein positiver bzw. negativer *Offset* der Trendlinie resultiert zumeist aus einer Unter- bzw. Überschätzung der Oberflächenrauigkeit durch das Modell (vgl. Abb. 4.43). Vor allem anhand des Ansatzes von DUBOIS et al. (1995) war es nicht möglich, die Rauigkeits- und Bodenfeuchteinflüsse auf die Radarrückstreuung sauber zu trennen. Im Gegensatz dazu können die anhand der Inversion des IEM-Modells berechneten Bodenfeuchtwerte auch zwischen Testflächen mit unterschiedlicher Rauigkeit

verglichen werden. Allerdings ist hier zu berücksichtigen, dass die Rauigkeit extern hergeleitet wurde und als Modellinput zur Verfügung stand. Das Oh-Modell lieferte zwar gute *Forward* Ergebnisse, die Resultate der Inversion in Bodenfeuchte sind jedoch unbrauchbar.

Die Berechnung der Rauigkeit anhand dieses Ansatzes hingegen ergab einen guten Zusammenhang zwischen Modellergebnis und Messwerten. Jedoch wurden die ermittelten RMS-Höhen um den Faktor 2 überschätzt. Die Inversion des IEM-Modells sowie jene des Dubois-Modells erbrachten diesbezüglich gute Resultate. Die jeweils berechneten Rauigkeitswerte entsprechen in etwa denen der Feldmessungen. Problematisch bei dieser Beurteilung ist zwar die geringe Zahl der Rauigkeitsmessungen (insbesondere im Bereich hoher Rauigkeit). Die visuelle Analyse der generierten Rauigkeitskarten erweitert jedoch die Möglichkeiten der Genauigkeitsabschätzung um einige Felder. Der Vergleich dieser Karten mit den aus vorhandenen GIS-Daten (Anbaufrucht) abgeleiteten Rauigkeitskategorien bestätigt die guten Ergebnisse.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

5.1 Zusammenfassung der Arbeit

Diese Arbeit befasst sich mit der hydrologisch orientierten Extrahierung biophysikalischer Parameter aus hochaufgelösten, polarimetrischen L-Band sowie interferometrischen X-Band SAR-Daten. In diesem Zusammenhang stehen die folgenden Themenschwerpunkte:

- Prüfung des Effekts der polarimetrischen Information im Rahmen einer Klassifikation der Landbedeckung
- Aufbereitung des interferometrischen Höhenmodells unter Zugewinn weiterer Informationen wie Baum- und Gebäudehöhen
- Empirische sowie modellbasierte Ableitung von Oberflächenparametern.

Das methodische Vorgehen für das Erreichen dieser Ziele wurde bereits im Punkt 2.7 komprimiert dargestellt. Im Folgenden sind die wichtigsten Resultate dieser Arbeit sowie die daraus zu ziehenden Schlüsse bezugnehmend auf die Zielsetzung zusammengefasst. Die Auflistung erfolgt untergliedert nach Themenschwerpunkten.

Die Auswertung der Fachliteratur verdeutlicht das enorme Potenzial der Radarfernerkundung als Datenquelle für geowissenschaftliche Anwendungen. Dennoch ist hierbei anzumerken, dass für einen großen Teil der Einsatzmöglichkeiten noch keine operationellen Verfahren existieren, bzw. dass bestehende Methoden noch nicht die geforderten Ansprüche *in puncto* Exaktheit und Zuverlässigkeit erfüllen können. Daher befasst sich ein Großteil aktueller Untersuchungen damit, die Verwendbarkeit von Radarfernerkundungsdaten durch die Entwicklung neuer Methoden und Technologien sowie die Verfeinerung und Operationalisierung bestehender Methoden zu erweitern.

Ein kritischer Punkt jeder Untersuchung ist die Qualität der Daten, speziell jene der Geländemessungen. In diesem Zusammenhang steht die Frage, inwieweit die im Gelände gemessenen Parameter in der jeweiligen Form der Aufnahme überhaupt repräsentativ bzw. relevant für die Radarrückstreuung sind. Dies betrifft beispielsweise die numerische Darstellung der Oberflächenrauigkeit. Die Erfassung der RMS-Höhe im Gelände ist weitestgehend unproblematisch. Die hier verwendeten kurzen Messprofile bieten eine ausreichende Stichprobe für die sichere Berechnung des Parameters. Für eine exakte Ermittlung der Autokorrelationslänge ist diese Stichprobe indes zu klein. Für diesen Rauigkeitsparameter wurde zudem von LE TOAN et al. (1998) und DAVIDSON et al. (2000) eine Abhängigkeit von der Profillänge festgestellt. Außerdem betonen unter anderem MCDONALD et al. (1999), MATTIA et al. (2000) und DAVIDSON et al. (2000), dass die Beschreibung natürlicher Oberflächen anhand der monoskaligen Parameter s und l ohnehin nicht ausreichend ist. Zwar schlagen die Autoren die Verwendung multiskaliger Parameter vor, verdeutlichen aber, dass der für die Rückstreuung relevante Skalenbereich unbekannt ist.

Die Relevanz der dielektrischen Eigenschaften (resp. Bodenfeuchte) für die Radarrückstreuung sowie deren Bestimmung im Gelände sind bekannt. Dennoch bestehen Schwierigkeiten darin, repräsentative Bodenfeuchtemessungen zu erzeugen. Die lokale Variabilität dieser Größe erfordert pro Messpunkt eine immense Zahl von Stichproben über eine größere Flächenausdehnung (siehe Punkt 2.6, zweiter Gedankenstrich). In dieser Arbeit konnte die Repräsentativität trotz der zu geringen Stichprobenzahl pro Messpunkt dadurch aufrecht erhalten werden, dass die Messprofile einem Feuchtegradient folgen.

Die Klassifikation der Landbedeckung anhand von Standardverfahren sowohl auf alleiniger Basis der Intensitäten als auch unter integrativer Verwendung der polarimetrischen Parameter erbrachte exzellente Resultate. Durch die Einbeziehung der polarimetrischen Information konnte das Klassenspektrum bei vergleichbarer Klassifikationsgenauigkeit deutlich erweitert werden. Die Analyse der Trennungsindizes (*Jefferies-Matusita* Distanz) stellte eindeutig eine Verbesserung der Klassentrennbarkeit durch die Integration der Polarisationsparameter heraus.

Die Anwendung des Klassifikators für Polarisationsparameter von HELLMANN (2000) lieferte ohne eine Anpassung der Grenzen der linguistischen Variablen unbefriedigende Ergebnisse. Die verschiedenen ausgewiesenen Klassen konnten nicht sauber voneinander getrennt werden. Dies betraf in erster Linie die Separation von Wald und Siedlung sowie die Aufspaltung der restlichen vier Klassen. Nach Anpassung der Variablen wurde ein Resultat erzielt, das *in puncto* Genauigkeit etwa jenem von HELLMANN (2000) entspricht. Das Prinzip des Klassifikators ist demnach auf die verwendeten Daten übertragbar, wenngleich eine geringfügige Adaptation an diese Daten erforderlich war. Die Notwendigkeit dieser Anpassung begründet sich einerseits in den deutlichen Unterschieden zwischen beiden Untersuchungsgebieten aufweisen. Zum anderen ist nicht auszuschließen, dass Unsicherheiten, die radiometrische als auch die polarimetrische Kalibrierung betreffend, in fehlerhaften Abweichungen der Polarisationsparameter resultierten. Dennoch ist denkbar, dass durch die Analyse einer Vielzahl polarimetrischer Datensätze sowie durch die Einschränkung des Klassenspektrums allgemeingültige Grenzen für die linguistischen Variablen gefunden werden können. Weitere Fortschritte bezüglich der SAR-Datenkalibrierung sind vorauszusetzen.

Die Entwicklung des allgemeingültigen Klassifikationsschemas basiert auf demselben Grundgedanken wie der Ansatz von HELLMANN (2000): vergleichbare Landoberflächen (einschließlich der Vegetation) besitzen vergleichbare Rückstreuungseigenschaften. Durch die Verwendung eines umfangreicheren Datenpools konnte allerdings eine höhere Klassifikationsgenauigkeit erzielt werden. Die Ausweisung jeder Klasse erfolgte separat anhand der jeweils geeignetsten SAR-Parameter. Inwieweit dieses Schema auf andere Datensätze übertragbar ist, gilt es zu prüfen.

Das verwendete interferometrische Höhenmodell bildet aufgrund seiner hohen Auflösung eine Reihe von Details ab, die im DGM des LVA keine Berücksichtigung finden. Im Gegensatz zu einem Geländemodell stellt das interferometrische Höhenmodell die Oberkante der vorhandenen Vegetation (z.B. Wald) oder auch von Gebäuden dar. In Bereichen unzureichender interferometrischer Kohärenz (Wasserflächen) ist keine Höheninformation verfügbar. Durch die unterschiedliche Position der Streuzentren wird im Bereich von Waldkanten die Abschätzung der Baumhöhe ermöglicht. Der Vergleich zwischen dieser Abschätzung und den Geländemesswerten ergab eine bemerkenswerte Übereinstimmung.

Die Kombination von interferometrischem DHM und DGM des LVA erlaubte die Extrahierung von Baum- und Gebäudehöhen für das gesamte Untersuchungsgebiet. Zudem konnten durch dieses Verfahren die störenden Höhenabweichungen in Wald- und Siedlungsbereichen beseitigt werden. Prinzipiell sind die dafür notwendigen Arbeitsschritte operationell ausführbar. Die Genauigkeit der Ergebnisse wird vorrangig durch die Genauigkeit des Geländemodells, sofern dieses überhaupt zur Verfügung steht, bestimmt. Abhilfe könnte hier ein weiteres interferometrisches Höhenmodell, das unter Verwendung einer deutlich größeren Wellenlänge (P-Band, VHF-SAR) erzeugt wurde, schaffen.

Der Charakter der Radarrückstreuung wird neben den Systemparametern durch die biophysikalischen Eigenschaften der Erdoberfläche sowie vom Lokalen Einfallswinkel bestimmt. Dabei ist der funktionelle Zusammenhang zwischen einem Oberflächenparameter und Rückstreuung von der Ausprägung der jeweiligen anderen Größen abhängig. Die Entflechtung dieser Wechselbeziehungen und die damit in Verbindung stehende Ableitung der Oberflächenparameter erfolgt in der Regel anhand von Modellen.

Durch die Korrelationsanalyse stellte sich indes heraus, dass jeder Landoberflächenparameter mit anderen SAR-Parametern verknüpft ist. Auf dieser empirischen Grundlage war es möglich, je eine Karte für die feuchte Biomasse und die Oberflächenrauigkeit des gesamten Untersuchungsgebietes zu generieren. Als besonders sensitiv für die RMS-Höhe erwies sich die RRLL-Kohärenz. Die Wirkung der Bodenfeuchte auf die Rückstreuung ist weniger signifikant, die Ableitung empirischer Karten ist mit größeren Unsicherheiten behaftet. Spürbare Korrelationen zwischen SAR-Parametern und Bodenfeuchte konnten nur innerhalb weniger Felder nachgewiesen werden.

Primäres Ziel der Radarrückstreumodellierung war die Ableitung der Oberflächenparameter Rauigkeit und Bodenfeuchte. Verwendet wurden das Oh-Modell (OH et al. 1992), das Dubois-Modell (DUBOIS et al. 1995), das Chen-Modell (CHEN et al. 1995) und das *Integral Equation Method Model* (FUNG 1994). Während die Inversion der ersten drei Modelle operationell erfolgen kann, ist dieser Schritt bezüglich des IEM-Modells deutlich komplexer. Die mathematische Unterbestimmung schließt eine numerische Lösung aus. Dieses Problem konnte durch die Einbindung von *a priori* Information effektiv gelöst werden.

Zunächst erfolgte jedoch die Anwendung der Modelle im *Forward* Modus. Solide *Forward* Resultate sind die Voraussetzung einer erfolgreichen Inversion. Unter diesem Gesichtspunkt kann festgehalten werden, dass die Modelle prinzipiell in der Lage waren, die Radarrückstreuung als Funktion des Lokalen Einfallswinkels sowie der Oberflächenparameter zu simulieren. Anhand des Oh- und des IEM-Modells konnten die besten *Forward* Ergebnisse erzielt werden. Die Inversionsergebnisse bezüglich der Rauigkeit befinden sich in guter Korrelation mit den Messwerten. Im Falle des Oh-Modells werden diese allerdings um den Faktor 2 überschätzt. Die Inversion in Bodenfeuchte verlief weniger erfolgreich. Lediglich die Inversion des IEM-Modells liefert für das gesamte Untersuchungsgebiet brauchbare Ergebnisse.

Während die Ermittlung der Oberflächenrauigkeit zufriedenstellende Resultate erbrachte, zeigte die Inversion in Bodenfeuchte immense Unsicherheiten auf. Dies begründet sich nicht zuletzt darin, dass aktive SAR-Systeme eine höhere Sensitivität für Oberflächenrauigkeit als für dielektrische Eigenschaften des Bodens besitzen.

5.2 Ausblick

Ein Hauptanliegen jeglicher Forschung im Rahmen der Radarfernerkundung muss die Entwicklung effektiver, hinreichend exakter und operationalisierbarer Verfahren zur Messung relevanter Größen der Erdoberfläche (bzw. auch der anderer Himmelskörper) sein. Nur unter Berücksichtigung dieses Grundsatzes kann die Akzeptanz der Anwendergemeinde für diese Form der Datengenerierung gewonnen und die Radarfernerkundung aus dem experimentellen Status gehoben werden.

Die Erschließung neuer Verfahren bezieht die Entwicklung fortschrittlicher und operationell arbeitender Sensoren ein. Diese Sensoren sollten nach Möglichkeit das gesamte Spektrum, welches die mikrowellenbasierte Fernerkundung bietet (passive Verfahren inbegriffen), ausschöpfen. Erst durch das Zusammenspiel aller zur Verfügung stehenden Möglichkeiten kann das gesamte Potenzial der Radarfernerkundung abgeschätzt werden. Denkbar ist beispielsweise die Kombination aktiver und passiver Systeme. Auf diese Weise konnten HUANG & JIN (1995) ohne jegliche *a priori* Information Bodenfeuchte und Rauigkeit ableiten. Während aktive Systeme eine hohe Sensitivität für Pflanzenparameter und Rauigkeit besitzen, ist bei passiven Systemen die Bodenfeuchte bis zu einer Biomasse (Feuchtmasse) von 5 kg/m² die primäre Steuergröße (CALVET et al 2001).

Bestehende Inversionstechniken für Rückstreumodelle würden ebenfalls von dieser Entwicklung profitieren. So basiert der von BINDLISH & BARROS (2000) entwickelte und für vegetationsfreie Flächen operationell funktionierende Ansatz zur Inversion des IEM-Modells auf der Verwendung mehrerer Radarfrequenzen. Die Zahl nicht experimenteller SAR-Systeme, die den Datenansprüchen dieses Ansatzes genügen würden, ist allerdings sehr gering.

Die Klassifikation der Landbedeckung auf Basis aktiver SAR-Daten ist im hohen Maße vom Spektrum dieser Daten abhängig. Der Umfang der trennbaren Klassen sowie die Klassifikationsgenauigkeit nehmen mit den zur Verfügung stehenden Radarfrequenzen und Polarisationen zu. Dies gilt gleichermaßen für nutzergesteuerte als auch für operationelle und automatisierte Klassifikationsverfahren. Bei einer Vielzahl satellitengestützter Klassifikationsanwendungen muss bislang das Datenspektrum durch Erweiterung der zeitlichen Dimension (multitemporale Datenbasis) gestreckt werden, um eine hinlängliche Datengrundlage zu erzeugen.

Die während der letzten Jahre entwickelten Ansätze der Polarimetrischen Interferometrie sowie der SAR Tomographie (REIGBER & MOREIRA 2000) bieten einen faszinierenden Einblick in die Leistungsfähigkeit der Radarfernerkundung. Die integrative Verwendung der polarimetrischen als auch der interferometrischen Phase stellt extreme Ansprüche an Datenumfang und -qualität. Können diese Ansprüche erfüllt oder gar durch einen kompletten Datensatz einer zusätzlichen Frequenz erweitert werden, ergeben sich beachtliche Aussichten für die Extrahierung biophysikalischer Parameter.

6 REFERENZEN

- AGRAWAL A.P. & BÖRNER, W.M. (1989): Redevelopment of Kennaugh's Target Characteristic Polarization State Theory Using the Polarisation Ratio Formalism for the Coherent Case.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 27 (1), pp. 2-14.
- ALBERTZ, J. (1991): Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern – Eine Einführung in die Fernerkundung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- ALTESE, E. / BOLOGNANI, O. / MANCINI, M. & TROCH, P.A. (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.-In: Water Resour. Res. 32 (3), pp. 653-661.
- AMAR, F. / DAWSON, M.S. / A.K. FUNG & CHEN, K.S. (1995): Comparison of Neural Network Algorithms for Remote Sensing Applications.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 33(3), pp. 694-696.
- ASKNE, J.I.H. / DAMMERT, P.B.G. / ULANDER, L.M.H. & SMITH, G. (1997): C-Band Repeat-Pass Interferometric SAR Observation of the Forest.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 35 (1), pp. 25-35.
- ATTEMA, E.P.W. & ULABY, F.T. (1978): Vegetation Modelled as a Water Cloud.-In: Radio Sci. 13 (2), pp. 357-364.
- BASTIN, L. (1997): Comparison of Fuzzy C-Means Classification, Linear Mixture Modelling and MLC Probabilities as Tools for Unmixing Coarse Pixels.-In: Int. J. Remote Sensing 18 (17), pp. 3629-3648.
- BEAUDOIN, A. / GWYN, Q.H.J. / GLICHE, P. & BORDELEAU, G. (1989): An Economical Electronic Roughness Sampler for Radar Land Studies.-In: Proc. of IGARSS'89, Vancouver, July 1989, pp. 1181-1184.
- BERTUZZI, P. / CHÀNZY, A. / VIDAL-MADJAR, D. & AUTRET, M. (1992): The Use of a Microwave Backscatter Model for Retrieving Soil Moisture over Bare Soil.-In: Int. J. Remote Sensing 13 (14), pp. 2653-2668.
- BEZDEK, J. (1995): Clustering, Classification, and Feature Analysis with Neural and Fuzzy Models, SPIE short course, SC49.
- BINAGHI, E. / MADELLA, P. / GRAZIA MONTESANO, M. & RAMPINI, A. (1997): Fuzzy Contextual Classification of Multisource Remote Sensing Images.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 35(2), pp. 326-340.
- BINDLISH, R. & BARROS, A.P. (2000): Multifrequency Soil Moisture Inversion from SAR Measurements with the Use of IEM.-In: Remote Sens. Environ. 71, pp. 67-88.

- BLONDA, P. / BENNARDO, A. / LA FORGIA, V. & SATALINO, G. (1995): Modular Neural System, based on a Fuzzy Clustering Network, for Classification.-In: IEEE 33 (2), pp. 449-451.
- BOHL, H. (1996): Eichung von TDR zur Wassergehaltsbestimmung in Böden auf Basis gemischt-dielektrischer Modelle.-In: Bodenökologie und Bodengeneese 22, TU Berlin.
- BÖRNER, T. & PAPATHANASSIOU, K.P. (1998a): Modeling for Polarimetric SAR Interferometry.-In: Proc. PIERS Workshop on Advances in Radar Methods, Baveno.
- BÖRNER, T. & PAPATHANASSIOU, K.P. (1998b): A Model-Based Analysis of Surface Scattering Effects in Polarimetric SAR Interferometry, Proc. CD of EUSAR '98, Friedrichshafen, pp.61-64.
- BÖRNER, W.-M. (1996): Introduction to Radar Polarimetry – with Assessments of the Historical Development and the Current State-of-the-Art.-In: GURAN, A. / MITTRA, R. & MOSER, P.J. (eds.): Electromagnetic Wave Interactions – Reviews present during the Herbert Überall Sixty-Five Birthday – Emeritation Lecture Series at the Catholic University of America, World Scientific Publishing Co., Singapore, pp. 139-214.
- BÖRNER, W.-M. / MOTT, H. / LÜNEBURG, E. / LIVINGSTONE, C. / BRISCO, B. / BROWN, R.J. & PATERSON, J.S. (1998): Polarimetry in Radar Remote Sensing: Basic and Applied Concepts.-In: HENDERSON, F.M. & A.J. LEWIS (eds.) (1998): Principles and applications of imaging radar. 3rd ed., Wiley, New York.
- BRADLEY, G.A. & ULABY, F.T. (1981): Aircraft Radar Response to Soil Moisture.-In: Remote Sens. Environ. 11, pp. 419-438.
- BRUCKLER, L. & WITONO, H. (1989): Use of Remotely Sensed Soil Moisture Content as Boundary Conditions in Soil-Atmosphere Water Transport Modeling, 2, Estimating Soil Water Balance.-In: Water Resour. Res. 25(12), pp. 2437-2447.
- BRUCKLER, L. / WITONO, H. & STENGEL, P. (1988): Near Surface Soil Moisture Estimation from Microwave Measurements.-In: Int. J. Remote Sensing 26, pp. 101-121.
- BRUZZONE, L. / ROLI, F. & SERPICO, S.B. (1995): An Experimental Comparison of Neural Networks for the Classification of Multisensor Remote-Sensing Images.-In: IEEE 33 (2), pp. 452-453.
- CALVET, J.-C. & NOILHAN, J. (2000): From Near-surface to Root-zone Soil Moisture Using Year-round Data.-In: J. Hydrometeorology 1(5), pp. 393-411.
- CALVET, J.-C. / NOILHAN, J. / WIGNERON, J.-P. & KERR, Y. (2001): Root-zone Soil Moisture Analyses Using Microwave Radiometry.-In: Proc. CD of IGARSS'01, Sydney.
- CAMILLO, P.J. & SCHMUGGE, T.J. (1983): Estimating Soil Moisture Storage in the Root Zone from Surface Measurements.-In: Soil Sci. 135 (4), pp. 245-264.
- CAPEHART, W.J. & CARLSON, T.N. (1997): Decoupling of Surface and Near-Surface Soil-Water Content: A Remote Sensing Perspective.-In: Water Resour. Res. 33, pp. 1383-1395.
- CHEN, K.S. / YEN, S.K. & HUANG, W.P. (1995): A Simple Model for Retrieving Bare Soil Moisture from Radar-Scattering Coefficients.-In: Remote Sens. Environ. 54, pp. 121-126.

- CHOUDHURY, B.J. / SCHMUGGE, T.J. / NEWTON, R.W. & CHANG, T.C. (1979): Effect of Surface Roughness on Microwave Emission of Soils.-In: J. Geophys. Res. 84, pp. 5699-5706.
- CLOUDE, S.R. & CORR, D. (2003): Tree Height Retrieval Using Single Baseline Polarimetric Interferometry.-Proc. of the ESA-ESRIN PolInSAR Workshop, Frascati, January 14-16, 2003.
- CLOUDE, S.R. & POTTIER, E. (1995): Concept of Polarization Entropy in Optical Scattering.-In: Optical Engineering 34 (6), pp. 1599-1610.
- CLOUDE, S.R. & POTTIER, E. (1996): A Review of Target Decomposition in Radar Polarimetry.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 34 (2), pp. 498-518.
- CLOUDE, S.R. & POTTIER, E. (1997): An Entropy Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 35 (1), pp. 68-78.
- CLOUDE, S.R. (1992): Uniqueness of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry.-In: BÖRNER, W.-M. & H. BRAND (1992): Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry. Part 1, pp. 266-296, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht.
- CLOUDE, S.R. / HAJNSEK, I. & PAPATHANASSIOU, K.P. (2000): An Eigenvector Method for Extraction of Surface Parameters in Polarimetric SAR.-In: Proc. of the CEOS SAR Workshop, Toulouse, 26-29 Oct. 1999, ESA SP-450, March 2000.
- COLESANTI, C. / FERRETTI, A. / PRATI, C. & ROCCA, F. (2001): Seismic Faults Analysis in California by Means of the Permanent Scatterers Technique.-In: Proc. of Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Sheffield, 11-14 September, pp. 125-131.
- CORR, D.G. / CLOUDE, S.R. / FERRO-FAMIL, L. / HOEKMAN, D.H. / PARTINGTON, K. / POTTIER, E. & RODRIGUES, A. (2003): A Review Of The Applications Of SAR Polarimetry And Polarimetric Interferometry – An ESA Funded Study.-In: Proc. of the ESA-ESRIN PolInSAR Workshop, Frascati, January 14-16, 2003.
- CURLANDER, J.C. & MCDONOUGH, R.N. (1991): Synthetic Aperture Radar, Systems and Signal Processing, John Wiley & Sons, New York.
- DALTON, F.N. & VAN GENUCHTEN, M.TH. (1986): The Time-Domain Reflectometry Method for Measuring Soil Water Content and Salinity.-In: Geoderma 38, pp. 237-250.
- DASBERG, S. & HOPMANS, J.W. (1992): Time Domain Reflectometry Calibration for Uniformly and Nonuniformly Wetted Sandy and Clayey Loam Soils.-In: Soil Sci. Am. J. 56, pp. 1341-1345.
- DATHE, A. & DIEKKRÜGER, B. (1996): Messung des Bodenwassergehaltes mit TDR-Sonden.-In: Rodatz, W. (Hrsg.): Messen in der Geotechnik '96. - Mitt. Inst. Grundb. Bodenmech. 50, pp. 185-200.
- DAVIDSON, G.W. & BAMLER, R. (1996): A Multiresolution Approach to Improve Phase Unwrapping.-In: Proc. of IGARSS'96, pp. 2050-2053.
- DAVIDSON, M.W.J. / LE TOAN, T. / MATTIA, F. / SATALINO, G. / MANNINEN, T. & BORGEAUD, M. (2000): On the Characterization of Agricultural Soil Roughness for Radar Remote Sensing Studies.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 38 (2), pp. 630-640.

- DAVIDSON, M.W.J. / LE TOAN, T. / MATTIA, F. / SATALINO, G. / VERHOEST, N.E.C. & BERGEAUD, M. (2001): Improving Soil Moisture Retrieval by Incorporating a priori Information on Roughness Parameters.-In: Proc. CD-ROM of IGARSS 2001, 9-13 July, Sydney.
- DAVIDSON, M.W.J. / MATTIA, F. / SATALINO, G. / VERHOEST, N. / LE TOAN, T. / BERGEAUD, M. (2001): Statistical Properties of RMS Height and Correlation Length derived from Multisite Roughness Measurements.-not yet published.
- DAWSON, M.S. / FUNG, A.K. & MANRY, M.T. (1997): A Robust Statistical-Based Estimator for Soil Moisture Retrieval from Radar Measurements.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 35 (1), pp. 57-67.
- DINESH, M.S. / GWODA, K.C. & NAGABHUSHAN, P. (1997): Unsupervised Classification for Remotely Sensed Data using Fuzzy Set Theory.-In: Proc. of IGARSS, Vol. 1, pp.521-522.
- DIRKSEN, C. & DASBERG, S. (1993): Improved Calibration of Time Domain Reflectometry Soil Water Content Measurements.-In: Soil Sci. Soc. Am. J. 57, pp. 660-667.
- DOBSON, M.C. & ULABY, F.T. (1986): Active Microwave Soil Moisture Research.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing GE-24 (1), pp. 23-36.
- DOBSON, M.C. & ULABY, F.T. (1998): Mapping Soil Moisture Distribution with Imaging Radar.-In: HENDERSON, F. M. & A. J. LEWIS (eds.) (1998): Principles and applications of imaging radar. 3rd ed., Wiley, New York.
- DOBSON, M.C. / ULABY, F.T. / HALLIKAINEN, M.T. & EL-RAYES, M.A. (1985): Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil – Part II: Dielectric Mixing Models.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 23 (1), pp. 35-46.
- DOBSON, M.C./ ULABY, F.U. & PIERCE, L.E. (1995): Land-cover Classification and Estimation of Terrain Attributes Using Synthetic Aperture Radar.-In: Remote Sensing of Environment 51, pp. 199-214.
- DUBOIS, P.C. & VAN ZYL, J. (1994): An Empirical Soil Moisture Algorithm Using Imaging Radar.-In: Proceedings of IGARSS'94, pp. 1573-1575.
- DUBOIS, P.C. / VAN ZYL, J. & ENGMAN, T. (1995): Measuring Soil Moisture with Imaging Radar.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 33 (4), pp. 915-926.
- ENGMAN, E.T. & GURNEY, R.J. (1991): Remote Sensing in Hydrology. Chapman and Hall, London.
- ENGMAN, E.T. & WANG, J.R. (1987): Evaluating Roughness Models of Radar Backscatter.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing GE-25 (6), pp. 709-713.
- ENGMAN, E.T. (1995): Microwave Remote Sensing of Soil Moisture, Progress, Potential and Problems.-In: Proc. IGARSS '95, vol. I, IEEE, Florence, Italy, July 10-14, pp. 489-491.
- ENTIKHABI, D. / RODRIGUEZ-ITURBE, I. & CASTELLI, F. (1996) : Mutual Interaction of Soil Moisture State and Atmospheric Processes.-In: Journal of Hydrology 184, pp. 3-17.

- ERIKSSON, L.E.B. / SANTORO, M. / WIESMANN, A. /SCHMULLIUS, C. (2003): Multi-Temporal JERS Repeat-Pass Coherence for Growing Stock Volume Estimation of Siberian Forest.-In: IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing, Vol. 41, No. 7, pp. 1561-1570.
- EVANS, D.L. / FARR, T.J. / VAN ZYL, J.J. & ZEBKER, H.A. (1988): Radar Polarimetry: Analysis Tools and Applications.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 26 (6), pp. 774-789.
- FINK, M. (2004): Modellierung von Wasser- und Stickstoffhaushalt zur Unterstützung des Einzugsgebietsmanagements von Trinkwassertalsperren. Dissertationsarbeit an der Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie.
- FINK, M. / KRALISCH, S. / BECKSTEIN, C. & MAUDEN, R. (2003): Das Entscheidungsunterstützungssystem IWES und sein Einsatz bei der Thüringer Talsperrenverwaltung.-In: KA-Abwasser, Abfall 50(2), pp. 202-206.
- FLÜGEL, W.-A. & MÜSCHEN, B. (1999): Applied Remote Sensing and GIS Integration for Model Parameterization (ARSGISIP), First Progress Report.-Friedrich-Schiller-Universität Jena, Geographisches Institut, Lehrstuhl für Geoinformatik.
- FLÜGEL, W.-A. / FINK, M. / KRALISCH, S. & MÜSCHEN, B. (1999): Integriertes Wasserwirtschaftliches Entscheidungs-Unterstützungssystem (IWES) – Zwischenbericht der 1. Projektphase.-Universität Jena, Institut für Geographie.
- FOODY, G.M. & MCCULLOCH, M. B. (1995): The Effect of Training Set Size and Composition on Artificial Neural Network Classification.-In: Int. J. Remote Sensing 16 (9), pp. 1707-1723.
- FRANSSON, J.E.S. / WALTER, F. & ULANDER, L.M.H. (1998): Estimation of Forest Biomass Using CARABAS-II VHF SAR data.-In: Proc. of LandSAR Workshop, 21-23 October, ESTEC.
- FREEMAN, A. (1992): SAR Calibration: An Overview.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 30 (6), pp. 593-595.
- FROST, V.S. / STILES, J.A. / SHANMUGAN, K.S. & HOLTZMAN, J.C. (1982): A Model for Radar Images and its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise.-In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-4.
- FUNG, A.K. (1994): Microwave Scattering and Emission Models and their Applications.-Norwood, Artech House.
- FUNG, A.K. / DAWSON, M.S. / CHEN, K.S. / HSU, A.Y. / ENGMAN, E.T. / O'NEILL, P.E. & WANG, J. (1996): A Modified IEM Model for Scattering from Surfaces with Applications to Soil Moisture Sensing.-In: Proc. IGARSS'96, pp. 1297-1299.
- GABRIEL, A.K. / GOLDSTEIN, R.M. & ZEBKER, H.A. (1989): Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas: Differential Radar Interferometry.-In: Journal of Geophysical Research 94 (B7), pp. 9183-9191.

- GATELLI, F. / MONTI GUARNIERI, A. / PARIZZI, F. / PASQUALI, P. / PRATI, C. & ROCCA, F. (1994): The Wavenumbershift in SAR Interferometry.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 32 (4), pp. 855-865.
- GEBHARDT, M. / HORREL, J.M. & INGGIS, M.R. (1995): Comparison of Speckle Reduction Techniques Applied to Airborne SAR Imagery.-In: IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing 31(2), pp. 172-174.
- GEORGAKAKOS, K.P. & BAUMER, O.W. (1996): Measurements and Utilization of On-Site Soil Moisture Data.-In: J. Hydrol. 184, pp. 131-152.
- GHIGLIA, D.C. & ROMERO, L.A. (1994): Robust Two-Dimensional Weighted and Unweighted Phase Unwrapping that Uses fast Fourier Transforms and Iterative Methods.-In: Journal of Opt. Soc. Am. A11, pp. 107-117.
- GOLDSTEIN, R.M. / ZEBKER, H.A. & WERNER, C.L. (1988): Satellite Interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping.-In: Radio Sci. 23 (4), pp. 713-720.
- GRAHAM, L.C. (1974): Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping, Proc. IEEE, 62 (6), pp. 763-768.
- GRAY, A.L. & FARRIS-MANNING, P.J. (1993): Repeat-pass Interferometry with Airborne Synthetic Aperture Radar.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 31 (1), pp. 180-191.
- GRAYSON, R.B. & WESTERN, A.W. (1998): Towards Areal Estimation of Soil Water Content from Point Measurements: Time and Space Stability of Mean Response.-In: J. Hydrol. 207, pp. 68-82.
- HAEFFNER, H. & PAMPALONI, P. (1992): Water Resources.-In: Int. J. Remote Sensing 13 (6/7), pp. 1277-1303.
- HAGG, W. & STIES, M. (1994): Efficient Speckle Filtering of SAR Images.-In: Proc. IGARSS'94, pp. 2140-2142, Pasadena.
- HAGG, W. & STIES, M. (1996): The EPOS Speckle Filter. A Comparison with some Well-Known Speckle Reduction Techniques.-In: Proc. IGARSS'96, pp. 2335-2337, Lincoln.
- HAJNSEK, I. (2001): Inversion of Surface Parameters using Polarimetric SAR. Doctoral Thesis, Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme Oberpfaffenhofen, DLR-Forschungsbericht 2001-30.
- HAJNSEK, I. / ALVAREZ-PEREZ, J.-L. / PAPATHANASSIOU, K.P. / MOREIRA, A. & CLOUDE, S.R. (2003a): Surface Parameter Estimation Using Interferometric Coherences at Different Polarizations.-In: Proc. of the ESA-ESRIN PolInSAR Workshop, Frascati, January 14-16.
- HAJNSEK, I. / PAPATHANASSIOU, K.P. & CLOUDE, S.R. (2001a): L- and P-Band for Surface Parameter Estimation.-In: Proc. CD of IGARSS'01, Sydney.
- HAJNSEK, I. / PAPATHANASSIOU, K.P. & CLOUDE, S.R. (2001b): Removal of Additive Noise in Polarimetric Eigenvalue Processing.-In: Proc. CD of IGARSS'01, Sydney.

- HAJNSEK, I. / PAPATHANASSIOU, K.P. / REIGBER, A. & CLOUDE, S.R. (1999): Soil-Moisture Estimation Using Polarimetric SAR Data.-In: Proc. of IGARSS'99, Hamburg, pp. 2440-2442.
- HAJNSEK, I. / POTTIER, E. & CLOUDE, S.R. (2003b): Inversion of Surface Parameters From Polarimetric SAR.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 41 (4), pp. 727-744.
- HALLIKAINEN, M. / ULABY, F.T. / DOBSON, M.C. / EL-RAYES, M.A. & WU, L.-K. (1985): Microwave Dielectric Behaviour of Wet Soil – Part 1: Empirical Models and Experimental Observations.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 23, pp. 25-34.
- HEIMOVAARA, T.J. (1993): Time Domain Reflectometry in Soil Science: Theoretical Backgrounds, Measurements and Models. - Diss. Univ. Amsterdam.
- HELLMANN, M. (2000): Classification of Fully Polarimetric SAR-Data for Cartographic Applications. Doctoral Thesis TU Dresden, DLR-Forschungsbericht 2000-19.
- HELLMANN, M. / JÄGER, G. / KRÄTZSCHMAR, E. & HABERMEYER, M. (1999): Classification of Full Polarimetric SAR-Data using Artificial Neural Networks and Fuzzy Algorithms.-In: Proc. of IGARSS'99, Hamburg, Germany, July 1999.
- HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. (eds.) (1998): Principles and Applications of Imaging radar. 3rd ed., Wiley, New York.
- HOCHSCHILD, V. / BARTSCH, A. / KLENKE, M. (2000): Auswertung von ERS Tandem Daten zur Bestimmung der Flächennutzung im Mittelgebirgsraum.-In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG), Sonderheft Jena (5), pp. 345-348.
- HOEBEN, R. & TROCH, P.A. (1998): Development and Testing of a Soil Moisture Inversion Algorithm Based on Hydrological Modeling and Remote Sensing Through Advanced Filtering Techniques.-In: Retrieval of Bio- and Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications Workshop, ESTEC, 21-23 October, Noordwijk 1998.
- HOUSER, P.R. / SHUTTLEWORTH, W.J. / FAMIGLIETTI, J.S. & BERGLUND, J.A. (1997): Integration of Remote Sensing and Hydrologic Modeling Using Data Assimilation.-In: The American Meteorological Society Proc. of the 13th Conference on Hydrology, February 2-7, 1997.
- HOUSER, P.R. / SHUTTLEWORTH, W.J. / FAMIGLIETTI, J.S. / GUPTA, H.V. / SYED, K.H. & GOODRICH, D.C. (1998): Integration of Soil Moisture Remote Sensing and Hydrologic Modeling Using Data Assimilation.-In: Water Resour. Res. 34(12), pp. 3405-3420.
- HSIEH, C.Y. / FUNG, A.K. / NESTI, G. / SIEBER, A.J. & COPPO, P. (1997): A further Study of the IEM Surface Scattering Model.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 35 (4), pp. 901-909.
- HUANG, X. & JIN, Y.-Q. (1995): A Simple Method To Estimate the Soil Wetness and Surface Roughness by Using Active/Passive Microwave Data.-In: Remote Sens. Environ. 53, pp. 212-214.
- IMKO MICROMODULTECHNIK GMBH (2003): About TRIME.-At: Homepage: www.imko.de, 20.08.2003.
- ISOLA, M. & CLOUDE, S.R. (2001): Forest Height Mapping Using Space-Borne Polarimetric SAR Interferometry.-In: Proc. CD of IGARSS'01, Sydney.

- ISRAELSSON, H. / ULANDER, L.M.H. / ASKNE, J. / FRANSSON, J.E.S. / FROLIND, P.-O. / GUSTAVSSON, A. & HELLSTEN, H. (1997): Retrieval of Forest Stem Volume Using VHF SAR.- In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 35 (1), pp. 36-40.
- ITO, Y. & OMATU, S. (1998): Polarimetric SAR Data Classification using Competitive Neural Networks.- In: Int. J. Remote Sensing 19 (14), pp. 2665-2684.
- JACKSON, T.J. & O'NEILL, P. (1987): Temporal Observation of Surface Soil Moisture Using A Passive Microwave Sensor.-In: Remote Sens. Environ. 21, pp. 281-296.
- JACKSON, T.J. & SCHMUGGE, T.J. (1991): Vegetation Effects on the Microwave Emission of Soils.-In: Remote Sens. Environ. 36, pp. 203-212.
- JACKSON, T.J. (1980): Profile Soil Moisture from Surface Measuring.-In: J. Irrig. Drain. Div., Proc. Am. Soc. Civ. Eng., 106(IR2), pp. 81-92.
- JACKSON, T.J. (1993): Measuring Surface Soil Moisture using Passive Microwave Remote Sensing.- In: Hydrological Processes 7, pp. 139-152.
- JACKSON, T.J. / LE VINE, D.M. / SWIFT, C.T. / SCHMUGGE, T.J. & SCHIEBE, F.R. (1995a): Large Area Mapping of Soil Moisture using the ESTAR Passive Microwave Radiometer in Washita '92.-In: Remote Sens. Environ. 53, pp.27-37.
- JACKSON, T.J. / O'NEILL, P.E. / KUSTAS, W.P. / BENNET, E. & SWIFT C.T. (1995b): Passive Microwave Observation of Diurnal Soil Moisture at 1.6 and 2.65 GHz.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 33 (2), pp. 492-494.
- JACOBSON, O.H. & SCHJØNNING, P. (1993): Field Evaluation of Time Domain Reflectometry for Soil Water Measurements.-In: J. Hydrol. 131, pp. 159-172.
- JUST, D. / ADAM, N. / SCHWÄBISCH, M. & BAMLER, R. (1995): Comparison of Phase Unwrapping Algorithms for SAR Interferograms.-In: Proc. IGARSS, Vol. 3, pp. 767-769, Firenze, Italy, July 1995.
- KIM, K.-O. / YANG, Y.-K. / LEE, J.-H. / CHOI, K.-H. & KIM, T.-K. (1995): Classification of Multispectral Image Using Neural Network.-In: IEEE 33(2), pp. 446-448.
- KONG, J.A. (1990): Polarimetric Remote Sensing.-In: Progress in Electromagnetic Res. (PIER) 3, Elsevier, New York.
- KROGAGER, E. & BÖRNER, W.-M. (1996): On the Importance of Utilizing Complete Polarimetric Information in Radar Imaging and Classification.-In: AGARD Symposium: Remote Sensing – A Valuable Source of Information, Toulouse, France, April 22-25, AGARD Proc. 528, pp. 17-1 – 17-12.
- KROGAGER, E. & MADSEN, S.N. (1996): Comparison of Various Decompositions for Analysis, Interpretation and Classification of Polarimetric SAR Images.-In: European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR '96 Königswinter, Germany, March 26-28, pp. 105 - 108.

- LAKSHMI, V. / BOLTON, J. / GUHA, A. & ZEHRFUHS, D. (2001): Remote Sensing of Soil Moisture at Various Spatial Scales.-In: Proc. CD of IGARSS'01, Sydney.
- LAYMON, C.A. / CROSSON, W.L. / SOMAN, V.V. / JACKSON, T.J. / MANU, A. & TSEGAYE, T.D. (1998): Multifrequency Ground-Based Microwave Remote Sensing of Soil Moisture.-In: Proc. IGARSS '98, 6-10 July, Seattle, USA.
- LE TOAN, T. / DAVIDSON, M. / BORDERIES, P. / MATTIA, F. / TERHIKKI, M. & BORGEAUD, M. (1998): Improved Observation and Modelling of Bare Soil Surfaces for Soil Moisture Retrieval.-In: Retrieval of Bio- and Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications Workshop, ESTEC, 21-23 October, Noordwijk 1998.
- LEE, J.-S. (1986): Speckle Suppression and Analysis for Synthetic Aperture Radar Images.-In: Optical Engineering 25(5), pp. 636-643.
- LEE, J.S. / GRUNES, M.R. & DE GRANDI, G. (1997): Polarimetric SAR Speckle Filtering and its Impact on Classification.-In: Proc. of IGARSS'97, Singapore.
- LEE, J.S. / GRUNES, M.R. & KWOK, R. (1994): Classification of Multi-look Polarimetric SAR Imagery Based on Complex Wishart Distribution.-In: Int. J. Remote Sensing 15 (11), pp. 2299-2311.
- LEE, J.S. / GRUNES, M.R. / POTTIER, E. & FERRO-FAMIL, L. (2001): Segmentation of Polarimetric SAR Images.-In: Proceedings CD-ROM of IGARSS'01, Sydney.
- LEWIS A.J. & HENDERSON, F.M. (1998): Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective.-In: HENDERSON, F.M. & A.J. LEWIS (eds.) (1998): Principles and Applications of Imaging Radar. 3rd ed., Wiley, New York.
- LEWIS A.J. (1998): Geomorphic and Hydrologic Applications of Active Microwave Remote Sensing.-In: HENDERSON, F.M. & A.J. LEWIS (eds.) (1998): Principles and Applications of Imaging Radar. 3rd ed., Wiley, New York.
- LIN, D.-S. / WOOD, E.F. / BEVEN, K. & SAATCHI, S. (1994): Soil Moisture Estimation over Grass-Covered Areas using AIR-SAR.-In: Int. J. Remote Sensing 15 (11), pp. 2323-2343.
- LOPES, A. / NEZRY, E. / GOZE, S. / TOUZI, R. & AARBAKKE SOLAAS, G. (1992): Adaptive Processing of Multilook Complex SAR Images.-In: Proc. Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'92, Houston, pp. 890-892.
- LORD, R.T. & INGG, M.R. (2000): Measurements and Characteristics of RFI for a Low-Bandwidth VHS SAR System.-In: Proc. European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR 2000, May 2000, Munich, Germany, pp. 845-848.
- LORD, R.T. / WILKINSON, A.J. & INGG, M.R. (2000): Experiences with the South African VHF Synthetic Aperture Radar.-In: Proc. of South African Geophysical Association, SAGA 2001, October 2001, Drakensberg Mountains, South Africa.
- LÜNEBURG, E. (1995): Principles of Radar Polarimetry.-In: Proc. of Trans. on Electronic Theory E78-C, 10, pp. 1339-1245.

- MADHOK, V. & LANDGREBE, D.A. (2002): A Process Model for Remote Sensing Data Analysis.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 40 (3), pp. 680-686.
- MADSEN, S.N. & ZEBKER H.A. (1998): Imaging Radar Interferometry.-In: HENDERSON, F.M. & A.J. LEWIS (eds.) (1998): Principles and Applications of Imaging Radar. 3rd ed., Wiley, New York.
- MAHESHWARLA, S.V. / VENKATASUBRAMANIAN, R. & BOEHM, R.F. (1995): Comparison of Time Domain Reflectometry Performance Factors for Several Dielectric Geometries: Theory and experiments.-In: Water Resour. Res. 31 (8), pp. 1927-1933.
- MAHR, A. & HORN, R. (1991): Erfassung von Wasserhaushaltsparametern organischer Bodenhorizonte unter Verwendung der Time Domain Reflectometry (TDR).-In: Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch. 66, I, pp. 173-176.
- MALLANTS, D. / VANCLOOSTER, M. / TORIDE, N. / VANDERBORGHT, J. / VAN GENUCHTEN, M.TH. & FEYEN, J. (1996): Comparison of Three Methods to Calibrate TDR for Monitoring Solute Movement in Undisturbed Soil.-In: Soil Sci. Soc. Am. J. 60, pp. 747-754.
- MASSONNET, D. (1996): Tracking the Earth's Surface at the Centimetre Level: An Introduction to Radar Interferometry.-In: Nature & Resources 32(4), pp. 20-29.
- MATTIA, F. / LE TOAN, T. / DAVIDSON, M.W.J. / BORDERIES, P. / BACHELIER, E. & BORGEAUD, M. (2000): On the Effect of Multi Scale Surface Roughness on SAR Data.-In: Proc. of the CEOS SAR Workshop, Toulouse, 26-29 Oct. 1999, ESA SP-450, March 2000.
- MATTIA, F. / LE TOAN, T. / SOUYRIS, J.-C. / DE CAROLIS, G. / FLOURY, N. / POSA, F. & PASQUARIELLO, G. (1997): The Effect of Surface Roughness on Multifrequency Polarimetric SAR data.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 35(4), pp. 954-966.
- MAUSER, W. / ROMBACH, M. / BACH, H. / STOLZ, R. / DEMIRCAN, A. & KELLNDORFER, J. (1994): The Use of ERS-1 Data for Spatial Surface Moisture Determination.-In: First Workshop on ERS-1 Pilot Projects, Toledo 22.-24. June, pp. 61-73.
- MCDONALD, A.J. / CROSSLEY, S. / BENNETT, J.C. / BROWN, S.C.M. / COOKMARTIN, G. / MORRISON, K. / QUEGAN, S. (1999): Stereo Vision Measurements of Soil Surface Characteristics and their Use in Model Validation.-In: Proc. CEOS SAR Workshop ESA-CNES, October 1999, Toulouse.
- MCNAIRN, H. / DUGUAY, C. / BRISCO, B. & T. PULTZ, J. (2002): The Effect of Soil and Crop Residue Characteristics on Polarimetric Radar Response.-In: Remote Sens. Environ. 80, pp. 308-320.
- MÜSCHEN, B. / FLÜGEL, W.A. / HOCHSCHILD, V. / STEINNOCHER, K. / QUIEL, F. / XIE, X. (2000): Derivation of Hydrological and Solute Transport Model Parameters by Remote Sensing Methods in the ARSGISIP Project.-In: Photogrammetrie – Fernerkundung - Geoinformation, Sonderheft Jena (5), pp. 321-332.

- NUTZ, P. (1992): Statistische Methoden zur Unterstützung der überwachten Klassifizierung von Fernerkundungsdaten.-In: GÜNTHER, O. & RIEKERT, W.-F. (Hrsg.) (1992): Wissensbasierte Methoden der Fernerkundung der Umwelt. CHEN, K.S. / YEN, S.K. & HUANG, W.P. (1995): A Simple Model for Retrieving Bare Soil Moisture from Radar-Scattering Coefficients.-In: Remote Sensing Environment 54, pp. 121-126.
- OH, Y. / SARABANDI, K. & ULABY, F.T. (1992): An Empirical Model and an Inversion Technique for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces.-In: IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing 30 (2), pp. 370-381.
- PALOSCIA, S. / MACELLONI, G. / PAMPALONI, P. / RUISI, R. & SANTI, E. (2001): CHEERS Experiment in Tuscany: A Comparison between L-Band and C- and X-Bands Capability in Measuring Soil Moisture.-In: Proc. CD of IGARSS'01, Sydney.
- PALUBINSKAS, G. (1996): Classification of Agricultural Crop Types Using SPOT HRV and ERS-1 SAR Data in the Test Site Ostalb (South Germany).-In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung 5, pp. 155-162.
- PALUBINSKAS, G. / LUCAS R.M. / FOODY G.M. & CURRAN, P.J. (1995): An Evaluation of Fuzzy and Texture-Based Classification Approaches for Mapping Regenerating Tropical Forest Classes from Landsat-TM data.-In: Int. J. Remote Sensing 16 (4), pp. 747-759.
- PAOLA, J.D. & SCHOWENGERDT, R.A. (1995a): A Detailed Comparison of Backpropagation Neural Network and Maximum-Likelihood Classifiers for Urban Landuse Classification.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 33 (4), pp. 981-996.
- PAOLA, J.D. & SCHOWENGERDT, R.A. (1995b): A Review and Analysis of Backpropagation Neural Networks for Classification of Remotely-Sensed Multi-Spectral Imagery.-In: Int. J. Remote Sensing 16 (16), pp. 3033-3058.
- PAOLA, J.D. & SCHOWENGERDT, R.A. (1995c): Searching for Patterns in Remote Sensing Image Databases Using Neural Networks.-In: Proc. IGARSS, Vol. 1, pp. 443-445, July 10-14, Florence.
- PAPATHANASSIOU, K.P. (1999): Polarimetric SAR Interferometry.-DLR, Forschungsbericht 1999, 7.
- PEPIN, S. / LIVINGSTON, N.J. & HOOK, W.R. (1995): Temperature-Dependent Measurements Errors in Time Domain Reflectometry Determination of Soil Water.-In: Soil Sci. Am. J. 59, pp. 38-43.
- PIERCE, L.E. / ULABY, F.T. / SARABANDI, K. & DOBSON, M.C. (1994): Knowledge-Based Classification of Polarimetric SAR Images.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 32(5), pp. 1081-1086.
- PREVOT, L. / BERNARD, R. / TACONET, O. & VIDAL-MADJAR, D. (1984): Evaporation from a Bare Soil Evaluated Using a Soil Water Transfer Model and Remotely Sensed Surface Soil Moisture Data.-In: Water Resour. Res. 20(2), pp. 311-316.
- RANEY, R.K. (1998): Radar Fundamentals: Technical Perspective.-In: HENDERSON, F.M. & A.J. LEWIS (eds.) (1998): Principles and Applications of Imaging Radar. 3rd ed., Wiley, New York.

- RAO, K.S. / RAJU, S. & WANG, J.R. (1993): Estimation of Soil Moisture and Surface Roughness Parameters from Backscattering Coefficients.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 31 (5), pp. 1094-1099.
- REIGBER, A. & MOREIRA, A. (2000): First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multi-baseline L-Band Data.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 38 (5), pp. 2142-2152.
- RICHARDS, J.A. (1986): Remote Sensing Digital Image Analysis – An Introduction. Springer, Berlin & Heidelberg.
- RIGNOT, E. / CHELLAPPA, R. & DUBIOS, P. (1992): Unsupervised Segmentation of Polarimetric SAR Data Using the Covariance Matrix.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 30 (4), pp. 697-705.
- ROMBACH, M. / DEMICRAN, A. & MAUSER, W. (1993): Correlation Between Soil Moisture and Backscattering Coefficient of ERS-1 Data.-In: Space at the Service of our Environment, 2. ERS-1 Symposium Hamburg 11.-14. October 1993, pp. 861-864.
- ROTH, A. / MARSCHALK, U. / KNÖPFLE, W. / RABUS, B. / BENJES, A. & KOSMANN, D. (2000): SRTM/X-SAR Products and Quality.-In: Proceedings of Eusar 2000 Conference, Munich, pp. 237-240.
- ROTH, C.H. / MALICKI, M.A. & PLAGGE, R. (1992): Empirical Evaluation of the Relationship between Soil Dielectric Constant and Volumetric Water Content as the Basis for Calibrating Soil Moisture Measurements by TDR.-In: J. Soil Science 43, pp. 1-13.
- RYAN, A.W. / SEMENTILLI, P.J. / YUEN, P. & HUNT, B.R. (1991): Extraction of Shoreline Features by Neural Nets and Image Processing.-In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 57 (7), pp. 947-955.
- SANTORO, M. / ERIKSSON, L.E.B. / SCHMULLIUS, C. / WIESMANN, A. (2004): Seasonal and Topographic Effects on Growing Stock Volume Estimates from JERS-1 Backscatter in Siberian Forests.-In: Proceedings of 23rd EARSeL Annual Symposium 2003, Ghent, Belgium, 2-5 June, 2003, R. GOOSSENS (Ed.), Rotterdam: Millpress, ISBN 90 5966 007 2, 2004, pp. 151-158.
- SARABANDI, K. / PIERCE, L. / DOBSON, M.C. / CHIU, T.C. / ULABY, F.T. & STILES, J. (1995): Polarimetric Calibration of SIR-C Using Point And Distributed Targets.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 30 (3), pp. 593-595.
- SATAKE, M. / UMEHARA, T. / NADAI, A. / MAENO, H. / URATSUKA, S. / MATSUOKA, T. & HONMA, H. (2001): Development and Experiment of Polarization Selective Corner Reflectors for Polarimetric SAR Calibration.-In: Proc. CEOS SAR Workshop 2001 Tokyo, 2-5 April, pp. 16-18.
- SATALINO, G. / PASQUARIELLO, G. / MATTIA, F. / DAVIDSON, M. / LE TOAN, T. & BERGEAUD, M. (2001a): A methodological Study on Soil Moisture Retrieval using SAR Data.-In: Proc. CEOS SAR Workshop 2001 Tokyo, 2-5 April, pp. 169-172.
- SATALINO, G. / PASQUARIELLO, G. / MATTIA, F. / DAVIDSON, M.W.J. / LE TOAN, T. & BERGEAUD, M. (2001b): Soil Moisture Retrieval using SAR Data and a priori Roughness Information.-In: Proc. CD-ROM of IGARSS 2001, 9-13 July, Sydney.

- SATALINO, G. / PASQUARIELLO, G. / MATTIA, F. / LE TOAN, T. / DAVIDSON, M. & BORGEAUD, M. (1999): The Potential of Multi Angle C-Band SAR Data for Soil Moisture Retrieval.-In: Proc. of IGARSS'99. International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
- SCHAALE, M. & FURRER, R. (1995): Land Surface Classification by Neural Networks.-In: Int. J. Remote Sensing 16 (16), pp. 3003-3031.
- SCHMULLIUS, C. / FLÜGEL, W.-A. / FROTSCHER, K. / HOCHSCHILD, V. / MÜSCHEN, B. (2000): The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and Applications in Europe, Africa und Siberia.-Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, Sonderheft Jena (5), S. 361-366.
- SCHNEIDER, K. & OPPELT, N. (1998): The Determination of Mesoscale Soil Moisture Pattern with ERS Data.-In: Proc. IGARSS '98, 6-10 July, Seattle, USA.
- SCHULER, D.L. / LEE, J.-S. / KASILINGAM, D. & NESTI G. (2002): Surface Roughness and Slope Measurements Using Polarimetric SAR Data.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 40 (3), pp. 687-698.
- SCHULER, D.L. / LEE, J.-S. / KASILINGAM, D. & NESTI, G. (2001): Remote Sensing of Surface Roughness using Polarimetric SAR Data.-In: Proc. CD of IGARSS'01 ,Sydney.
- SCHULTZ, G.A. & ENGMAN, E.T. (2000): Remote Sensing in Hydrology and Water Management.-Berlin.
- SCHWÄBISCH, M. (1997): SAR-Interferometrie – Technik, Anwendungen, Perspektiven.-In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung 1, pp. 22-29.
- SEIDEL, G. (Hrsg.) (2003): Geologie von Thüringen, Stuttgart, Schweizerbart.
- SEIFERT, P. & ZINK, M. (1993): Synthetik – Apertur – Radar, Technik und Anwendung.-In: Physik in unserer Zeit 24 (1), pp. 24-32.
- SERPICO, S. & ROLI, F. (1995): Classification of Multisensor Remote-Sensing Images by Structured Neural networks.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 30 (3), pp. 562-577.
- SHI, J. / SOARES, J.V. / HESS, L. / ENGMAN, E.T. & VAN ZYL, J.J. (1991): SAR Derived Soil Moisture Measurements for Bare Fields.-In: IGARSS'91. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vol. 1, 393-396.
- SHI, J. / WANG J. / HSU, A.Y. / O'NEILL, P.E. & ENGMAN, E.T. (1997): Estimation of Bare Surface Soil Moisture and Surface Roughness Parameter Using L-Band SAR Image Data.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 35 (5), pp. 1254-1265.
- SHI, J. / WANG, J. / HSU, A. / O'NEILL, P.E. & ENGMAN, E.T. (1995): Estimation of Soil Moisture and Surface Roughness Parameters using L-Band SAR Measurements.-In: Proc. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 30(3), pp. 507-509.
- SHIMADA, M. / MUHTAR, Q. / TADONO, T. / WAKABAYASHI, H. (2001): Tree Height Estimation using an Airborne L-Band Polarimetric Interferometric SAR.-In: Proc. CD of IGARSS'01, Sydney.

- SMACCHIA, P. / CASARANO, D. / DE CAROLIS, G. / POSA, F. / LE TOAN, T. / SOUYRIS, J.C. & BOUDIER, N. (1994): On the Effect of Soil Surface Roughness on the Radar Backscatter Response to Soil Moisture.-In: IGARSS'94, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, August 8-12, 1994, Vol. II, 1567-1569.
- SMITH, G. & ULANDER, L.M.H. (1998): Forest Biomass Retrieval Using VHF SAR.-In: Proc. of LandSAR Workshop, 21-23 October, ESTEC.
- TAYLOR, G.R. / MAH, A.H. / KRUSE, F.A. / KIEREIN-YOUNG, K.S. / HEWSON R.D. & BENNETT, B.A. (1996): The Extraction of Soil Dielectric Properties from AIRSAR Data.-In: Int. J. Remote Sensing 17 (3), pp. 501-512.
- THEIS, S.W. / BLANCHARD, B.J. & BLANCHARD, A.J. (1986): Utilization of Active Microwave Roughness Measurements to Improve Passive Soil Moisture Estimates Over Bare Soils.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 24, pp. 334-339.
- THRES, P. / TOTSCHKE, K.U. & HUWE, B. (1998): Abschlußbericht: Simulation der Stickstoffdynamik im Einzugsgebiet des Trinkwassertalsperrensystems Weida/Zeulenroda.-Bayreuth.
- THÜRINGER TALSPERRENVERWALTUNG, TTV (Hrsg.) (1998): 5 Jahre Thüringer Talsperrenverwaltung.-In: Thüringer Talsperrenjournal, Heft 1.
- TITIN-SCHNAIDER, C. (1999): Radar Polarimetry for Vegetation Observation.-In: Proc. CEOS SAR Workshop ESA-CNES, 26-29 October, Toulouse.
- ULABY, F.T. & BATLIVALA, P.P. (1976): Optimum Radar Parameters for Mapping Soil Moisture.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing GE-14 (2), pp. 81-93.
- ULABY, F.T. & ELACHI, C. (1990): Radar Polarimetry for Geoscience Applications, Artech House, Norwood.
- ULABY, F.T. / DUBOIS, P.C. & VAN ZYL, J.J. (1996): Radar Mapping of Surface Soil Moisture.-In: J. Hydrol. 184, pp. 57-84.
- ULABY, F.T. / MOORE, K.M. & FUNG K.M. (1986): Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Vol. 1-3, Norwood, Artech House.
- ULABY, F.T. / SARABANDI, K. / McDONALD, K. / WHITT, M. & DOBSON, M.C. (1990): Michigan Microwave Canopy Scattering Model (MIMICS).-In: Int. J. Remote Sensing 11 (7), pp. 1223-1253.
- ULANDER, L.M.H. (1995): A New Look at the Slope Correction for SAR Radiometric Calibration.-In: Proc. IGARSS '95, pp. 602-604, Florence, Italy.
- ULANDER, L.M.H. / FRANSSON, J.E.S. / GUSTAVSSON, A. / SMITH, G. & WALTER, F. (2002): VHF-Band for Forest Stem Volume Applications.-In: Proc. of National Radio Science Meeting, 9-12 January, Boulder, Colorado.
- ULANDER, L.M.H. / FRÖLIND, P.O. & Martin, T. (1999): Processing and Calibration of Ultra-Wideband SAR Data from CARABAS-II.-In: CEOS SAR Workshop ESA-CNES, 26-29 October, Toulouse.

- ULBRICHT, A. (1999): Flugzeuggetragene Repeat-Pass Interferometrie mit dem E-SAR. - Diss. Univ. München.
- VAN OEVELEN (2000): Estimation of Areal Soil Water Content through Microwave Remote Sensing.- Doctoral Thesis at the Wageningen University, CIP-DATA Koninklijke Bibliotheek, den Haag.
- VAN OEVELEN P.J. & HOEKMAN, D.H. (1999): Radar Backscatter Inversion Techniques for Estimation of Surface Soil Moisture: EFEDA-Spain and HAPEX-Sahel case studies.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 37, No. 1, pp. 113-123.
- VAN ZYL, J.J. & KIM, Y. (2001): A Quantitative Comparison of Soil Moisture Inversion Algorithms.-In: Proc. CD of IGARSS'01, Sydney.
- VAN ZYL, J.J. (1989): Unsupervised Classification of Scattering Behaviour Using Radar Polarimetry Data.- In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 27 (1), pp. 37-45.
- WALESSA, M. & DATCU, M. (2000): Model-Based Despeckling and Information Extraction from SAR Images.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 38 (5), pp. 2258-2269.
- WALKER, J.P. & HOUSER, P.R. (2001): Temporal and Spatial Resolution Requirements for a Soil Moisture Mission.-In: Proc. CD of IGARSS'01, Sydney.
- WANG, J.R. & SCHMUGGE, T.J. (1980): An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 18, pp. 288-295.
- WEGMÜLLER, U. (1997): Soil Moisture Monitoring with ERS SAR Interferometry.-In: Proc. of 3rd ERS Symposium, Florence '97.
- WEVER, T. & HENKEL, J. (1995): Evaluation of the AIRSAR System for Soil Moisture Analysis.-In: Remote Sens. Environ. 53, pp. 118-122.
- WILKINSON, A.J. / LORD, R.T. & INGGS, M.R. (2001): Repeat Pass SAR Interferometry at VHF Band.- In: Proc. CD of IGARSS'01, Sydney.
- WOODHOUSE, I.H. / CLOUDE, S. / PAPATHANASSIOU, K. & HUTCHINSON, C. (2003): Evaluating PolInSAR Tree Height And Topography Retrievals In Glen Affric.-In: Proc. of the ESA-ESRIN PolInSAR Workshop, Frascati, January 14-16, 2003.
- WU, X. / THIEL, K.-H. & WEHR, A. (1996): The Effects of Different Land Cover on the Accuracy of Interferometric DEM.-In: Fringe '96, ESA Workshop on Applications of ERS SAR Interferometry, 30 September – 2 October, Zurich, Switzerland.
- YOSHIDA, T. & OMATU, S. (1994): Neural Network Approach to Land Cover Mapping.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 32 (5), pp. 1103-1109.
- ZADEH, L. (1965): Fuzzy Sets.-In: Information and Control 8, pp. 338-353.
- ZEBKER, H.A. & GOLDSTEIN, R.M. (1986): Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations.-In: J. Geophys. Res. 91, B5, pp. 4993-4999.

- ZEBKER, H.A. & VILLASENOR, J. (1992): Decorrelation in Interferometric Radar Echoes.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 30 (5), pp. 950-959.
- ZEBKER, H.A. / ROSEN, P.A. / GOLDSTEIN, R.M. / WERNER, C. & Gabriel, A.K. (1994b): On the Derivation of Coseismic Displacement Fields Using Differential Radar Interferometry: The Landers earthquake.-In: J. Geophys. Res., Solid Earth 99 (10), pp. 19617-19634.
- ZEBKER, H.A. / VAN ZYL, J.J. / DURDON, S.L. & NORIKANE, L. (1991): Calibrated Imaging Radar Polarimetry: Technique, Examples and Applications.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 29 (6), pp. 942-961.
- ZEBKER, H.A. / WERNER, C. / ROSEN, P.A. & HENSLEY, S. (1994a): Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 32 (4), pp. 823-836.
- ZINK, M. & BAMLER, R. (1995): X-SAR Radiometric Calibration and Data Quality.-In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing GRS 33 (4), pp. 840-847.
- ZINK, M. & KIETZMANN, H. (1995): Next Generation SAR - External Calibration.-In: DLR Forschungsbericht 95 (4), p. 45.
- ZISK, S.H. (1972): Lunar Topography: First Radar-Interferometer Measurements of the Alphonsus-Ptolemaeus-Arzachel Region.-In: Science 178, pp. 977-980.
- ZRIBI, M. & DECHAMBRE, M. (2002): A New Empirical Model to Retrieve Soils Moisture and Roughness from C-band Radar Data.-In: Remote Sens. Environ. 84, pp. 42-52.

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen angefertigt habe.

Jena, am 20.04.2004

TABELLARISCHER LEBENS LAUF

PERSÖNLICHE ANGABEN

Name, Vorname: Thiel, Christian Joachim
Geboren: am 21.06.1975 in Crimmitschau
Familienstand: ledig
Nationalität: deutsch

SCHULISCHE AUSBILDUNG

1982 – 1988 Polytechnische Oberschule „Ernst Schneller“ in Altenburg
1988 – 1990 Polytechnische Oberschule „Fritz Gäbler“ in Gera
1990 – 1991 „Zabel-Gymnasium“ in Gera
1991 – 1994 „Friedrich-Schiller-Gymnasium“ in Gera
1994 Abitur (Leistungskurse Mathematik, Physik)

WEHRERSATZDIENST

1994 – 1995 Städtisches Krankenhaus Gera „Klinikum II“ – Dienst im OP und in der Chirurgie

STUDIUM

1995 – 2000 Diplomstudium an der Friedrich-Schiller-Universität Jena

Hauptfach: Geographie, Schwerpunktfächer Geoinformatik und Physische Geographie – Spezialisierung auf Hydrologische Modellierung und Geographische Informationssysteme

Nebenfächer: Ökologie und Geologie – Spezialisierung auf Natur- und Umweltschutz, Landschaftsökologie sowie Angewandte Geologie und Hydrogeologie

Studienprojekt: „Ermittlung repräsentativer Parameter zur Beschreibung des Bedeckungsgrades in den beiden Einzugsgebieten Schmücker Graben und Steinbach für hydrologische Einzugsgebietsmodelle“.

Diplomarbeit: „Vergleichende hydrologische Modellierung zweier Flusseinzugsgebiete unterschiedlicher Hydrodynamik (Zeulenroda, Thüringen & Mulargia, Sardinien) mit dem Modellsystem PRMS/MMS unter integrativer Verwendung von Geoinformationssystemen und Fernerkundungsdaten“.

Abschluss als Diplom-Geograph: Oktober 2000 (Ø 1,1)

ZUSATZQUALIFIKATIONEN WÄHREND DES STUDIUMS

Zertifikatsstudium Informatik
Sprachzertifikat Englisch für Geowissenschaftler Stufe II
Sprachunterricht Französisch

GREMIENTÄTIGKEITEN NEBEN DEM STUDIUM

1996 – 1998 Arbeit im Studentenrat der Friedrich-Schiller Universität Jena als gewähltes Mitglied
1996 – 1998 Arbeit im Fachschaftsrat am Institut für Geographie als gewähltes Mitglied

 ANGEWANDTE TÄTIGKEITEN NEBEN DEM STUDIUM UND PRAKTIKA

1996	Praktikum im Ingenieurbüro GEOINFORM, Gera (2 Wochen)
1996	Promotionsaktion i.A. von FREY- UND LINKENHEIL (6 Wochen)
1997	Ferientätigkeit bei ELEKTRONICON Gera (5 Wochen)
1998	Praktikum bei GWK INGENIEURE, Gotha (6 Wochen)
1999	Praktikum an der School of BIORESOURCES ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL HYDROLOGY, Pietermaritzburg RSA (2 Monate)
1995 – 1999	Nachhilfelehrer im SCHÜLERHILFE E.V. Gera (Mathematik, Physik)
1995 – 2000	Nachhilfelehrer im STUDIENKREIS Jena (Mathematik, Physik, Geographie)
1997 – 1998	Studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Geoinformatik – Erstellung von Kartengrundlagen für das Thüringer Wörterbuch
1998 – 1999	Studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Geoinformatik – Tutor Statistik und Computerkartographie
1999 – 2000	Studentische Hilfskraft im EU Projekt ARSGISIP – Hydrologische Modellierung

 BERUFLICHER WERDEGANG

2000 – 2004	Promotionsbegleitende Koordination des Fernerkundungsprojektes PHYMO an der Friedrich-Schiller-Universität Jena (30 Monate)
2002	Projektarbeit im DKS: Erfassen und Bewerten der Grundwassersituation im Nationalpark Hainich (6 Monate)
2003 – 2004	Projektarbeit im EU Projekt IRON CURTAIN (20 Monate)

 SPRACHKENNTNISSE

Englisch Fortgeschrittenenkenntnisse
 Französisch Grundkenntnisse
 Russisch Grundkenntnisse

 SONSTIGE QUALIFIKATIONEN

EDV-Kenntnisse

Digitale Bildverarbeitung (ERDAS/Imagine, ENVI, eCognition, Adobe Photoshop etc.)
 GIS (ESRI ArcView GIS 3.x, Grundkenntnisse in ArcInfo GIS 7.x)
 Hydrologische Modellsysteme (MMS/PRMS, ACURU)
 Programmierung (Grundkenntnisse in IDL, Turbopascal, Prolog)
 HTML-Programmierung (div. Editoren)
 Tabellenkalkulation (Microsoft Excel, Corel Quattro Pro etc.)
 Textverarbeitung (Microsoft Word, Corel Word Perfect etc.)
 Präsentationsprogramme (Microsoft Powerpoint, Corel Presentations etc.)

Führerschein Klassen BE, C1E, CE, M und L

Privatpilotenlizenz für Segelflugzeuge PPL-C

PUBLIKATIONEN

- B. MÜSCHEN, M. FINK, **C. THIEL** & W.-A. FLÜGEL (2001): Modellparameterisierungen durch FE-Methoden und ihre Anwendung in der Wasserwirtschaft. In: SUTMÖLLER, J. & RASCHKE, E. [Hrsg.], Modellierung in meso- bis makroskaligen Flusseinzugsgebieten.-Tagungsband zum gleichnamigen Workshop am 16./17.11.2000 in Lauenburg, GKSS 2001/15, 10 Seiten.
- C. PATHE, C. S. SCHMULLIUS, T. RIEDEL, M. HEROLD, **C. THIEL** (2001): On the Influence of Diurnal Variations of Surface Wetness on Class Separability of Agricultural Crops in Multi-Frequency and Polarimetric SAR-Data with regard to future TerraSAR and ENVISAT-Applications.-In: Proceedings of the Third International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, 11-14 September, Sheffield UK, pp. 285-289.
- T. RIEDEL, C. PATHE, **C. THIEL**, M. HEROLD & C. SCHMULLIUS (2001): Systematic Investigation on the Effect of Dew and Interception on Multifrequency, Multipolarimetric and Multiscale Radar Backscatter Signals.-In: Proceedings of the Third International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, 11-14 September, Sheffield UK, pp. 99-104.
- V. HOCHSCHILD, **C. THIEL** & S. GRÜNLER (2001): Derivation of Land Cover and Soil Moisture from Airborne Polarimetric SAR-Data.-In: Proceedings of the Third International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, 11-14 September, Sheffield UK, pp. 355-358.
- C. THIEL**, S. GRUENLER, M. HEROLD, V. HOCHSCHILD, G. JAEGER & M. HELLMANN (2001): Interpretation and Analysis of Polarimetric L-Band E-SAR-Data for the Derivation of Hydrologic Land Surface Parameters.- In: Proceedings CD of IGARSS'01.
- C. THIEL** & T. RIEDEL (2001): Ableitung von Landoberflächenparametern aus flugzeuggetragenen vollpolarimetrischen E-SAR-Daten unter Berücksichtigung von freiem Vegetationswasser.-In: Photogrammetrie, Fernerkundung & Geoinformation 6/2001, pp. 427-434.
- C. THIEL** (2003): Measuring Surface Roughness on Base of the Circular Polarization Coherence as an Input for a Simple Inversion of the IEM Model.- Proceedings of the POLinSAR Workshop, 14.-16.01. 2003, Frascati, Italy, CD-ROM.
- C. THIEL** (2005): Zusammenstellung und Interpretation relevanter SAR-immanenter Spezialfälle der Radarrückstreuung am Beispiel einer hochaufgelösten polarimetrischen L-Band Szene.-In: Photogrammetrie, Fernerkundung & Geoinformation, im Druck.