

**Aus dem Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde**

Erik Zillmann

**Einsatz multi-dimensionaler Radardaten zur Erfassung  
der räumlichen Variabilität von Bestandesmerkmalen**

Veröffentlicht als: Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 266

Braunschweig

**Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)**

2004



Sonderheft 266  
*Special Issue*



*Landbauforschung*  
Völkensrode  
*FAL Agricultural Research*

**Einsatz multi-dimensionaler Radardaten zur  
Erfassung der räumlichen Variabilität von  
Bestandesmerkmalen**

**Erik Zillmann**



## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abbildungen und Tabellen im Anhang.....	IX
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen der Radarfernerkundung.....</b>	<b>6</b>
2.1 Aufnahmeprinzip eines SAR-Sensors.....	7
2.2 Abbildungsparameter der Radarrückstreuung.....	9
2.2.1 Rückstreukoeffizient.....	9
2.2.2 Systemspezifische Abbildungsparameter.....	11
2.2.3 Objektspezifische Abbildungsparameter.....	13
2.2.4 Rückstreumechanismen.....	17
2.2.5 Rückstreucharakteristik von Getreidebeständen.....	19
2.3 Störgrößen der Radarfernerkundung.....	21
2.3.1 Systembedingte Störgrößen.....	21
2.3.2 Witterungsbedingte Störgrößen.....	24
<b>3 Material und Methoden.....</b>	<b>25</b>
3.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes.....	25
3.1.1 Kartengrundlage.....	27
3.1.2 Digitales Geländemodell.....	27
3.2 Beschreibung der Testflächen.....	29
3.3 Ground-Truth Erhebung.....	32
3.3.1 Probenahmestrategie.....	32
3.3.2 Boden- und Vegetationsparameter.....	35
3.3.3 Witterung zu den Kampagnenterminen.....	37
3.4 Farb-Infrarot Luftbilder.....	39
3.4.1 Vorverarbeitung der Luftbilder.....	40
3.4.2 Vegetationsindex.....	45
3.4.3 Extraktion der NDVI-Werte.....	47

3.5	<i>Radardaten des E-SAR</i> .....	47
3.5.1	<i>Vorverarbeitung der Radardaten</i> .....	49
3.5.2	<i>Extraktion der Radarrückstreuwerte</i> .....	54
3.5.3	<i>Polarisationsindizes</i> .....	55
3.6	<i>Statistische Analysemethoden</i> .....	55
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>60</b>
4.1	<i>Deskriptive Statistik der Bestandesmerkmale</i> .....	60
4.2	<i>Qualität der Fernerkundungsdaten</i> .....	66
4.2.1	<i>Qualität der vorprozessierten Luftbilder</i> .....	66
4.2.2	<i>Qualität der vorprozessierten Radardaten</i> .....	69
4.3	<i>Zeitliche Variabilität der Fernerkundungsdaten</i> .....	70
4.3.1	<i>Analyse des NDVI zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten</i> .....	70
4.3.2	<i>Analyse der Radarsignatur zu verschiedenen Entwicklungsstadien von Winterweizen</i> .....	73
4.3.3	<i>Zusammenfassung der Ergebnisse zur zeitlichen Variabilität der Fernerkundungsdaten</i> .....	83
4.4	<i>Analyse der räumlichen Variabilität und Modellierung der Bestandesdichte</i> .....	84
4.4.1	<i>Beziehungen zwischen NDVI und Bestandesmerkmalen</i> .....	85
4.4.2	<i>Beziehungen zwischen Radarsignaturen von Einzelkanälen und Bestandesmerkmalen</i> .....	91
4.4.3	<i>Beziehungen zwischen Polarisationsindizes und Bestandesmerkmalen</i> .....	97
4.4.4	<i>Zusammenfassung der Ergebnisse zur räumlichen Variabilität und Modellierung der Bestandesmerkmale</i> .....	105
<b>5</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>108</b>
5.1	<i>Beurteilung der verwendeten Daten und Methoden</i> .....	109
5.1.1	<i>Ground-Truth</i> .....	109
5.1.2	<i>Fernerkundungsdaten</i> .....	110
5.1.3	<i>Analysemethoden</i> .....	114
5.2	<i>Beurteilung der temporalen Variabilität der Radarsignatur von Winterweizen</i> .....	115
5.2.1	<i>Veränderung der Radarsignatur eines Weizenbestandes in Abhängigkeit vom Entwicklungsstand</i> .....	116
5.2.2	<i>Beurteilung der Variabilität der Radarsignatur verschiedener Weizenbestände bei gleichem Entwicklungsstand</i> .....	120
5.2.3	<i>Vergleich der Radarsignatur von Weizenbeständen verschiedener Vegetationsperioden</i> .....	123
5.3	<i>Eignung der Radarinformation zur Erfassung der räumlichen Variabilität von Bestandesmerkmalen</i> ..	124
5.3.1	<i>Beurteilung der Zusammenhänge zwischen Einzelkanalrückstreuung und ausgewählten Bestandesmerkmalen</i> .....	125

---

5.3.2	<i>Beurteilung der Zusammenhänge zwischen Polarisationsindizes und ausgewählten Bestandesmerkmalen</i> .....	127
5.4	<i>Beurteilung der Modellierungsalgorithmen und der Bestandesdichteverteilungskarte</i> .....	128
5.5	<i>Vergleich des Informationsgehaltes von Luftbildern und Radardaten als Datenquelle für teilschlagspezifische Landwirtschaft</i> .....	130
5.6	<i>Ausblick</i> .....	132
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung / Summary</b> .....	<b>133</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>139</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>150</b>
<b>9</b>	<b>Glossar</b> .....	<b>241</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Elektromagnetisches Spektrum. ....	6
Abb. 2-2:	Schematische Darstellung der Radaraufzeichnung. ....	7
Abb. 2-3:	Relevante Parameter der Radar-Rückstreuung. ....	9
Abb. 2-4:	Winkelbezeichnungen bei SAR-Aufnahmen. ....	14
Abb. 2-5:	Streumechanismen an landwirtschaftlichen Beständen. ....	18
Abb. 2-6:	Radarrückstreusignatur von Sommerweizen im X-Band im Verlauf der Vegetationsperiode. ....	21
Abb. 2-7:	Bildverzerrungen aufgrund des Geländereiefs. ....	23
Abb. 3-1:	Lage des Untersuchungsgebietes bei Neetzow mit den Testflächen 3.2, 10.2 und 10.3 (Grundlagenkarte Landwirtschaft 1:10000, LPG Pflanzenproduktion Neetzow Blatt 2 und 3). ....	26
Abb. 3-2:	Digitales Geländemodell des Untersuchungsgebietes bei Neetzow. ....	28
Abb. 3-3:	Ergebnis der Reichsbodenschätzung für die Testflächen in Neetzow. ....	30
Abb. 3-4:	Relative Ertragskarten von Winterweizen der Testflächen 10.3 (2001; 100 % = 4,2 t ha <sup>-1</sup> ) und 3.2 (1999, 100 % = 5,1 t ha <sup>-1</sup> ) in Neetzow. Die Erträge sind aufgrund möglicher Kalibrierungsungenauigkeiten des Ertragserfassungssensors nicht als Absolutwerte zu verstehen. ....	31
Abb. 3-5:	Häufigkeitsverteilung der fehlerbereinigten Ertragsdaten von Winterweizen auf den Testflächen 3.2 (1999) und 10.3 (2001) in Neetzow. Die Erträge sind aufgrund möglicher Kalibrierungsungenauigkeiten des Ertragserfassungssensors nicht als Absolutwerte zu verstehen. ....	31
Abb. 3-6:	Wetness-Index (MOORE ET AL. 1993) der Testflächen in Neetzow dargestellt in relativen Klassen potentiellen Bodenwassergehaltes nach SINMAP® (PACK ET AL. 1998). ....	33
Abb. 3-7:	Lage des Streifenversuchs mit unterschiedlichen Aussaatstärken auf der Testfläche 10.3 in Neetzow (2001). ....	33
Abb. 3-8:	Entwicklungsstadien des Getreides nach BBCH-Dezimal-Code (BASF 1997). ....	36
Abb. 3-9:	Monatliche Niederschlagsmengen in den Jahren 2001 und 2002 am Standort Neetzow. ....	38
Abb. 3-10:	Spektrale Transmission des Kodak-Wratten 16 Filter. ....	39
Abb. 3-11:	Chronologische Abfolge der Prozessierungsschritte für die absolute Kalibrierung der Farb-Infrarot-Luftbilder (ELM: Empirical Line Methode). ....	41
Abb. 3-12:	Einfluss des Blattflächenindex (LAI) auf die Reflexionssignatur von Vegetationsbeständen (verändert nach BARET & JACQUEMOND 1994). ....	46
Abb. 3-13:	Flugzeug vom Typ Dornier DO-128 mit E-SAR Sensor. ....	48
Abb. 3-14:	Cornerreflektor für die radiometrische Kalibrierung und die Geokodierung der Radardaten. ....	49
Abb. 3-15:	Einfluss des Einfallswinkels auf die Rückstreuintensität. A: Geocodierte Incidence Angle Map (IAM) der L-Band-Konfiguration; B: geocodiertes ground-range Amplituden-Bild (L-HH). ....	50



Abb. 3-16: Schematische Darstellung des chronologischen Ablaufs der durchgeführten Prozessierungsschritte. ....	51
Abb. 3-17: Schematische Darstellung der <i>Sigma naught</i> Kalibrierung ( $\sigma^0$ ) der E-SAR Daten. ....	52
Abb. 4-1: Entwicklung frischer Biomasse ( $FM_V$ ) und Bestandesdichte (Halme) von Winterweizen auf den Testflächen 10.2, 10.3 und 3.2 in Neetzow. ....	61
Abb. 4-2: Senkrechtaufnahmen der Winterweizenbestände auf den Testflächen in Neetzow vom Mai 2001. A und B: Min. und Max. der Bestandesdichte auf 10.3. C und D: Min. und Max. der Bestandesdichte auf 10.2. ....	63
Abb. 4-3: Korrektur des Helligkeitsrandabfalls; links: CIR-Luftbild vor der Korrektur; rechts: CIR-Luftbild nach der Korrektur (Aufnahmedatum: 08.05.2002; Neetzow, CIR: color-infrarot). ....	67
Abb. 4-4: Grauwertdifferenz zwischen dem belichtungskorrigierten Luftbild und der Originalaufnahme je spektralem Aufnahmekanal entlang einer Diagonalen von A nach B (Abb. 4-3).....	67
Abb. 4-5: Ergebnis der Speckle-Filterung (5x5 Frost-Filter). Links: Sigma-naught ( $\sigma^0$ ) kalibriertes Radarbild ohne vorherige Speckle-Filterung; Rechts: gefiltertes Sigma-naught ( $\sigma^0$ ) kalibriertes Radarbild. ....	69
Abb. 4-6: Prozessierungsfehler in den Radaraufnahmen von 2001 in den Kreuz-Polarisationen des L-Bandes, welcher als senkrechte Streifung erkennbar ist (Testfläche 10.2 in Neetzow am 09. Juni 2001). ....	70
Abb. 4-7: Darstellung des NDVI von Winterweizen am 08. Mai 2001 auf den Testflächen in Neetzow. A: 10.2 und B: 10.3. ....	72
Abb. 4-8: Darstellung des NDVI von Winterweizen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten im Jahr 2002 auf den Testflächen in Neetzow. A: 3.2 am 08. Mai, B: 3.2 am 05. Juni, C: 10.3 am 08. Mai und D: 10.3 am 05. Juni.....	72
Abb. 4-9: Radarsignatur von Winterweizenbeständen im Entwicklungsverlauf auf den Testflächen in Neetzow in den Jahren 2001/2002. Für die bessere Lesbarkeit der Abbildung wurde anstelle der beiden Kreuz-Polarisationen nur das r-cross ((LHV+LVH) * 2 <sup>-1</sup> ) als Mittelwert dargestellt.....	74
Abb. 4-10: Veränderung der Rückstreuoeffizienten $\sigma^0_{X-HH}$ und $\sigma^0_{X-VV}$ des Weizenbestandes auf 10.3 in Neetzow im Vergleich der Radaraufnahmen vom 08. Mai und 09. Juni 2001.....	76
Abb. 4-11: Mittlerer Radarrückstreuoeffizient ( $\sigma^0$ ) von Winterweizen während des Schossens am 08. Mai 2002 auf den Testflächen in Neetzow inklusive der Standardabweichung.....	78
Abb. 4-12: Multi-dimensionale Farbdarstellung der Winterweizenbestände vom 08. Mai 2002. Die Farben repräsentieren die relative Radarrückstreuung jedes einzelnen der drei Radarkanäle, wobei R = X-HH, G = X-VV, B = L-VV.....	79
Abb. 4-13: Mittlerer Radarrückstreuoeffizient ( $\sigma^0$ ) von Winterweizen während des Schossens auf der Testfläche 10.3 in Neetzow inklusive der Standardabweichung. ....	81
Abb. 4-14: Einzelkanaldarstellungen der Rückstreuintensität des Winterweizenbestandes der Testfläche 10.3 in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2002 in den Radarkanälen X-HH und L-HH. ....	82
Abb. 4-15: Zusammenhang zwischen NDVI und Bestandesdichte von Winterweizen auf 10.3 in Neetzow (05. Juni 2002), links: Regressionsmodell mit dem 95 %-Konfidenzintervall. Rechts: Korrelation zwischen der kreuzvalidiert geschätzten Bestandesdichte und der im Feld gemessenen Bestandesdichte ( $n = 24$ ). ....	87

Abb. 4-16: Bestandesdichteverteilung in drei Klassen zum Zeitpunkt des Ährenschiebens des Weizenbestandes (05. Juni 2002) auf 10.3 in Neetzow mit prozentualem Flächenanteil. Die Bestandesdichte wurde anhand des Regressionsmodells $y = -840,27 + 2780,41 x$ aus dem NDVI prognostiziert.....	87
Abb. 4-17: Klassifikationsmatrix der Diskriminanzfunktion unter Verwendung des NDVI als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte des Winterweizens als abhängige Variable.....	89
Abb. 4-18: Bestandesdichteverteilung in drei Klassen zum Zeitpunkt des Ährenschiebens des Winterweizens (05. Juni 2002) auf 10.3 in Neetzow mit prozentualem Flächenanteil. Die Bestandesdichte wurde anhand der ermittelten Klassifikationsfunktionen (Tab. 4-17) aus dem NDVI prognostiziert.....	90
Abb. 4-19: Einzelkanaldarstellungen der Radarrückstreuung von Winterweizen der Testfläche 10.3 in Neetzow während der Blüte am 09. Juni 2001 in den Radarkanälen X-HH und X-VV.....	91
Abb. 4-20: Klassifikationsmatrix der Diskriminanzfunktion unter Verwendung der Radarrückstreuung des X-HH als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte als abhängige Variable. ....	96
Abb. 4-21: Bestandesdichteverteilung in drei Klassen zum Zeitpunkt des Ährenschiebens des Winterweizens (05. Juni 2002) auf 10.3 in Neetzow mit dem prozentualen Flächenanteil. Die Bestandesdichte wurde anhand der ermittelten Klassifikationsfunktionen (Tab. 4-21) aus der Radarrückstreuung des X-HH prognostiziert. ....	96
Abb. 4-22: Zusammenhang zwischen Bestandesdichte des Winterweizens und dem Polarisationsindex $(r\text{-cross} + X\text{-HH}) * (r\text{-cross} - X\text{-HH})^{-1}$ auf 10.3 (05. Juni 2002) in Neetzow, links: Regressionsmodell mit dem 95 %-Konfidenzintervall. Rechts: Korrelation zwischen kreuzvalidiert geschätzter Bestandesdichte und im Feld gemessener Bestandesdichte ( $n = 24$ ).....	101
Abb. 4-23: Bestandesdichteverteilung in drei Klassen zum Zeitpunkt des Ährenschiebens des Winterweizens (05. Juni 2002) auf 10.3 in Neetzow mit prozentualem Flächenanteil. Die Bestandesdichte wurde anhand des Regressionsmodells $y = -365,03 + 434,72 x$ aus dem Polarisationsindex $(r\text{-cross} + XHH) * (r\text{-cross} - XHH)^{-1}$ prognostiziert.....	101
Abb. 4-24: Klassifikationsmatrix der Diskriminanzfunktion unter Verwendung des Polarisationsindizes $X\text{-HH} * L\text{-HV}^{-1}$ als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable.....	104
Abb. 4-25: Bestandesdichteverteilung in drei Klassen zum Zeitpunkt des Ährenschiebens (05. Juni 2002) auf 10.3 in Neetzow mit prozentualem Flächenanteil. Die Bestandesdichte wurde anhand der ermittelten Klassifikationsfunktionen (Tab. 4-26) aus dem Polarisationsindex $X\text{-HH} * L\text{-HV}^{-1}$ prognostiziert.....	105
Abb. 5-1: Entwicklung der Bestandesdichte (Ähren $\text{m}^{-2}$ ) von Getreidebeständen während des Wachstums.....	110
Abb. 5-2: Vergleich der Bildstruktur der Radarrückstreuung eines Winterweizenbestandes mit dem Ergebnis der Bestandesdichtemodellierung. Links: Ausschnitt aus dem gefilterten Radarbild des X-HH, rechts: Ausschnitt aus dem Modellierungsergebnis auf Basis der Klassifikationsfunktionen der Diskriminanzanalyse, die anhand des X-HH ermittelt wurden. ....	130

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Bezeichnung der Spektralbänder in der Radarfernerkundung .....	12
Tab. 3-1:	Bodenkundliche und pflanzenbauliche Kennwerte der Testflächen in Neetzow.....	29
Tab. 3-2:	Anzahl der Stichproben auf den Testflächen in Neetzow an verschiedenen Aufnahmetermi- nen. ....	35
Tab. 3-3:	Anbauichtung auf den Testflächen in Neetzow in Bezug auf die Radarblickrichtung.....	37
Tab. 3-4:	Spektrale Sensitivität der Luftbildaufnahmen. ....	39
Tab. 3-5:	Verfügbarkeit und Aufnahmezeit der Luftbilder.....	40
Tab. 3-6:	Aufnahmezeitpunkte der Radardaten vom Untersuchungsgebiet in Neetzow.....	48
Tab. 3-7:	Aufnahmeparameter der E-SAR Daten. ....	50
Tab. 3-8:	Interpretationsschlüssel für den Korrelationskoeffizienten. ....	56
Tab. 4-1:	Deskriptive Statistik der Boden- und Vegetationsparameter der Testfläche 10.3 in Neetzow (2001, Winterweizen). ....	62
Tab. 4-2:	Deskriptive Statistik der Boden- und Vegetationsparameter der Testfläche 10.2 in Neetzow (2001, Winterweizen). ....	62
Tab. 4-3:	Deskriptive Statistik der Boden- und Vegetationsparameter der Testfläche 10.3 in Neetzow (2002, Winterweizen). ....	64
Tab. 4-4:	Deskriptive Statistik der Boden- und Vegetationsparameter der Testfläche 3.2 in Neetzow (2002, Winterweizen). ....	65
Tab. 4-5:	Test auf Normalverteilung der Boden- und Bestandesmerkmalen des Winterweizens auf den Testflächen in Neetzow in den Jahren 2001/02.....	66
Tab. 4-6:	RMS-Fehler der Orthokorrektur der Luftbilder von Neetzow.....	68
Tab. 4-7:	Regressionskoeffizienten ( $r^2$ ) der spektralen Kalibrierung der Luftbilder von Neetzow nach der Empirical Line Methode unter Verwendung absolut kalibrierter HyMap <sup>®</sup> -Daten als Referenzreflexion. ....	69
Tab. 4-8:	Zusammenfassung der statistischen Maßzahlen des NDVI von Winterweizen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten auf den Testflächen in Neetzow. ....	71
Tab. 4-9:	Test auf Normalverteilung des NDVI von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow in den Jahren 2001/2002 (Asymptotische Signifikanz des Kolmogorov-Smirnov-Tests, $\alpha=0,05$ ). ....	73
Tab. 4-10:	Dynamischer Bereich ( $\sigma^0_{\max} - \sigma^0_{\min}$ ) der Rückstreuoeffizienten $\sigma^0$ von Winterweizen auf den beiden Testflächen 10.3 und 3.2 in Neetzow.....	76
Tab. 4-11:	Deskriptive Statistik der Radarrückstreuung $\sigma^0$ von Winterweizen der Testflächen in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2002.....	77
Tab. 4-12:	Deskriptive Statistik der Radarrückstreuung $\sigma^0$ von Winterweizen der Testfläche 10.3 in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2001.....	80

Tab. 4-13:	Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse der Einzelkanalrückstreuung von Winterweizen (nach PEARSON) auf den Testflächen 10.3 und 3.2 in Neetzow am 08. Mai 2002. ....	81
Tab. 4-14:	Zusammenfassender Vergleich der Rückstreuintensitäten verschiedener Radarkanäle während unterschiedlicher Entwicklungsstadien von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow.....	83
Tab. 4-15:	Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelation (nach PEARSON) zwischen NDVI und ausgewählten Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow zu verschiedenen Aufnahmeterminen (2001/2002). ....	86
Tab. 4-16:	Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ) der linearen Regression von NDVI und Bestandesdichte von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten. ....	86
Tab. 4-17:	Fisher's Klassifikationsfunktionen als Ergebnis der Diskriminanzanalyse unter Verwendung des NDVI als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte des Winterweizens als abhängige Variable. Analyseergebnisse der Testflächen in Neetzow (2001/2002).....	88
Tab. 4-18:	Klassifizierungsgenauigkeit der Diskriminanzfunktion unter Verwendung des NDVI als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Untersuchungsgebiet: Neetzow in den Jahren 2001 und 2002).....	90
Tab. 4-19:	Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelation (nach PEARSON) zwischen $\sigma^0$ der Einzelkanäle und den Bestandesmerkmalen frische Biomasse und Bestandesdichte von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow an den verschiedenen Aufnahmezeitpunkten. ....	92
Tab. 4-20:	Klassifizierungsgenauigkeit (%) der Diskriminanzfunktion unter Verwendung der mittleren Radarrückstreuung ( $\sigma^0$ ) der Einzelkanäle als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Untersuchungsgebiet: Neetzow).....	94
Tab. 4-21:	Fisher's Klassifikationsfunktionen als Ergebnis der Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Radarinformation als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte des Winterweizens als abhängige Variable (Testfläche 10.3 in Neetzow am 05. Juni 2002). ....	95
Tab. 4-22:	Höchste Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelation zwischen Polarisationsindizes und Bestandesmerkmalen von Winterweizen der Testflächen in Neetzow (2001). ....	97
Tab. 4-23:	Höchste Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelation zwischen Polarisationsindizes und Bestandesmerkmalen von Winterweizen der Testflächen in Neetzow (2002). ....	98
Tab. 4-24:	Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ) und Standardschätzfehler ( $\hat{\sigma}$ ) der linearen Regression von Polarisationsindex und Bestandesdichte von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow zu verschiedenen Aufnahmeterminen. ....	100
Tab. 4-25:	Klassifizierungsgenauigkeit der Diskriminanzfunktion unter Verwendung eines Polarisationsindizes als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Untersuchungsgebiet: Neetzow).....	103
Tab. 4-26:	Fisher's Klassifikationsfunktionen als Ergebnis der Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Radarinformation als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (10.3 in Neetzow am 05. Juni 2002).....	103

## Abbildungen und Tabellen im Anhang

- Abb. A-1a: Ergebnisse der Kalibrierung nach der Empirical Line Methode. Regressionsgeraden für die Beziehung zwischen Reflexion der Referenzflächen der HyMap<sup>®</sup>-Aufnahme vom 06.05.1999 und des Luftbildes vom 08.05.2002.
- Abb. A-1b: Ergebnisse der Ko-Kalibrierung nach der Empirical Line Methode. Regressionsgeraden für die Beziehung zwischen Reflexion der Referenzflächen im Luftbild vom 08.05.2001 und des kalibrierten Luftbildes vom 08.05.2002.
- Abb. A-1c: Ergebnisse der Ko-Kalibrierung nach der Empirical Line Methode. Regressionsgeraden für die Beziehung zwischen Reflexion der Referenzflächen im Luftbild vom 05.06.2002 und des kalibrierten Luftbildes vom 08.05.2002.
- Tab. A-1a: Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 10.2 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrin am 08. Mai 2001.
- Tab. A-1b: Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 10.3 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrin am 08. Mai 2001.
- Tab. A-1c: Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 10.2 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrin am 09. Juni 2001.
- Tab. A-1d: Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 10.3 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrin am 09. Juni 2001.
- Tab. A-2a: Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 10.3 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrin am 07. April 2002.
- Tab. A-2b: Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 10.3 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrin am 08. Mai 2002.
- Tab. A-2c: Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 10.3 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrin am 05. Juni 2002.
- Tab. A-2d: Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 3.2 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrin am 07. April 2002.
- Tab. A-2e: Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 3.2 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrin am 08. Mai 2002.
- Tab. A-2f: Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 3.2 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrin am 05. Juni 2002.
- Tab. A-3a: Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 10.3 in Neetzow am 08.05.2001 (Entwicklungsstadium: BBCH 32).
- Tab. A-3b: Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 10.2 in Neetzow am 08.05.2001 (Entwicklungsstadium: BBCH 32).
- Tab. A-3c: Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 10.3 in Neetzow am 09.06.2001 (Entwicklungsstadium: BBCH 59-61).
- Tab. A-3d: Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 10.2 in Neetzow am 09.06.2001 (Entwicklungsstadium: BBCH 59-61).

- Tab. A-4a: Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 10.3 in Neetzow am 07.04.2002 (Entwicklungsstadium: BBCH 22-25).
- Tab. A-4b: Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 10.3 in Neetzow am 08.05.2002 (Entwicklungsstadium: BBCH 31-32).
- Tab. A-4c: Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 10.3 in Neetzow am 05.06.2002 (Entwicklungsstadium: BBCH 47-61).
- Tab. A-4d: Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 3.2 in Neetzow am 07.04.2002 (Entwicklungsstadium: BBCH 22-25).
- Tab. A-4e: Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 3.2 in Neetzow am 08.05.2002 (Entwicklungsstadium: BBCH 31-33).
- Tab. A-4f: Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 3.2 in Neetzow am 05.06.2002 (Entwicklungsstadium: BBCH 55).
- Abb. A-2a: Veränderung des Radarrückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  auf der Testfläche 10.2 in Neetzow im Vergleich der Aufnahmetermine 08. Mai 2001 und 09. Juni 2001.
- Abb. A-2b: Veränderung des Radarrückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  auf der Testfläche 10.3 in Neetzow im Vergleich der Aufnahmetermine 08. Mai 2001 und 09. Juni 2001.
- Abb. A-2c: Veränderung des Radarrückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  auf der Testfläche 3.2 in Neetzow im Vergleich der Aufnahmetermine 07. April 2002 und 08. Mai 2002.
- Abb. A-2d: Veränderung des Radarrückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  auf der Testfläche 3.2 in Neetzow im Vergleich der Aufnahmetermine 08. Mai 2002 und 05. Juni 2002.
- Abb. A-2e: Veränderung des Radarrückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  auf der Testfläche 10.3 in Neetzow im Vergleich der Aufnahmetermine 07. April 2002 und 08. Mai 2002.
- Abb. A-2f: Veränderung des Radarrückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  auf der Testfläche 10.3 in Neetzow im Vergleich der Aufnahmetermine 08. Mai 2002 und 05. Juni 2002.
- Tab. A-5a: Deskriptive Statistik der Radarrückstreuung  $\sigma^0$  von Winterweizen der Testflächen in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2001.
- Tab. A-5b: Deskriptive Statistik der Radarrückstreuung  $\sigma^0$  von Winterweizen der Testflächen in Neetzow während der Blüte am 09. Juni 2001.
- Tab. A-5c: Deskriptive Statistik der Radarrückstreuung  $\sigma^0$  von Winterweizen der Testflächen in Neetzow während der Bestockung am 07. April 2002.
- Tab. A-5d: Deskriptive Statistik der Radarrückstreuung  $\sigma^0$  von Winterweizen der Testflächen in Neetzow während des Ährenschiebens am 05. Juni 2002.
- Abb. A-3a: Mittlerer Radarrückstreukoeffizient ( $\sigma^0$ ) von Winterweizen während des Schossens am 08. Mai 2001 auf den Testflächen in Neetzow inklusive der Standardabweichung.
- Abb. A-3b: Mittlerer Radarrückstreukoeffizient ( $\sigma^0$ ) von Winterweizen während des Schossens am 09. Juni 2001 auf den Testflächen in Neetzow inklusive der Standardabweichung.
- Abb. A-3c: Mittlerer Radarrückstreukoeffizient ( $\sigma^0$ ) von Winterweizen während des Schossens am 07. April 2002 auf den Testflächen in Neetzow inklusive der Standardabweichung.

- Abb. A-3d: Mittlerer Radarrückstreukoeffizient ( $\sigma^0$ ) von Winterweizen während des Schossens am 05. Juni 2002 auf den Testflächen in Neetzow inklusive der Standardabweichung.
- Tab. A-6: Test auf Normalverteilung der Radarrückstreuung von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow in den Jahren 2001 und 2002.
- Tab. A-7a: Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse der Einzelkanalrückstreuung von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (2001).
- Tab. A-7b: Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse der Einzelkanalrückstreuung von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (2002).
- Abb. A-4a: Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 10.2 in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2001.
- Abb. A-4b: Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 10.3 in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2001.
- Abb. A-4c: Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 10.2 in Neetzow während der Blüte am 09. Juni 2001.
- Abb. A-4d: Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 10.3 in Neetzow während der Blüte am 09. Juni 2001.
- Abb. A-4e: Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 3.2 in Neetzow während der Bestockung am 07. April 2002.
- Abb. A-4f: Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 10.3 in Neetzow während der Bestockung am 07. April 2002.
- Abb. A-4g: Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 3.2 in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2002.
- Abb. A-4h: Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 10.3 in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2002.
- Abb. A-4i: Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 3.2 in Neetzow während des Ährenschiebens am 05. Juni 2002.
- Abb. A-4k: Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 10.3 in Neetzow während des Ährenschiebens am 05. Juni 2002.
- Tab. A-8a: Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen  $\sigma^0$  der Einzelkanäle und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow.
- Tab. A-8b: Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen  $\sigma^0$  der Einzelkanäle und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow.
- Tab. A-8c: Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen  $\sigma^0$  der Einzelkanäle und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow.
- Tab. A-8d: Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen  $\sigma^0$  der Einzelkanäle und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow.
- Tab. A-8e: Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen  $\sigma^0$  der Einzelkanäle und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow.

- Tab. A-9a: Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2001 - Schossen).
- Tab. A-9b: Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (09. Juni 2001 – Blüte).
- Tab. A-9c: Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (07. April 2002 – Bestockung).
- Tab. A-9d: Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2002 – Schossen).
- Tab. A-9e: Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (05. Juni 2002 – Ährenschieben).
- Tab. A-10: Wilk's Lambda der Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Radarinformation als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Untersuchungsgebiet Neetzow).
- Tab. A-11: Klassifikationsgenauigkeit der Diskriminanzfunktion (%) unter Verwendung eines Polarisationsindizes als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Neetzow).



## 1 Einleitung

Seit Ende der 80er wird in der landwirtschaftlichen Praxis über eine innovative Bewirtschaftungsform nachgedacht, dem Precision Agriculture (PA). Das Grundprinzip von PA ist eine standortgerechte und auf ökologische Ansprüche ausgerichtete Bestandesführung mit dem Ziel der teilschlagspezifischen Optimierung des Betriebsmitteleinsatzes<sup>1</sup>. Hierbei soll der lokalen Variabilität der natürlichen Standorteigenschaften Rechnung getragen werden, die innerhalb eines Schlags<sup>2</sup> größer sein kann als in der gesamten umliegenden Landschaft (HANEKLAUS ET AL. 1997). Kleinräumige Unterschiede in den Standorteigenschaften führen zu inhomogenen Pflanzenbeständen. Bei einem räumlich einheitlich ausgerichteten Betriebsmitteleinsatz (z.B. Düngemittelapplikation) gehen dann Unter- und Überversorgung der einzelnen Teilbereiche miteinander einher (SCHNUG ET AL. 1990).

Die für die Realisierung von teilflächenspezifischen Produktionsmethoden notwendigen Schlüsseltechnologien, wie Geografische Informationssysteme (GIS), Globale Positionierungssysteme (GPS) und variable Applikationstechniken, sind heutzutage in ausreichender Qualität vorhanden (DIXON & MCCANN 1997). Entwicklungsbedarf besteht aber bei der effizienten Erfassung der räumlichen Variabilität der Standortmerkmale (HANEKLAUS & SCHNUG 2000), damit aufbauend auf geocodierten Standortinformationen Managementstrategien entwickelt werden können.

Den Methoden der Fernerkundung<sup>3</sup> wird ein großes Potenzial zur Variabilitätserfassung und zur Ableitung teilflächenspezifischer Bewirtschaftungsmaßnahmen zugesprochen (MORAN ET AL. 1997, DIXON & MCCANN 1997, BRISCO ET AL. 1998). Sie kann einerseits für die grundlegende Basisdatenbeschaffung genutzt werden und andererseits auch Entscheidungshilfen zur aktuellen Bestandesführung bereitstellen (JÜRGENS 2000). Zudem ermöglicht sie aktuelle flächenhafte Überblicke zu erheben und aktuelle Variationen im Pflanzenbestand zu verschiedenen Zeitpunkten aufzuzeigen. KÜHBAUCH (2002) sieht vor allem in der Satellitenfernerkundung das Potenzial, in genügend enger, zeitlicher Folge die

---

<sup>1</sup> Betriebsmittel sind u.a. Düngemittel, Fungizide, Herbizide und Wachstumsregulatoren.

<sup>2</sup> Der Begriff 'Schlag' steht für zusammenhängende Flurstücke, die mit einer Fruchtart bestellt sind.

<sup>3</sup> Fernerkundungsdaten können von verschiedenen Sensoren aufgenommen werden. Im Rahmen dieser Arbeit bezieht sich der Begriff Fernerkundung auf flugzeug- und satellitengestützte Sensoren.

dynamischen Veränderungen landwirtschaftlicher Bestände in ihrer räumlichen Ausdehnung zu erfassen.

In Zukunft wird erwartet, dass durch die Weiterentwicklung der Fernerkundung aktuelle und kostengünstige Daten zur Verfügung stehen werden (HANEKLAUS & SCHNUG 2000). Die technische Entwicklung muss dem Ziel folgen, den Bedürfnissen des PA gerecht zu werden. Die operationelle Anwendbarkeit der Fernerkundung ist vor allem von der räumlichen und zeitlichen Auflösung<sup>4</sup> abhängig. Bevor die Fernerkundung als wirksames Instrument im Agrarbereich eingesetzt werden kann, müssen jedoch zunächst quantitative Beziehungen zwischen den aufgezeichneten Signalen und landwirtschaftlich relevanten chemischen bzw. morphologischen Pflanzenparametern geklärt werden (GODDING ET AL. 1989). Eine umfangreiche Zusammenstellung zu Ansprüchen (MORAN 2000) sowie derzeitiger und zukünftiger Einsatzmöglichkeiten der Fernerkundung in PA ist in MORAN ET AL. (1997) und BRISCO ET AL. (1998) zu finden.

Die pflanzenbaulichen Maßnahmen während der Vegetationsphase müssen sich an der standörtlichen Heterogenität der Pflanzenbestände zum jeweils aktuellen Zeitpunkt orientieren. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass Bestandesmerkmale aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden können, die für zeitkritische pflanzenbauliche Maßnahmen relevant sind (MORAN ET AL. 1997). Der überwiegende Teil der Ergebnisse bezieht sich dabei auf die Nutzung optischer Sensoren.

Variable Betriebsmittelapplikationen auf Basis von Fernerkundungsinformation richten sich prinzipiell nach Unterschieden im Pflanzenwachstum, welche über eine Beziehung zwischen spektralen Vegetationsindizes<sup>5</sup> (VI) und biophysikalischen Parametern, wie z.B. Blattflächenindex (LAI) oder Biomasse, abgeleitet werden können. Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zeigen diesbezüglich signifikante Zusammenhänge (TUCKER 1979, DUSEK ET AL. 1985, WANJURA & HATFIELD 1987, WIEGAND ET AL. 1992, TAYLOR ET AL. 1997). Obwohl einzelne VI's mit verschiedenen Pflanzenparametern korrelieren, ist es schwierig,

---

<sup>4</sup>Unter zeitlicher Auflösung wird die Wiederholungsrate der Fernerkundungsaufnahmen verstanden. Das PA erfordert eine Wiederholungsrate von 1 Woche (MORAN 2000).

<sup>5</sup>Ein Vegetationsindex ist eine Kombination aus der Reflexion verschiedener Spektralbereiche, die sensitiver auf Vegetationsunterschiede reagiert als die Einzelkanäle. Die meisten VI bestehen aus der Reflexion des roten und infraroten Spektralbereichs.

nachzuweisen, welche spezifischen Pflanzeigenschaften für das registrierte Signal verantwortlich sind (BARET & GUYOT 1991).

Verschiedene Studien konnten das Informationspotenzial der Fernerkundung für eine variable Düngemittelapplikation belegen. So konnten von TAYLOR ET AL. (2000) und FLOWERS ET AL. (2001) Heterogenitäten in der Bestockungsdichte von Winterweizen durch Unterschiede in deren spektralen Reflexion aufgezeigt werden. HINZMAN ET AL. (1986) und BLACKMER ET AL. (1996) detektierten auf gleiche Weise feldinterne Variabilitäten in der Stickstoffversorgung des Bestandes. Beide Informationsebenen wurden als Grundlage für variable Applikationsstrategien herangezogen.

Strategien für variable Fungizidapplikationen beruhen u.a. auf feldinternen Bestandesdichteheterogenitäten, die aus spektraler Information abgeleitet werden können (SECHER 1997, BJERRE 1999, MILLER ET AL. 2002). Diese Information kann zur Erstellung von Pilzbefall-Risikokarten herangezogen werden, oder dient als Entscheidungshilfe für differenzierte Applikationsraten hinsichtlich der zu behandelnden Blattmasse (BJERRE ET AL. 2002, MILLER ET AL. 2002). Für eine variable Fungizidapplikation, auf Grundlage unterschiedlicher Befallsintensität scheint die spektrale Information dagegen kaum nutzbar zu sein. Die durch den Pilzbefall hervorgerufenen spektralen Veränderungen im Bestand sind denen anderer Stressfaktoren sehr ähnlich und können nicht eindeutig zugeordnet werden (LORENZEN & JENSEN 1989, HATFIELD & PINTER 1983, NILSSON 1995).

Da pflanzenbauliche Maßnahmen zumeist sehr zeitkritisch sind, ist die ständige Datenverfügbarkeit Grundvoraussetzung für eine operationelle Nutzung der Fernerkundung als Datenbasis für landwirtschaftliche Applikationen. Aufgrund der Witterungsabhängigkeit optischer Sensoren ist die regelmäßige Verfügbarkeit von wolkenfreien Bilddaten nicht gewährleistet (MORAN ET AL. 1997, LILIENTHAL 2003). Die SAR-Fernerkundung<sup>6</sup> bietet aufgrund ihrer Witterungsunabhängigkeit eine zuverlässige Alternative zur Gewinnung fernerkundlicher Bestandesinformation. Das derzeit noch schlechte Verständnis des Zusammenhanges zwischen der Radarrückstreuung und den Boden- bzw. Vegetationseigenschaften aufgrund der komplexen Wirkungsweise verschiedener

---

<sup>6</sup> SAR (Synthetic Aperture Radar) ist eine Sonderform der bildgebenden Radarsysteme.

Rückstreumechanismen stellt dabei die größte Schwäche in Bezug auf die Anwendung der Radarfernerkundung in PA dar (MORAN ET AL. 1999). Derzeit befasst sich die Forschung verstärkt mit der Verbesserung des Verständnisses der komplexen Wirkungsmechanismen zwischen elektromagnetischen Wellen und dem Vegetations-Boden-Gefüge (BRISCO & BROWN 1998). Weitreichende Erkenntnisse wurden in Labor- und Feldstudien erzielt (BNSC 2001).

Die Radarrückstreuung reagiert sensitiv auf Unterschiede in verschiedenen physiologischen Bestandesmerkmalen. Beziehungen zwischen der Radarrückstreuung und dem LAI (LE TOAN ET AL. 1984, ULABY ET AL. 1984, FERRAZZOLI ET AL. 1992, PALOSCIA 1998, MACELLONI ET AL. 2001) sowie der Biomasse (LUCIANI ET AL. 1994, STEINGIEBER & KÜHBAUCH 1998, BNSC 2001), der Vegetationsdichte (MORAN ET AL. 1999) und dem Pflanzenwassergehalt (LE TOAN ET AL. 1984, PRÉVOT ET AL. 1993, BARONTI ET AL. 1995) zeigen zunächst ein generell vorhandenes Informationspotenzial. BOUMAN (1991) sieht die Stärke der Korrelationen jedoch als zu gering für landwirtschaftliche Anwendungen. Die Untersuchungen wurden unter Verwendung der Merkmals-Mittelwerte gesamter Anbauflächen durchgeführt und lassen keine Aussage hinsichtlich der Erfassung schlaginterner Variabilität der Bestandesmerkmale zu.

Das Radarsignal einer Vegetationsdecke wird vor allem durch ihre Struktur und ihren Wassergehalt bestimmt (SCHMULLIUS & EVANS 1997). Je nach Spezifikation des Sensors kann der Boden einen signifikanten Beitrag zum Rückstreusignal leisten und dieses „verfälschen“ (MORRISON ET AL. 2000, BROWN ET AL. 2001). Inhomogenitäten innerhalb des Bestandes aufgrund von Nährstoffmangel, wie z.B. Stickstoffdefizite lassen sich dagegen nicht aufzeigen. Aufgrund dieser speziellen Empfindlichkeiten kann die Radarfernerkundung eine Informationsgrundlage für landwirtschaftliche Applikationen darstellen, die auf Basis struktureller Bestandesunterschiede oder räumlicher Wassergehaltsvariabilitäten beruhen.

Bevor die Radarfernerkundung als wirksames Instrument in der teilschlagspezifischen Landbewirtschaftung eingesetzt werden kann, müssen zunächst quantitative Beziehungen zwischen den aufgezeichneten Rückstreuwerten und landwirtschaftlich relevanten Bestandesmerkmalen geklärt bzw. aufgezeigt werden, um robuste Vorhersage-Algorithmen entwickeln zu können.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Analyse von multi-dimensionalen SAR-Bilddaten hinsichtlich ihres Informationsgehaltes für die teilschlagspezifische Bestandesführung. Vor diesem Hintergrund ergab sich folgende Arbeitshypothese:

*Mit SAR-Bilddaten können Informationen über räumlich variable Bestandesmerkmale erfasst und als Informationsquelle für PA bereitgestellt werden, die dem Informationsgehalt optischer Fernerkundungssensoren zumindest gleichwertig sind.*

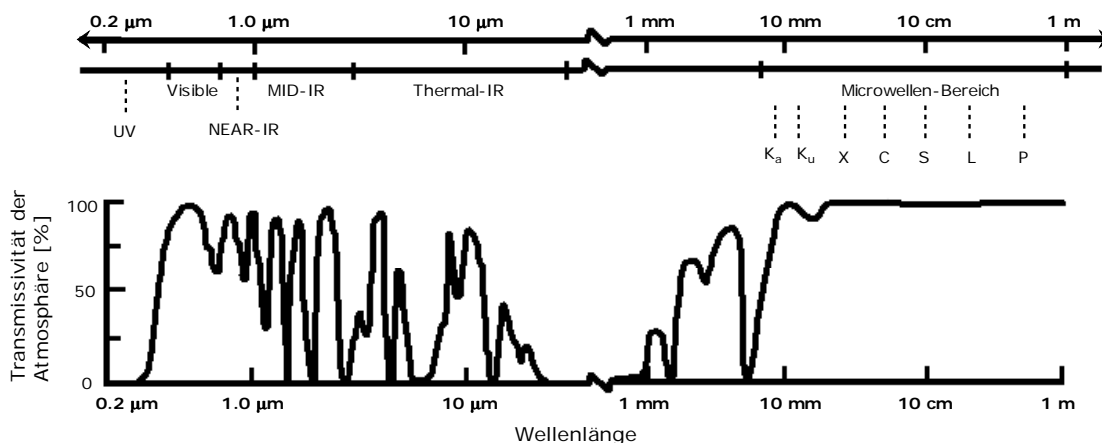
Die Arbeitshypothese wurde anhand der folgenden fünf Kernfragen untersucht:

- ▶ Inwieweit verändert sich die Radarsignatur und das Informationspotenzial der SAR-Daten in Abhängigkeit von der Bestandesentwicklung?
- ▶ Welche Beziehungen bestehen zwischen den Radarsignaturen und ausgewählten Bestandesmerkmalen und inwieweit lassen sich diese verallgemeinern?
- ▶ Ist die Radarfernerkundung zur Lokalisierung kleinräumiger Bestandesvariabilität geeignet und inwieweit wird ihr Informationspotenzial durch die Multi-Dimensionalität verbessert?
- ▶ Inwieweit lassen sich bestehende Beziehungen flächenhaft modellieren?
- ▶ Ist es möglich, aus Radardaten Bestandesinformationen abzuleiten die denen optischer Daten vergleichbar sind?

Untersuchungen an Radarbilddaten von Pflanzenbeständen wurden bereits in mehreren Arbeiten publiziert (PAMPALONI ET AL. 1997, PALOSCIA 1998, MORAN 1999, MACELLONI ET AL. 2001). Lediglich einzelne Arbeiten basierten jedoch auf einer Ground-Truth zur quantitativen Bestimmung der Pflanzenmasse (STEINGIEBER 1997). Der Aspekt der schlaginternen, räumlichen Variabilität eines Bestandes während spezifischen Wachstumsstadien wurde bisher nicht untersucht.

## 2 Grundlagen der Radarfernerkundung

Die Fernerkundung<sup>7</sup> nutzt als Informationsträger die elektromagnetische Strahlung, die sich in Form harmonischer Wellen in Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Die Radarfernerkundung operiert im Spektralbereich der Mikrowellen, für welche die Atmosphäre nahezu vollständig durchlässig ist (Abb. 2-1). Radar ist ein aktives Fernerkundungsverfahren, wobei die elektromagnetische Strahlung künstlich vom Aufnahmesensor erzeugt wird. Die Welle wird emittiert und als reflektierte Strahlung (Rückstreuung) detektiert, welche sodann Informationen über die physikalischen Eigenschaften der Geländeoberfläche enthält. Die Datenaufnahme im Mikrowellenbereich bietet gegenüber der optischen Fernerkundung, die im Bereich kürzerer Wellenlängen operiert, den Vorteil der Beleuchtungs- und Witterungsunabhängigkeit (ALBERTZ 1991).



**Abb. 2-1:** Elektromagnetisches Spektrum (verändert nach HENDERSON & LEWIS 1998)

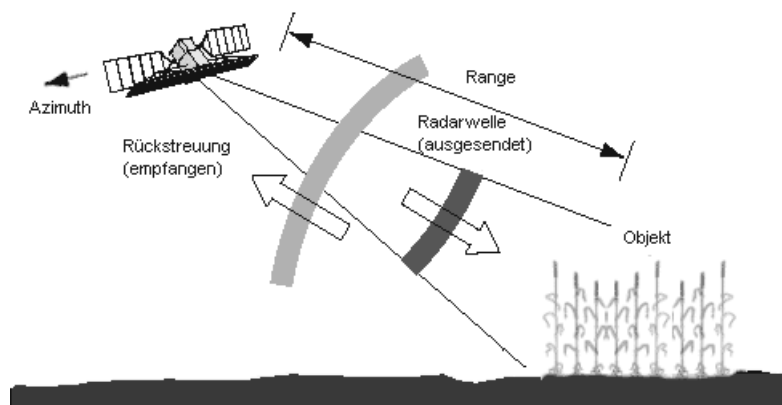
Es gibt verschiedene Prinzipien, nach denen ein Radarsensor funktioniert. Die Systeme gliedern sich in abbildende und nicht abbildende Systeme (HILDEBRANDT 1996). Für die Fernerkundung von Landoberflächen und deren qualitative Analyse werden hauptsächlich abbildende Sensoren eingesetzt, die nach dem Aufnahmeprinzip des *Synthetic Aperture Radar*

<sup>7</sup> „Fernerkundung im umfassenden Sinne ist die Aufnahme oder Messung von Objekten, ohne mit diesen in körperlichen Kontakt zu treten, und die Auswertung dabei gewonnener Daten oder Bilder zur Gewinnung quantitativer und qualitativer Informationen über deren Vorkommen, Zustand oder Zustandsänderung und ggf. deren natürliche und soziale Beziehungen zueinander“ (HILDEBRANDT 1996).

(SAR) arbeiten. Nachfolgend wird das Aufnahmeprinzip erläutert. Für eine detaillierte Beschreibung der theoretischen und physikalischen Grundlagen der SAR-Fernerkundung wird auf ELACHI (1988), HENDERSON & LEWIS (1998) und KLAUSING & HOLPP (2000) verwiesen.

### 2.1 Aufnahmeprinzip eines SAR-Sensors

Während des Überfluges werden kohärente<sup>8</sup> Radarimpulse seitlich (*Range-Richtung*), d.h. senkrecht zur Flugrichtung (*Azimuth-Richtung*), in einem keulenförmigen Strahl ausgesendet. Diese Radarsysteme werden auch Seitensichtradar genannt, da der aufgezeichnete Geländestreifen seitlich versetzt und parallel zur Flugbahn des Sensors liegt (Abb. 2-2). Hierzu zählen sowohl Systeme mit realer Apertur (*RAR*) als auch mit einer synthetischen Apertur (*SAR*).



**Abb. 2-2:** Schematische Darstellung der Radaraufzeichnung.

Aufgrund der schrägen Ausbreitung der Welle wird ein geometrisch verzerrtes Schrägaufnahmebild (*slant-range*) aufgezeichnet. Für Analysezwecke werden diese Rohdaten im Allgemeinen über ihre Winkelbeziehungen in reale, horizontale Entfernungen umgerechnet (*ground-range*).

**Räumliche Auflösung:** Die räumliche Auflösung eines Systems wird allgemein definiert als der Mindestabstand, in dem sich zwei Objekte befinden dürfen, damit sie vom Sensor noch als zwei verschiedene Objekte erkannt und in unterschiedlichen Bildpunkten abgebildet werden.

<sup>8</sup> Kohärente Wellen definieren zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort exakt ein Wellenfeld, da sie eine konstante Phasenbeziehung aufweisen (KLAUSING & HOLPP 2000). Sie sind somit in Phase.

Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Auflösungsvermögen innerhalb des Aufnahmestreifens in *Range*- und in *Azimuth-Richtung* unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten unterliegt.

Die Auflösung in *Range* wird im Wesentlichen durch die Laufzeitdauer des ausgesendeten Impulses  $\tau$  bestimmt. Die seitliche Abstrahlung ist notwendig, damit eine räumliche Trennung der vom Boden reflektierten Impulse über die Laufzeitdifferenz erfolgen kann. Objekte im Gelände mit unterschiedlichen *Nadirdistanzen*<sup>9</sup> reflektieren die Impulse zeitlich versetzt. Bei senkrechten Aufnahmen würden die Nadirdistanzen gleich sein und die Objekte würden sich im Abbild überlagern. Die *Range*-Auflösung ist bei gegebener Flughöhe eine Funktion des Depressionswinkels (Abb. 2-4) und wird umso besser, je größer die Distanz zwischen Objekt und Antenne ist (KLAUSING & HOLPP 2000). Dies gilt sowohl für die *RAR*- als auch *SAR*-Systeme.

Die räumliche Auflösung in *Azimuth* ist von der Radarstrahlbreite abhängig. Aufgrund der fächerförmigen Ausbreitung der Radarwelle ist der Radarstrahl im Nahbereich (*near-range*) schmaler als im Fernbereich (*far-range*), so dass bei *RAR*-Systemen die Auflösung mit zunehmender Entfernung zum Sensor abnimmt (HILDEBRANDT 1996). Die *Azimuth*-Auflösung ist umso besser, je schmaler der Radarimpuls von der Sensorantenne abgestrahlt werden kann. Je länger die Sensorantenne ist, desto stärker kann der Strahl gebündelt werden. Einer technischen Verbesserung der *Azimuth*-Auflösung sind daher baubedingt Grenzen gesetzt, welche jedoch durch die synthetische Apertur der *SAR*-Systeme umgangen werden. Bei ihnen wird die relativ kurze Antenne durch Ausnutzung der Flugbewegung künstlich verlängert.

Durch die seitliche Aussendung eines breiten Radarimpulses wird bei der Vorwärtsbewegung der Sensorplattform jedes Geländeobjekt mehrfach und immer in verschiedenen Sensorpositionen aufgenommen. Diese Überlappung stellt die eigentliche synthetische Apertur dar. Durch die scheinbare Bewegung der Objekte durch den Radarstrahl kommt es zu Frequenzverschiebungen, die auf dem *Dopplereffekt* beruhen (KLAUSING & HOLPP 2000). Je nach Lage des Objektes, bezogen auf die Senkrechte zur Flugbahn des Sensors, erhöht oder verringert sich die Frequenz. Diese Frequenzänderungen werden für die

---

<sup>9</sup> Die Nadirdistanz ist die Entfernung vom Objekt zur Lotrechten des Sensors. Sie wird durch den Beobachtungswinkel bestimmt (Abb. 2-4).



räumliche Trennung von Objekten mit gleicher Entfernung zum Sensor genutzt. Die Auflösung in *Azimuth*-Richtung ist dabei umso besser, je mehr Radarechos von einem Objekt empfangen werden, und je genauer der Sensor geringe Unterschiede in der Frequenzverschiebung messen kann. Die Grundauflösung ist über den gesamten Aufnahmestreifen gleich.

## 2.2 Abbildungsparameter der Radarrückstreuung

Die Rückstreueigenschaften der Objekte werden durch komplexe Wechselwirkung verschiedener system- und objektspezifischer Faktoren beeinflusst (Abb. 2-3). Diese basieren vor allem auf der Funktionsweise und den physikalischen Grundlagen des Aufnahmeverfahrens, sowie auf den physikalischen Eigenschaften der Objekte. Der Einfluss dieser Parameter auf die Radaraufnahme soll im Folgenden kurz erläutert werden:

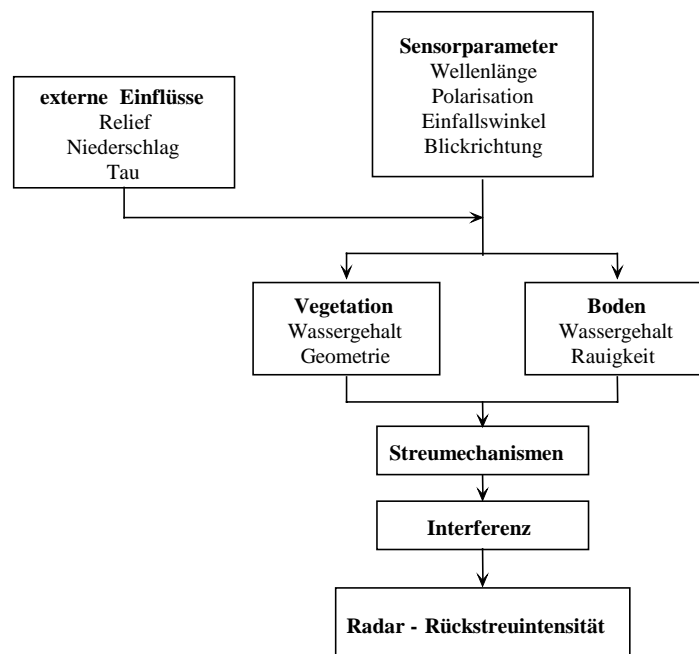


Abb. 2-3: Relevante Parameter der Radar-Rückstreuung

### 2.2.1 Rückstreukoeffizient

Abbildende Radarsysteme erzeugen Bilder, deren Pixel-Grauwerte durch die Intensität des von der Geländeoberfläche zurückgestreuten Radarimpulses bestimmt werden. Die am Sensor registrierte Rückstreuintensität wird auch *radar-brightness* ( $\beta^0$ ) genannt (Kap. 3.5.1). Die empfangene Rückstreuung wird in ihrer Stärke sowohl von Systemparametern als auch von

Geländeeigenschaften bestimmt. Die Stärke des empfangenen Rückstreuimpulses lässt sich vereinfacht durch die allgemeine Radargleichung (2-1) beschreiben (LEWIS ET AL. 1998):

$$[2-1] \quad P_R = P_T \sigma \left( \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \right)$$

$P_R$  : empfangener Energieimpuls [Watt]

$P_T$  : ausgesendeter Energieimpuls [Watt]

$G$  : *Antenna Gain*, der sog. Antennengewinn [dB]

$\lambda$  : Wellenlänge [m]

$R$  : Schrägentfernung zwischen Antenne und Geländeobjekt [m]

$\sigma$  : effektiver Rückstreuquerschnitt<sup>10</sup> des Geländeobjektes (*radar cross section*) [m<sup>2</sup>]

Der Grauwert eines Pixels ergibt sich zumeist aus der Rückstreuung vieler zufällig verteilter Rückstreuer innerhalb einer geometrischen Auflösungszelle und wird daher als mittlere Rückstreuenergie ( $\sigma^0$ ) angegeben (2-2). Der  $\sigma^0$ -Wert eines Bildelementes ist somit immer ein Mischsignal verschiedener Objekte an der Erdoberfläche.

$$[2-2] \quad \sigma^0 = \frac{\sigma}{A}$$

$\sigma^0$  : Rückstreukoeffizient [dB]

$\sigma$  : effektiver Rückstreuquerschnitt des Geländeobjektes (*radar cross section*) [m<sup>2</sup>]

$A$  : Fläche der Auflösungszelle [m<sup>2</sup>]

Aus Gleichung 2-1 und Gleichung 2-2 ergibt sich:

$$[2-3] \quad P_R = P_T (\sigma^0 A) \left( \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \right)$$

Löst man die Gleichung nach  $\sigma^0$  auf, so wird deutlich, dass der Rückstreukoeffizient  $\sigma^0$  (*sigma-naught*) eines Objektes durch die Messung von  $P_R$  ermittelt werden kann, sofern alle anderen Parameter bekannt sind. Der Rückstreukoeffizient ist abhängig von den Objekteigenschaften und somit die einzige nicht kontrollierbare Größe. Er kann über mehrere

---

<sup>10</sup> „Der Radarrückstreuquerschnitt ist definiert als äquivalente Echofläche eines Zieles, die, multipliziert mit der Strahlungsdichte am Zielort, bei kugelförmiger Ausbreitung am Empfangsort die gleiche Strahlungsdichte wie die wirkliche Reflexion hervorruft“ (KLAUSING & HOLPP 2000).

Größenordnungen variieren und wird deshalb im logarithmischen Maß [dB] angegeben, um den Dynamikbereich in darstellbarer Form zu halten.

$$[2-4] \quad \sigma^0 \text{ (dB m}^{-2}\text{)} = 10\log(\sigma^0)$$

$\sigma^0$  ist generell eine Funktion des Einfallswinkels, der Wellenlänge, der Polarisierung sowie der geometrischen und elektrischen Eigenschaften des Geländes. Der Rückstreuoeffizient dient als Vergleichsgröße bei Signaturuntersuchungen und Interpretationen von Radarbildern.

### 2.2.2 Systemspezifische Abbildungsparameter

Die Rückstreuung der Radarwellen von der Erdoberfläche wird von Seiten des Aufnahmesystems vor allem durch die Parameter Wellenlänge und Polarisierung bestimmt. Diese sollen im Folgenden kurz vor dem Hintergrund landwirtschaftlicher Fragestellungen analysiert werden. Der Einfallswinkel wird an sich auch vom System vorgegeben, hat aber eine Sonderstellung und wird daher erst unter den objektspezifischen Abbildungsparametern (Kap. 2.2.3) behandelt.

*Wellenlänge:* In der Radarfernerkundung wird für die Bezeichnung der Spektralbänder an Stelle der Wellenlänge ( $\lambda$ ) häufig die Frequenz ( $\nu$ ) verwendet, die als Funktion der Wellenlänge über die mathematischen Beziehung  $\nu = c\lambda^{-1}$  gegeben ist. Radarsysteme arbeiten im Mikrowellenbereich zwischen 1 mm und 1 m (300 und 0,3 GHz). Der gesamte Bereich wird in einzelne Bandbereiche<sup>11</sup> untergliedert, die in der Literatur teilweise unterschiedlich angegeben werden (Tab. 2-1). Im Mikrowellenlängenbereich ist die Atmosphäre nahezu vollständig durchlässig für elektromagnetische Strahlung (Abb. 2-1), so dass Wolken und Nebel fast ungehindert durchdrungen werden können. Lediglich starke Niederschläge können die Transmissivität kurzer Wellenlängen (< 4 cm) beeinträchtigen.

Mikrowellstrahlung hat außerdem die Fähigkeit, in bestimmte Oberflächen bzw. Materialien eindringen zu können. Eine Welle, die in ein bestimmtes Medium eindringt, kann je nach Materialeigenschaften absorbiert oder gestreut werden. Die Eindringtiefe ist dabei wellenlängenabhängig. Generell dringen längere Radarwellen tiefer in das Medium ein als

---

<sup>11</sup> In der Radarfernerkundung wird für die Benennung unterschiedlicher Wellenlängen der Begriff 'Band' anstelle von 'Kanal' verwendet, der in der optischen Fernerkundung gebräuchlich ist.

kürzere, die hauptsächlich an der Oberfläche reflektiert werden und somit vorwiegend Oberflächeninformation enthalten (Kap. 2.2.3). Insbesondere Wellenlängen, deren Dimensionen ähnlich den Objektausmaßen (z.B. Blätter oder Halme) sind, wird eine hohe Interaktion mit dem Objekt zugesprochen (STEINGIESSER 1997, BRISCO & BROWN 1998).

**Tab. 2-1:** Bezeichnung der Spektralbänder in der Radarfernerkundung.

<b>Band</b>	<b>Wellenlänge (<math>\lambda</math>) [cm]</b>	<b>Frequenz [GHz]</b>
<b>K<sub>a</sub></b>	0,75 – 1,10	40,0 – 26,5
<b>K</b>	1,10 – 1,67	26,5 – 18,0
<b>K<sub>u</sub></b>	1,67 – 2,40	18,0 – 12,5
<b>X</b>	2,40 – 3,75	12,5 – 8,0
<b>C</b>	3,75 – 7,50	8,0 – 4,0
<b>S</b>	7,50 – 15,0	4,0 – 2,0
<b>L</b>	15,0 – 30,0	2,0 – 1,0
<b>P</b>	30,0 – 100,0	1,0 – 0,3

Grau unterlegt sind die beiden Bandbereiche, die in der Arbeit verwendet wurden (nach LILLESAND & KIEFER 1994)

Die Eindringtiefe<sup>12</sup> wird neben der Wellenlänge noch von weiteren Parametern, wie z.B. dem Einfallswinkel und den dielektrischen Eigenschaften des Objektes bestimmt.

*Polarisation:* Elektromagnetische Strahlung setzt sich aus einem elektrischen und einem magnetischen Feld zusammen. Beide Felder liegen quer zur Fortpflanzungsrichtung der Welle und stehen senkrecht aufeinander. Die Lage (Schwingungsrichtung) des elektrischen Feldes wird verwendet, um die Polarisation der Radarstrahlung zu definieren. Liegt die Schwingungsrichtung konstant in einer Ebene, so spricht man von linear polarisierten Wellen<sup>13</sup>.

Bei aktiven Radarsystemen gehört neben der Wellenlänge auch die Polarisation zur Kennzeichnung des Radarkanals. Konventionelle SAR-Systeme arbeiten hauptsächlich mit horizontal (H) oder vertikal (V) polarisierten Wellen, aus denen sich vier Kombinationsmöglichkeiten ergeben: die gleichpolarisierten Kombinationen, bei denen die Sendepolarisation gleich der Empfangspolarisation ist (HH und VV) und die kreuzpolarisierten Kombinationen, bei denen empfangene und gesendete Welle jeweils reziprok sind (VH oder HV).

<sup>12</sup> Die Eindringtiefe ist definiert als die Strecke, die die Radarwelle in einen Bestand eindringt, bis nur noch 37 % der Sendeleistung gemessen werden (ULABY 1992).

<sup>13</sup> Wenn sich die Schwingungsebene der elektromagnetischen Welle mit der Zeit dreht, ist sie zirkular polarisiert.

Der erste Buchstabe steht dabei für die ausgesendete und der zweite für die empfangene Polarisation.

Beim Auftreffen der Strahlung auf ein Objekt wird ein Teil von ihr in gleicher Polarisation reflektiert, ein anderer Teil wird vor allem durch Vielfachreflexion depolarisiert, d.h. die Schwingungsebene der elektromagnetischen Welle wird gedreht. Dieser Prozess ist wiederum von verschiedenen Parametern wie Geometrie, Oberflächenrauigkeit und Dielektrizitätskonstante des Objektes abhängig. Insgesamt ist der Grad der Inhomogenität des Objektes von Bedeutung (ULABY & ELACHI 1990).

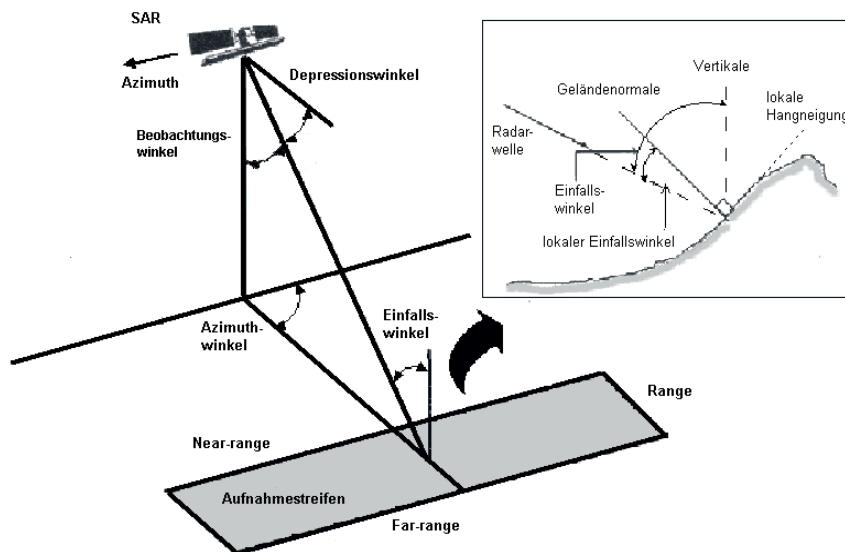
Im Allgemeinen interagieren vertikal polarisierte Wellen verstärkt mit vertikalen Strukturen des Pflanzenbestandes (z.B. Halme) und horizontal polarisierte Wellen mit horizontal orientierten Bestandekomponenten (LE TOAN ET AL. 1984, BRISCO ET AL. 1990, BROWN ET AL. 2001) (Kap. 2.2.5).

### 2.2.3 Objektspezifische Abbildungsparameter

Die an natürlichen Oberflächen stattfindenden Streuprozesse und das Eindringvermögen der Welle in ein Medium werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Hier spielen vor allem die dielektrischen Eigenschaften des Materials, die Geometrie und die Rauigkeit des Objektes, sowie die Orientierung des Objektes in Bezug auf die Beleuchtungsrichtung des Radars eine entscheidende Rolle.

*Einfallswinkel ( $\theta$ ):* Der Einfallswinkel (*incidence angle*) wird durch den Depressionswinkel (*depression angle*) am Aufnahmesensor vorgegeben (Abb. 2-4). Der Einfallswinkel ist definiert als Winkel zwischen einfallender Welle und der Vertikalen am Einfallspunkt, bezogen auf die horizontale Ebene.

Die Geländeoberfläche ist jedoch in den wenigsten Fällen horizontal. Daher wird der Einfallswinkel üblicherweise auf das lokale Gelände bezogen. Es handelt sich dann um den Winkel zwischen der Flächennormalen eines Rückstreuelementes und der Richtung der einfallenden Radarstrahlen. Man spricht dann vom lokalen Einfallswinkel ( $\theta_{loc}$ =*local incidence angle*).



**Abb. 2-4:** Winkelbezeichnungen bei SAR-Aufnahmen (verändert nach LEWIS ET AL. 1998).

Variationen des Einfallswinkels haben entscheidenden Einfluss auf das Rückstreuverhalten landwirtschaftlicher Flächen (BARONTI ET AL. 1995, MC NAIRN ET AL. 1998). Unter Annahme identischer Oberflächenparameter und gleicher Wellenlänge ist der Rückstreukoeffizient eine Funktion des Einfallswinkels (BRISCO & BROWN 1998). Der Einfluss des Einfallswinkels auf den Rückstreukoeffizienten variiert dabei mit der Wellenlänge. BENALLEGUE ET AL. (1994) zufolge unterliegt die Rückstreuintensität längerer Wellenlängen einer größeren Veränderung in Abhängigkeit variierender Einfallswinkel.

Die Beziehungen zwischen Einfallswinkel und Radarrückstreuung sind dabei immer abhängig von der Vegetationsart und dem Entwicklungsstadium der Pflanzen (GNOSA 1997). Mit zunehmender Vegetationsbedeckung des Bodens nimmt die Einfallswinkelabhängigkeit der Radarrückstreuung ab (SKRIVER 1992). Bei vorhandener Vegetationsbedeckung wird der Bodeneinfluss auf die Radarrückstreuung im Allgemeinen mit Anstieg des Einfallswinkels geringer (POIRIER ET AL. 1988, KÜHBAUCH 1990, BRISCO & BROWN 1998).

*Dielektrizitätskonstante:* Die komplexen Streuprozesse an der Grenzfläche zweier Medien sind stark von den natürlichen Materialien, dem Wassergehalt und den entsprechenden dielektrischen Eigenschaften abhängig. Die Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon$ ) ist ein Maß für die elektrische Eigenschaft des Materials. Sie setzt sich aus der Leit- und Absorptionsfähigkeit

zusammen, welche beide linear vom Wassergehalt abhängig sind (ULABY ET AL. 1986). Luft hat z.B. eine Dielektrizitätskonstante von  $\epsilon = 3$  und Wasser von ungefähr  $\epsilon = 80$  (LILLESAND & KIEFER 1994). Mikrowellige Strahlung dringt in Medien ein, die aufgrund unterschiedlicher dielektrischer Eigenschaften ihrer einzelnen Bestandteile inhomogen sind. Je geringer die Dielektrizitätskonstante eines Mediums ist, desto höher ist die Eindringtiefe der Mikrowellen in dieses Material. Je größer der Kontrast zwischen den Dielektrizitätskonstanten zweier Medien, desto stärker ist die Interaktion der elektromagnetischen Welle an deren Grenzfläche und somit auch die Radarrückstreuung. Eine Zunahme der dielektrischen Unterschiede zwischen Luft und einem Objekt infolge von erhöhtem Wassergehalt führt demnach zu erhöhter Reflexion. An direkten Berührungsflächen zwischen Luft und Wasser kann es aufgrund des starken dielektrischen Unterschiedes bei glatten Oberflächen zu spiegelnder Reflexion und bei rauen Oberflächen zu hoher Rückstreuung zum Sensor kommen.

Die Dielektrizitätskonstante von Wasser variiert in Abhängigkeit von der Wellenlänge (ULABY ET AL. 1986). Eine Zunahme der Wellenlänge führt zu einer höheren Dielektrizitätskonstanten. Da Vegetation und Böden häufig zu einem großen Teil aus Wasser bestehen, ist diese Abhängigkeit ein sehr wichtiger und bei der Interpretation zu beachtender Interaktionsprozess zwischen Vegetation und Radarstrahlung.

In verschiedenen Untersuchungen wurde in Übereinstimmung gezeigt, dass die Rückstreuung eines Bodens mit ansteigender Bodenfeuchtigkeit zunimmt (ULABY ET AL. 1986, JACKSON & SCHMUGGE 1989, ENGMAN & CHAUHAN 1995). In welchem Umfang die Pflanzenfeuchte Einfluss auf die Rückstreuung ausübt, ist nach bisherigem Wissensstand nicht eindeutig geklärt. Da eine sehr komplexe Beziehung zwischen Pflanzenfeuchte, Geometrie des Bestandes und der Wellenlänge besteht, ist keine pauschale Aussage möglich (STEINGIEßER 1997).

*Geometrie des Bestandes:* Landwirtschaftliche Bestände stellen für die Mikrowellenstrahlung eine dreidimensionale inhomogene Oberfläche dar, die nach oben durch die Luft und nach unten durch den Boden begrenzt wird. Das Bestandesvolumen besteht je nach phänologischem Stadium aus den verschiedenen Elementen Blatt, Halm und Frucht. Die räumlichen Strukturen des Pflanzenbestandes beeinflussen somit die Streucharakteristika und die Intensität der Radarrückstreuung. Die grundlegenden geometrischen Parameter sind Größe, Form und

Orientierung sowie die Kompaktheit<sup>14</sup> des Bestandes und die räumliche Verteilung von Halmen und Blättern (BRISCO & BROWN 1998). Insbesondere die Stellung und Breite der Fahnenblätter und der Ähren als auch die Dichte des Bestandes und die Ausrichtung der Halme spielen eine entscheidende Rolle (BOUMAN 1995).

Ein übergeordneter geometrischer Parameter ist die Orientierung der Anbaurichtung in Bezug auf die Radarblickrichtung. Lineare Objekte können in Abhängigkeit von ihrer *Range*-Orientierung im Radarbild unterschiedlich abgebildet werden. Eine vertikal zur Blickrichtung liegende Reihenorientierung führt vor allem im L-Band zu erhöhter Radarrückstreuung (ULABY & BARE 1979, SCHMULLIUS 1992).

*Oberflächenrauigkeit und Geländere relief:* Die Rauigkeit der Geländeoberfläche kann in Abhängigkeit der räumlichen Auflösung in mikro-, meso- und makroskalige Rauigkeiten untergliedert werden.

Mikroskalige Rauigkeiten sind in ihrer räumlichen Dimension kleiner als die Sensorauflösung. Die Oberflächenrauigkeit des Bodens wird durch die Größe, Verteilung und Orientierung der Bodenpartikel bestimmt. In Abhängigkeit von Wellenlänge und Einfallswinkel variiert der Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf das Rückstreusignal. Bei größeren Einfallswinkeln hängt die Rückstreuung zunehmend von Oberflächenrauigkeiten im Größenordnungsbereich der Wellenlänge ab. Je kleiner die Wellenlänge ist, desto eher gilt eine Oberfläche als rau und es findet diffuse Reflexion mit verstärkter Rückstreuung zum Sensor statt. Zur Charakterisierung einer rauen bzw. nicht-rauen Oberfläche wird meistens das RAYLEIGH-Kriterium (Gleichung 2-5) verwendet (LEWIS ET AL. 1998). Demnach ist eine Fläche eben, wenn:

$$[2-5] \quad h > \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$$

h: Höhe [cm]

$\lambda$ : Wellenlänge [cm]

$\theta$ : Einfallswinkel zwischen Oberfläche und Mikrowellen

---

<sup>14</sup> Unter Kompaktheit wird das Verhältnis zwischen dem Volumen der festen Bestandteile und der umgebenden Luft verstanden.



Generell steigt die Rückstreuung mit zunehmender Rauigkeit an (LEWIS ET AL. 1998). Eine vertikale Struktur der Anbauichtung in Bezug zur Aufnahmeichtung bedeutet ebenfalls eine erhöhte Rauigkeit der Bodenoberfläche.

Als mesoskalige Rauigkeiten sind Inhomogenitäten im Gelände zu nennen, deren Ausmaße etwas größer als die räumliche Auflösung des Sensors sind. Hierunter fallen kleinräumige Höhenänderungen, wie sie z.B. in Siedlungsbereichen oder an Waldrändern und Einzelbäumen auftreten.

Das Relief der Landoberfläche ist als makroskalige Rauigkeit zu verstehen. Aufgrund des Aufnahmeprinzips, führt das Relief zu geometrischen und infolge dessen zu radiometrischen Verzerrungen im Radarbild. Gleiche Objektstreuer können durch den Reliefeinfluss völlig unterschiedliche Intensitätswerte aufweisen (HOLECZ 1993). Mit Hilfe eines digitalen Geländemodells (DGM) ist es möglich, geometrische Verzerrungen weitestgehend zu entfernen (WEIMANN 1996), wohingegen die radiometrischen Störungen nicht vollständig korrigierbar sind (Kap. 2.3). Eine näherungsweise Korrektur der topografisch induzierten, radiometrischen Verzerrungen kann mit Hilfe eines Korrekturalgorithmus' unter Verwendung des lokalen Einfallswinkels durchgeführt werden (CHAMPION 1996, SU ET AL. 1997).

#### 2.2.4 Rückstreumechanismen

Der Rückstreukoeffizient jedes einzelnen Pixels ist definiert als die Summe der Vektoren der elektromagnetischen Felder, die von jedem einzelnen Element der Vegetationsschicht und des Bodens zurückgestreut wird (BRISCO & BROWN 1998). Die Rückstreuung eines mit Vegetation bedeckten Bodens setzt sich nach folgender Gleichung (2-6) aus drei Rückstreukomponenten zusammen (ULABY ET AL. 1996).

$$[2-6] \quad \sigma^0 = T^2 \sigma_s^0 + \sigma_{dv}^0 + \sigma_{int}^0$$

$\sigma_s^0$ : direkte Rückstreuung der Bodenoberfläche [dB]

$T^2$ : Transmissivität der Vegetation mit zweifacher Dämpfung

$\sigma_{dv}^0$ : direkte Rückstreuung des Vegetationsvolumens [dB]

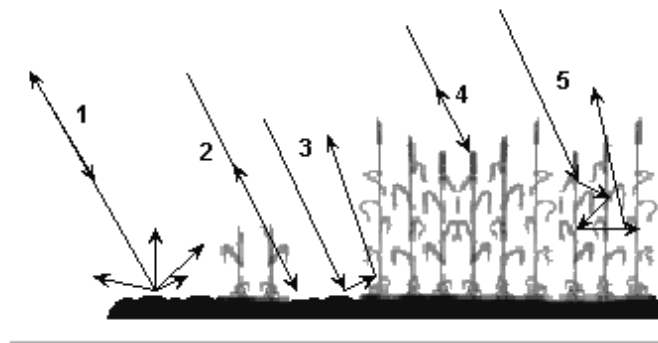
$\sigma_{int}^0$ : multiple Rückstreuung des Vegetationsvolumens und der Bodenoberfläche [dB]

Das Rückstreungssignal besteht demnach aus vielen Einzelsignalen, die durch unterschiedliche Streumechanismen beeinflusst worden sein können (HOEKMAN ET AL. 1992, BRISCO & BROWN 1998). Die Streumechanismen wiederum sind von den sensorspezifischen Parametern Wellenlänge, Polarisation und Einfallswinkel abhängig. Zu unterscheiden sind die beiden wichtigsten Streumechanismen:

*Oberflächenstreuung:* Beim Auftreffen der Strahlung auf die Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen, aber homogenen dielektrischen Eigenschaften kommt es je nach Rauigkeit des unteren Mediums zu gerichteter oder diffuser Oberflächenstreuung. Bei glatten Flächen tritt spiegelnde Reflexion auf. Je rauer die Oberfläche ist, desto größer wird der Anteil an diffus reflektierter Energie und desto höher wird die Rückstreuung.

*Volumenstreuung:* Die Volumenstreuung findet vor allem in der Vegetationsschicht statt (LEWIS ET AL. 1998). Innerhalb des Pflanzenbestandes wird die Strahlung an Halmen und Blättern diffus in alle Richtungen gestreut. Mit zunehmender Eindringtiefe in den Bestand nimmt die Intensität der Rückstreuung zum Sensor hin ab, da die gesamte Wegstrecke (hin und zurück) und damit die Dämpfung der Welle durch den Bestand zunimmt.

Für die Betrachtung landwirtschaftlicher Bestände spielen die in Abbildung 2-5 dargestellten Streumechanismen eine zentrale Rolle. Ihr Anteil an der jeweiligen Rückstreuintensität variiert in komplexer Abhängigkeit von den verschiedenen in Kapitel 2.2.2 und 2.2.3 beschriebenen system- und objektspezifischen Parametern.



**Abb. 2-5:** Streumechanismen an landwirtschaftlichen Beständen.

1. diffuse Rückstreuung von der Bodenoberfläche
2. Bodenrückstreuung mit zweifacher Dämpfung
3. zweifach spiegelnde Reflexion (*double-bounce-scattering*)
4. direkte Rückstreuung von der Vegetationsoberfläche
5. Vielfachstreuung innerhalb des Bestandes (*multiple-scattering*)

Streumechanismen, die zur Art der Oberflächenstreuung (1,2,3 und 4) gehören, weisen einen hohen Anteil an ko-polarisierter Rückstreuung auf. Bei Volumenstreuprozessen (5) findet aufgrund einer verstärkten Depolarisation der Welle eine erhöhte kreuz-polare Rückstreuung statt (HOLECZ 1993).

#### 2.2.5 Rückstreucharakteristik von Getreidebeständen

Die Radarrückstreuung eines Getreidebestandes wird durch das komplexe Wirkungsgefüge objekt- und sensorspezifischer Parameter bestimmt. Es ist dementsprechend nicht möglich, Veränderungen in der Rückstreuintensität auf nur einen spezifischen Faktor zurückzuführen. Bei gegebenen technischen Vorgaben vom Aufnahmesensor ist das Rückstreusignal eines Pflanzenbestandes von dessen geometrischer Struktur und Wassergehalt, sowie dem Bodenwassergehalt abhängig (ULABY & BUSH 1976, BRISCO & BROWN 1998). Insbesondere die Anordnung der Pflanzenkomponenten (z.B. Halme, Blätter und Ähren) im Raum, deren Dimension und Wassergehalt als auch die Rauigkeit der Bestandesoberfläche tragen zur Stärke des Rückstreusignals bei (BOUMAN & VAN KASTEREN 1990, KÜHBAUCH 1991, BRISCO & BROWN 1998). Der hohe Einfluss der geometrischen Beschaffenheit des Pflanzenbestandes auf das Radarrückstreusignal wurde in verschiedenen Studien nachgewiesen (LETOAN ET AL. 1984, BOUMAN & VAN KASTEREN 1990, BROWN ET AL. 1992, SCHMULLIUS UND NITHACK 1992, BARONTI ET AL. 1995, MACELLONI ET AL. 2001).

Während der verschiedenen Wachstumsphasen verändert sich die Geometrie des Bestandes. Je nach struktureller Veränderung im Bestand und in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Radarstrahlung wird das Rückstreusignal durch ein komplexes Zusammenwirken unterschiedlicher Streumechanismen erzeugt (HOEKMAN ET AL. 1992, LEWIS ET AL. 1998).

Neben den Streumechanismen kommen stets auch Absorptionsvorgänge zum Tragen. Vertikal und horizontal polarisierte Mikrowellen reagieren vornehmlich mit vertikalen bzw. horizontalen Bestandekomponenten (ALLEN & ULABY 1984, FERRAZOLLI & GUERRIRO 1994). Insbesondere die vertikalen Strukturen (z.B. Halme) im Pflanzenbestand führen aufgrund von Absorptionsvorgängen zur Dämpfung der Rückstreuung vertikal polarisierter Wellen (ALLEN & ULABY 1984, LE TOAN ET AL. 1984, ULABY & WILSON 1985, SCHMULLIUS 1992, BRISCO & BROWN 1998), da das quasi parallel zur Längsachse der Halme schwingende elektromagnetische Feld gut an diese „ankoppeln“ kann. Dieser Effekt verhält sich invers zur

Wellenlänge (ULABY & WILSON 1985). Die Form und Ausrichtung eines Streuobjektes im Raum spielt dabei nur dann eine Rolle, sofern es in seinem Ausmaß in etwa der Dimension der Wellenlänge entspricht (BRISCO & BROWN 1998).

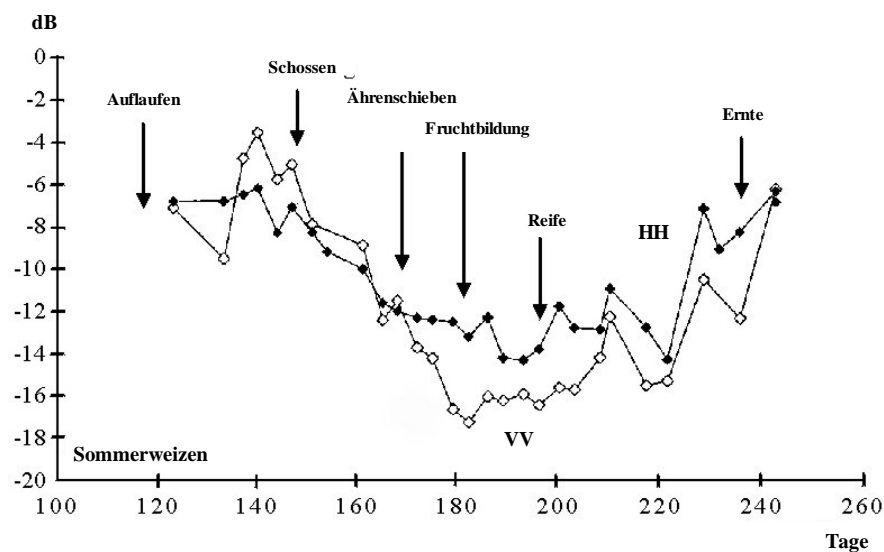
Zu Beginn der Vegetationsphase dominieren vegetationslose Bodenoberflächen, die hauptsächlich Oberflächenstreuung erzeugen (BARONTI ET AL. 1995, MC NAIRN ET AL. 2002a). Dies führt bei längeren Wellenlängen zu spiegelnder Reflexion und einem geringen Rückstreusignal. Für kürzere Wellenlängen erscheint der Boden zunehmend rauer und führt zu vermehrter Rückstreuung zum Sensor (WEIMANN 1996, LEWIS ET AL. 1998). Den gleichen Effekt erzeugt auch ein sich im Bestockten befindlicher Getreidebestand. Zudem zeigen die vertikalen Polarisierungen üblicherweise höhere Rückstreuwerte als die horizontalen Polarisierungen (BARONTI ET AL. 1993, DE MATTHAEIS ET AL. 1994). Hierbei gilt:  $\sigma_{VV}^0 > \sigma_{HH}^0$ .

Im weiteren Verlauf des Wachstums nimmt die Volumenstreuung innerhalb des Bestandes zu und wird zum dominierenden Streumechanismus. Die damit einhergehende Depolarisation der Mikrowellen an den zufällig orientierten Vegetationsbestandteilen führt grundsätzlich zu einer kontinuierlichen Erhöhung der Rückstreuintensität in der Kreuz-Polarisation (ULABY & ELACHI 1990, BARONTI ET AL. 1993). Des Weiteren gilt nun üblicherweise  $\sigma_{VV}^0 < \sigma_{HH}^0$ , was bedeutet, dass die horizontale Polarisation eine stärkere Rückstreuung als die vertikale Polarisation aufweist (BRISCO & BROWN 1998), da diese vermehrt Absorptionsprozessen an den vertikalen Strukturen des Bestandes unterliegt.

Für das X-Band ist überwiegend von direkter Streuung an der Blattoberfläche, aber auch von Volumenstreuung in der obersten Blattschicht auszugehen (BOUMAN & VAN KASTEREN 1990, BROWN ET AL. 1992, COOKMARTIN ET AL. 1998, MORRISON ET AL. 2000). Das L-Band dagegen durchdringt den Bestand bis zum Boden. Seine Rückstreuung wird daher verstärkt durch direkte Bodenrückstreuung sowie durch multiple Streuung zwischen Bestand und Boden bestimmt (BRISCO & BROWN 1998).

Im Hinblick auf die Rückstreuveränderung ko-polarer Kanäle unterschiedlicher Wellenlängen im weiteren Verlauf der Vegetationsentwicklung lassen sich in der Literatur kaum eindeutige Aussagen finden. Mehrjährige, von BOUMAN & VAN KASTEREN (1990) durchgeführte Radarsignaturanalysen für das vertikal und horizontal polarisierte X-Band über die Vegetationsperiode hinweg zeigten sehr große Schwankungen hinsichtlich der

Rückstreuung (Abb. 2-6). Entsprechende Untersuchungen für das langwellige L-Band führten teilweise zu widersprüchlichen Ergebnissen. BOUMAN & UENK (1992) fanden für das L-HH einen kontinuierlichen Anstieg der Rückstreuung von der Bestockung bis zum Beginn der Abreife von Winterweizen, wohingegen MACELLONI ET AL. (2001) in ihren experimentellen Messungen eine abnehmende Rückstreuung in allen Polarisationen des L-Bandes mit zunehmender Biomasse registrierten.



**Abb. 2-6:** Radarrückstreusignatur von Sommerweizen im X-Band im Verlauf der Vegetationsperiode (verändert nach BOUMAN & VAN KASTEREN 1990).

### 2.3 Störgrößen der Radarfernerkundung

Die Radaraufzeichnungen können durch verschiedene system- und witterungsbedingte Störgrößen beeinträchtigt werden. Die wichtigsten Störfaktoren hinsichtlich landwirtschaftlicher Fragestellungen werden im Folgenden erläutert.

#### 2.3.1 Systembedingte Störgrößen

Die dominierende radiometrische Störung, die in allen SAR-Aufnahmen auftritt, beruht auf der destruktiven *Interferenz* kohärenter Wellen. Sie wird als Speckle-Effekt bezeichnet und macht sich als körnige Bildstruktur bemerkbar. Die physikalischen Grundlagen der Entstehung und Ansätze zur Reduzierung des Speckle-Effektes werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

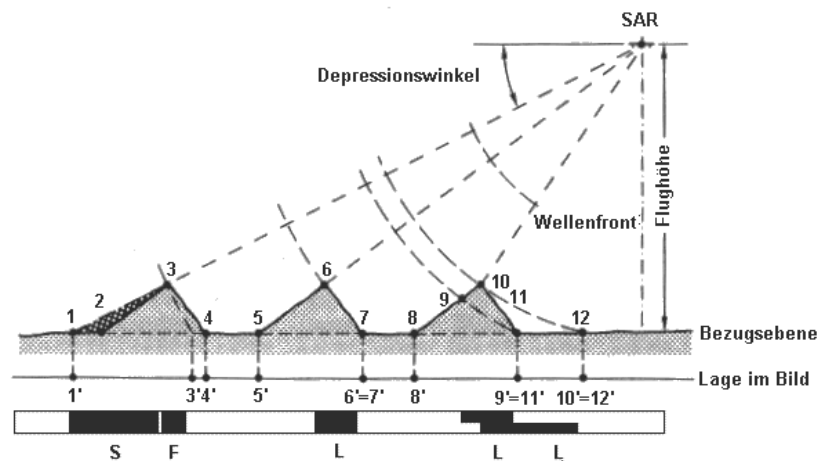
*Speckle*: Die Streuung einer kohärenten Welle an einem Objekt kann zu einer Phasenverschiebung führen. Wird die Welle von benachbarten Punktobjekten einer Aufnahmezelle (Pixel) phasenverschoben reflektiert, so können bei kohärenter Strahlung Interferenzen auftreten. Dadurch können sowohl Wellen mit doppelter Amplitude entstehen als auch solche, die sich gegenseitig auslöschen (HILDEBRANDT 1996). Die Variation der empfangenen Rückstreuintensität schlägt sich in kleinräumigen Helligkeitsunterschieden im Radarbild nieder. Insbesondere auf rauen, inhomogenen Flächen tritt der Speckle-Effekt verstärkt auf. Der Speckle-Effekt überlagert die gesamte reflektierte Objektinformation.

Im Rahmen der Prozessierung kann der Speckle-Effekt durch die *Multi-Look-Prozessierung* reduziert werden. Dabei werden aus den aufgezeichneten Daten  $N$  unabhängige Aufnahmen (*Looks*) derselben Untersuchungsfläche extrahiert und pixelweise gemittelt, um so eine Reduzierung der Signalvariation zu erreichen (BÄHR & VÖGTLE 1998). Die räumliche Auflösung verschlechtert sich dabei ebenfalls um den Faktor  $N$  (BOERNER ET AL. 1998). Die Reduzierung des Speckle-Effektes kann auch über die einfache Mittelung der benachbarten Auflösungszellen erfolgen. Hierbei müssen mindestens 200 Pixel einbezogen werden (VON PONCÉT ET AL. 1995).

Für die Speckle-Reduktion wurden in den letzten Jahren verschiedene Filtermethoden entwickelt, die bei einer Minderung des Speckle-Effektes gleichzeitig feine Strukturen, Punktstreuer und Kanten, sowie allmähliche Helligkeitsänderungen erhalten sollen (LEE ET AL. 1994). Diese adaptiven Verfahren verwenden zur Berechnung des neuen Pixelwertes durchweg statistische Parameter des Rückstreusignals innerhalb einer lokal operierenden Filtermatrix. Basierend auf einer Funktion, die durch die geschätzte Varianz gesteuert wird, ergibt sich ein optimaler Pixelgrauwert für das zentrale Bildelement der Matrix (BÄHR & VÖGTLE 1998). Die einzelnen Filteralgorithmen unterscheiden sich in der jeweiligen Umsetzung dieser Funktion.

Zusätzlich können in einem Radarbild verschiedene radiometrische Verzerrungen bzw. Störungen bestehen, die nicht korrigierbar sind. Die drei wesentlichen Effekte "*Foreshortening*", "*Layover*" und "*Radarschatten*" sind geometrische Verzerrungen im Radarbild, die durch das Geländere relief verursacht werden. Die Lageverzerrungen in einer Aufnahme, welche durch die einzelnen Effekte hervorgerufen werden, sind in Abbildung 2-7 veranschaulicht.

*Foreshortening*: Ein Geländehang, der dem Sensor zugewandt ist, wird im Radarbild verkürzt dargestellt. Dieses Phänomen beruht auf dem Aufnahmeprinzip, das die Entfernungen einzelner Informationen anhand der Laufzeitdifferenz des Radarimpulses ermittelt (Kap. 2.1). Die Laufzeitdifferenz zwischen Hangbasis und Hangspitze ist geringer, als es ihrer Entfernung in der Ebene entspricht. Der Effekt tritt nicht bei einem lokalen Einfallswinkel von  $90^\circ$  auf. Es gilt: Je steiler der Einfallswinkel, desto größer die Verzerrung im Radarbild. Bei einem lokalen Einfallswinkel von beispielsweise  $30^\circ$  beträgt der Foreshortening-Effekt 50 %, d.h. die Hanglänge wird um die Hälfte gekürzt (LEWIS ET AL. 1998). Foreshortening ist vor allem an Waldrändern und Berghängen zu beobachten, die im Radarbild sehr hell erscheinen.



**Abb. 2-7:** Bildverzerrungen aufgrund des Geländeereliefs. Die Punkte 1-12 werden als 1'-12' vom Sensor aufgezeichnet. S = Schatten, F = Foreshortening, L = Layover (verändert nach ALBERTZ 1991).

*Layover*: Unterschiedliche Entfernungen einzelner Informationen werden mittels der Laufzeitdifferenz des Radarimpulses ermittelt. Ist der Depressionswinkel (Abb. 2-4) größer als der lokale Hangneigungswinkel, so erreicht das Rückstreusignal der Hangspitze den Sensor früher als das Signal der Hangbasis. In diesem Fall werden beide Informationen überlagert und gehen dem Interpreten verloren. Der Layover-Effekt ist am ausgeprägtesten bei steilen, zum Sensor hin exponierten Hängen und hohen Depressionswinkeln. Der Effekt nimmt bei gleicher Hangneigung und Lage zum Sensor von *near-range* zu *far-range* ab (LEWIS ET AL. 1998). Der Layover-Effekt ist ein Extremfall des Foreshortenings.

*Radarschatten*: Der Radarschatten ist ebenfalls eine Funktion von Depressionswinkel und Hangneigung des vom Sensor weggerichteten Hanges. Radarschatten entstehen, wenn der

Hangneigungswinkel größer als der Depressionswinkel ist. Die Hangneigung ist in diesem Fall so steil, dass der Hang nicht vom Radarstrahl beleuchtet wird. Der Schatten wird mit zunehmender Entfernung, zunehmendem Einfallswinkel und zunehmender Objekthöhe breiter. Er ist im Radarbild durch deutlich dunklere Bereich z.B. hinter Wäldern zu erkennen.

*Cardinal-Effekt:* Eine weitere nicht korrigierbare Störung kann durch die relative Lage der Objekte zur Sensorblickrichtung hervorgerufen werden. Liegen lineare Objektstrukturen (bestehend aus einzelnen „Streuern“) parallel zur Wellenfront (orthogonal zur Sensorblickrichtung), dann befinden sich die Reflexionen der Einzelstreuer in hoch korrelierter Phase. Dies führt zu einer überhöhten Rückstreuung dieser Strukturen (LEWIS ET AL. 1998). Insbesondere im Siedlungsbereich tritt dieses Phänomen auf, aber auch innerhalb landwirtschaftlicher Kulturbestände zeigen die linearen Strukturen diesen Effekt.

### 2.3.2 Witterungsbedingte Störgrößen

Zu den temporären witterungsbedingten Störgrößen zählen Niederschlag, Tau und Windeffekte. Witterungseffekte können messbaren Einfluss auf die Radarrückstreuung haben (HOBBS ET AL. 1998). Die niederschlags- und taubedingte Blattbenetzung unterscheidet sich hinsichtlich ihrer Tropfengröße und Tau bildet zudem einen kontinuierlicheren Wasserfilm.

Nach ALLEN & ULABY (1984) führt Regenwasser auf der Pflanzendecke zu einer 2-3 dB höheren Rückstreuung im X-Band. Diesen Anstieg dokumentieren auch SOFKO ET AL. (1989) und HEROLD ET AL. (2001) in ihren Ergebnissen für verschiedene Wellenlängen und Polarisationen. Der Effekt von Tau auf die Radarrückstreuung wurde von GILLESPIE ET AL. (1990) und DAMPNEY ET AL. (2001) intensiv erforscht. Diesen Untersuchungen zufolge führt Taubildung im Allgemeinen zu einer Erhöhung der Rückstreuintensität (3 – 4 dB), wobei der Einfluss in Abhängigkeit von verschiedenen Aufnahmeparametern variieren kann.

Wind beeinflusst die geometrische Struktur der Vegetation. Dies kann eine kurzzeitige Bewegung von Einzelpflanzen, aber auch eine nachhaltige Neuordnung der Struktur des Bestandes (z.B. Lagerschäden) sein. Generell führen windinduzierte Bewegungen zu einer höheren Variation des Rückstreusignals (BRISO ET AL. 1993).



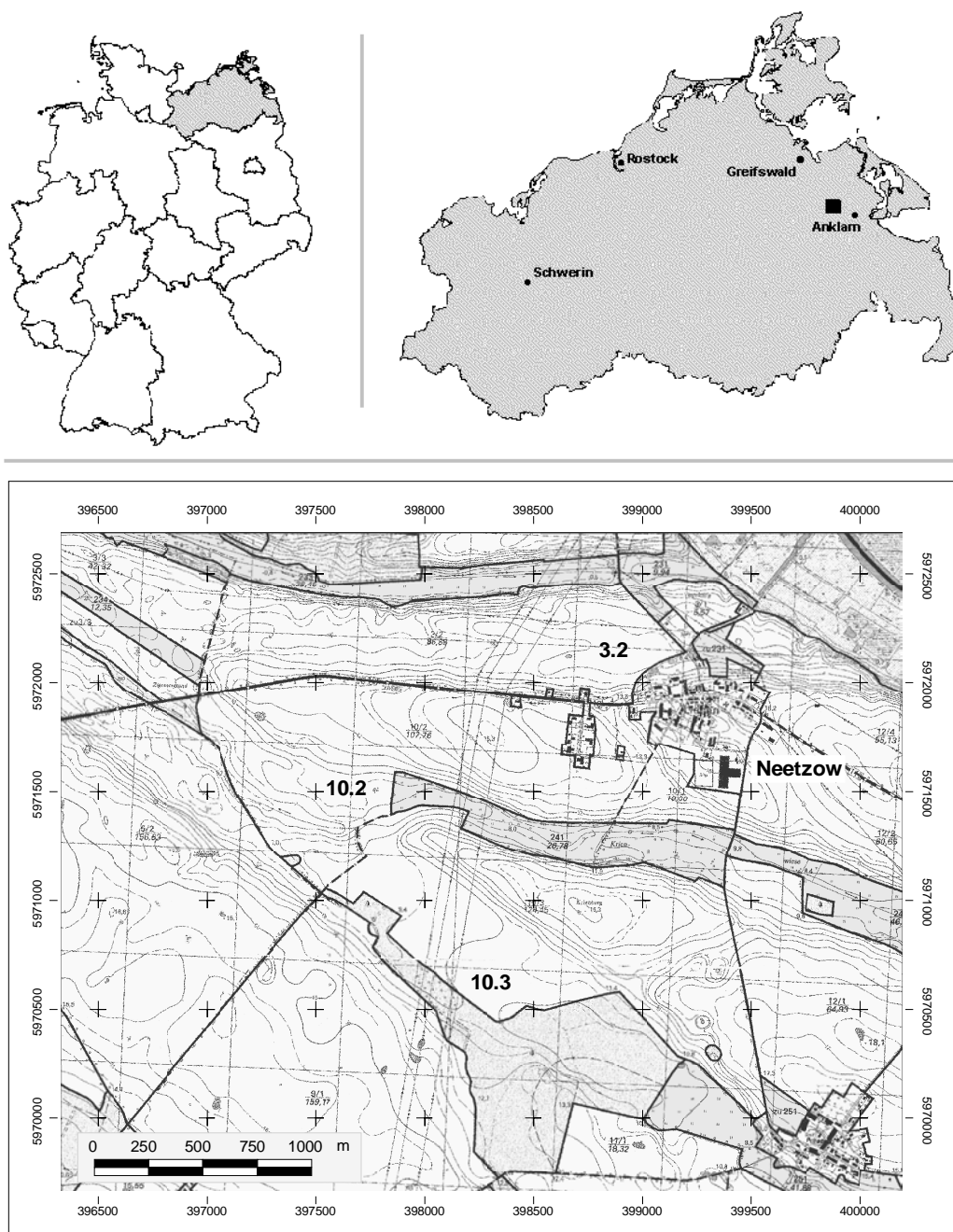
### 3 Material und Methoden

Die Arbeit entstand im Rahmen des Projektes Pro Smart II (*Smart = Systematic Market and Development Approach for Remote Sensing Technologies*), welches von der Infoterra GmbH, Friedrichshafen, und verschiedenen Projektpartnern durchgeführt wurde (PROSMART 2002). Ziel des Projektes war die Entwicklung und der Transfer von wissenschaftlichen Ergebnissen im Bereich der Radarfernerkundung in operationelle Anwendungsprodukte für verschiedene Landnutzungsbereiche, u.a. die Landwirtschaft. Das Projekt war als Entwicklungsstudie für den für 2005 geplanten Radarsatelliten TerraSAR (ASTRIUM 2003) konzipiert. Die für das Projekt verwendeten Radardaten entsprachen den geplanten Spezifikationen des zukünftigen Satelliten.

Für die Untersuchungen wurde als Fruchtart Winterweizen gewählt, da dieser mit einer Anbaufläche von fast 3 Mio. ha (im Jahr 2000) die mit Abstand dominierende Getreideart in Deutschland ist (BSA 2001). Aufgrund der Sensitivität der Radarstrahlung bezüglich struktureller Parameter wurde besonderes Augenmerk auf die Erfassung der schlaginternen Variabilität der Bestandesdichte gelegt. Sie ist zum einen ein physiologischer 'Schlüssel'-Parameter für die optimale Bestandesführung von Winterweizen (KÜBLER 1994, ZIMMERMANN 1998, HGCA 1998), und zum anderen kann eine hohe Bestandesdichte Pilzbefall begünstigen (ZIMMERMANN 1998). Die in der Arbeit beschriebenen Untersuchungen wurden parallel an Radarbilddaten und Farb-Infrarot-Luftbildern durchgeführt, um den Informationsgehalt beider Aufnahmesysteme hinsichtlich der Bestandesmerkmale zu vergleichen.

#### 3.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Die Untersuchungen wurden auf drei Testflächen der "Neetzower Agrarhof Peenetal GmbH" durchgeführt. Sie befinden sich in Mecklenburg-Vorpommern, ca. 20 km westlich von Anklam (13,5° E; 53,9° N). Das Untersuchungsgebiet liegt innerhalb eines ca. 5 km breiten Streifens in den flachwelligen Grundmoränenplatten Vorpommerns, entlang des südlichen Randbereichs der Peeneniederung in der Nähe des Dorfes Neetzow (Abb. 3-1).



**Abb. 3-1:** Lage des Untersuchungsgebietes bei Neetzow mit den Testflächen 3.2, 10.2 und 10.3 (Grundlagenkarte Landwirtschaft 1:10000, LPG Pflanzenproduktion Neetzow Blatt 2 und 3, UTM, WGS 84).

*Relief:* Das landschaftliche Relief, sowie die Oberflächensedimente sind überwiegend das Ergebnis der weichseleiszeitlichen Periode des Spätglazials (JANKE 1991). Die geringe Inlandeisdynamik in diesem Jungmoränenbereich resultierte in geringen Höhenunterschieden und hinterließ ein relativ ebenes, wenig geformtes Geländere Relief mit charakteristischen Toteislöchern (Sölle).

*Boden:* Auf überwiegend sandig-lehmigem Ausgangsmaterial (Geschiebemergel) entwickelten sich relativ fruchtbare Staugleye und Parabraunerden. Diesen Bodentypen werden in der Reichsbodenschätzung (KUNTZE ET AL. 1994) hauptsächlich die Bodenarten *stark lehmiger Sand (SL)* und *lehmiger Sand (LS)* zugeordnet (Abb. 3-3). Die Böden sind heute durch intensive landwirtschaftliche Nutzung (Beackerung, Tiefenumbruch) stark anthropogen überprägt.

*Klima:* Das Untersuchungsgebiet liegt im Einfluss der Ostsee und weist eine langjährige Jahresmitteltemperatur von ca. 8°C auf. Es zeichnet sich durch relative Niederschlagsarmut mit einer durchschnittlichen Jahresniederschlagsmenge zwischen 500 und 600 mm aus (METEOROLOGISCHER DIENST 1987). Die Wasserdampfgehalte der Luft sind durchgängig sehr hoch und können insbesondere in den Morgenstunden verstärkt zu Nebel- und Taubildungen führen.

### 3.1.1 Kartengrundlage

Im Rahmen der Arbeit wurden die Daten der Reichsbodenschätzung (Abb. 3-3) und die digitalen Datensätze des Amtlich - Topografisch - Kartografischen Informationssystems - ATKIS (LGN 2002) verwendet.

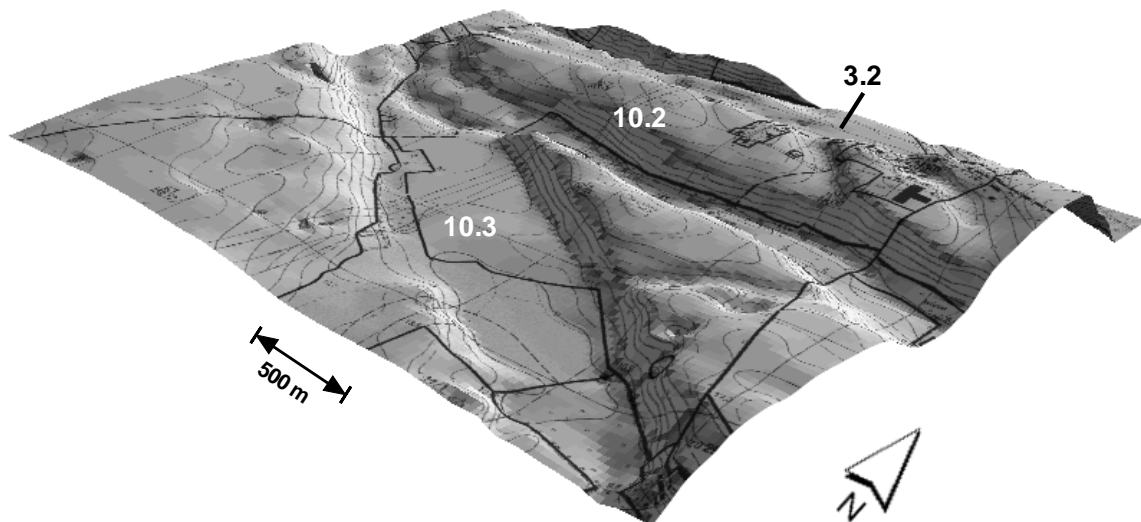
### 3.1.2 Digitales Geländemodell

Zur Orthokorrektur der Luftbilder und zur Ableitung kleinräumiger topografischer Variationen innerhalb der Felder wurde ein hochauflösendes digitales Geländemodell (DGM) benötigt. Da digitale Geländemodelle in geforderter horizontaler Auflösung (bis zu 5 m) nicht vorhanden waren, wurde ein DGM für das Untersuchungsgebiet erstellt (Abb. 3-2).

Hierfür wurden die Höhenlinien (Isolinien) der Topographischen Karte 1:10000 digitalisiert. Diese Datenquelle lieferte Höhenlinien im Abstand von 1 m und in flacheren Regionen von 0,5 m. In den Karten vorhandene Höhenpunkte wurden integriert. Die Transformation des Linienmodells in ein flächenhaftes DGM erfolgte mit der GIS-Software ArcView<sup>®</sup>. Die entsprechende Funktionalität wird durch die beiden Zusatzmodule "3D Analyst" und "Spatial Analyst" bereitgestellt (ESRI 1999).

Jeder Stützpunkt der Isolinien des Linienmodells war ein Messpunkt mit Höhenangabe. Der Messpunktabstand betrug zwischen 10 – 15 m. Aus den Messpunkten wurde über eine

Dreiecksvermaschung ein „triangulated irregular network“ (TIN) berechnet. Hierbei wurden die benachbarten Punkte so mit Linien verbunden, dass aneinandergrenzende, nichtüberlappende Dreiecke entstanden. Die Höhen wurden entlang der Verbindungslinien interpoliert. Dieses engmaschige Gebilde wurde danach in ein Raster (Grid) transformiert. Insbesondere in schwach reliefierten Regionen kann es bei der Grid-Erstellung zur Ausbildung von Artefakten kommen, die eine ebene Fläche ohne jegliche Neigung vortäuschen. Um diesem Problem vorzubeugen, wurden an kritischen Stellen, wie Kamm- und Tallinien oder flachen Ebenen mit geringer Punktdichte, zusätzliche Stützlinien eingefügt (BARTELME 2000, BURROUGH ET AL. 1998). Die Höhe der notwendigen Stützlinien wurde interaktiv bestimmt, um ein kontinuierliches Gefälle im Gelände sicherzustellen.



**Abb. 3-2:** Digitales Geländemodell des Untersuchungsgebietes bei Neetzow (Darstellung ist 15 fach überhöht).

Die Plausibilität der Höheninformation des DGM's wurde mit einem daraus abgeleiteten Beleuchtungsmodell durchgeführt, welches sehr sensibel auf Fehler des Geländemodells reagiert (RADELOFF ET AL. 1997). Aufgrund der guten Datengrundlage war es möglich, die Pixeldimension des GRID's auf 5x5 m festzulegen (GOODENOUGH 1990).

### 3.2 Beschreibung der Testflächen

In den Untersuchungszeiträumen 2001 und 2002 wurden jeweils zwei Winterweizenschläge (*Triticum aestivum* L.) untersucht. Die Flächengrößen und die ackerbaulich relevanten Parameter sind in Tabelle 3-1 zusammengestellt.

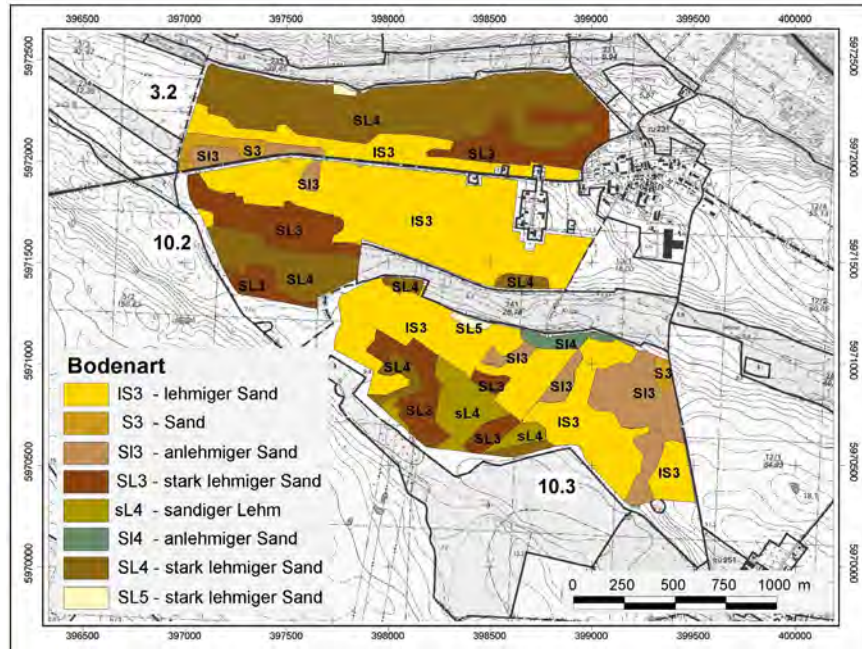
**Tab. 3-1:** Bodenkundliche und pflanzenbauliche Kennwerte der Testflächen in Neetzow.

	<b>10.2</b>	<b>10.3</b>	<b>3.2</b>
	2001	2001	2002
<b>Fläche [ha]</b>	109	128	88
<b>Bodenart</b>	S13 – sL4 lehm. Sand – sand. Lehm	S3 – sL4 Sand – sand. Lehm	S3 – sL4 Sand – sand. Lehm
<b>Ackerzahl (AZ)</b>	38 - 56	30 - 56	30 - 56
<b>Mittlere AZ</b>	49	47	47
<b>Humusgehalt [%]</b>	1,5	1,5	1,5
<b>Tongehalt [%]</b>	11	11	11
<b>pH-Wert</b>	6,3	6,3	6,3
<b>P [mg kg<sup>-1</sup>]</b>	44	48	48
<b>K [mg kg<sup>-1</sup>]</b>	149	83	83
<b>Mg [mg kg<sup>-1</sup>]</b>	60	48	48
<b>Produktionstechnik</b>	pfluglos	pfluglos	pfluglos
<b>Frucht</b>	Winterweizen	Winterweizen	Winterweizen
<b>Sorte</b>	Bussard	Bussard	Ritmo
<b>Aussaattermin</b>	10.09.2000	14.09.2000	17.10.2001
<b>Aussaatstärke [Samen m<sup>-2</sup>]</b>	225	221	392
<b>Reihenabstand [cm]</b>	15	15	15
<b>Vorfrucht</b>	Winterraps	Winterraps	Winterweizen
<b>Zuckerrübe / Erbse</b>			
<b>1. N Düngung</b>			
Termin	02.–05.04.2001	02.–04.04.2001	12.03.2002
BBCH-Stadium*	29	29	24
Menge N [kg ha <sup>-1</sup> ]	93	89	55
<b>2. N-Düngung</b>			
Termin	11.-14.05.2001	11.05.2001	25.04.2002
BBCH-Stadium*	34	34	30
Menge N [kg ha <sup>-1</sup> ]	77	81	67
<b>3. N-Düngung</b>			
Termin	30.05.2001	30.05.2001	31.05.2002
BBCH-Stadium*	59	59	55
Menge N [kg ha <sup>-1</sup> ]	40	35	39
<b>Gesamtmenge N [kg ha<sup>-1</sup>]</b>	234	233	198
<b>Ernte</b>	17.08.2001	20.08.2001	18.08.2002
<b>21.08.2002</b>			

Die Gesamtmenge an aufgebrachtem Stickstoff ist höher als die dargestellten drei Applikationsraten, da in den Zwischenräumen geringe Mengen N zusätzlich gedüngt wurden (Angaben des Betriebsleiters);

\*nach Meier (2001)

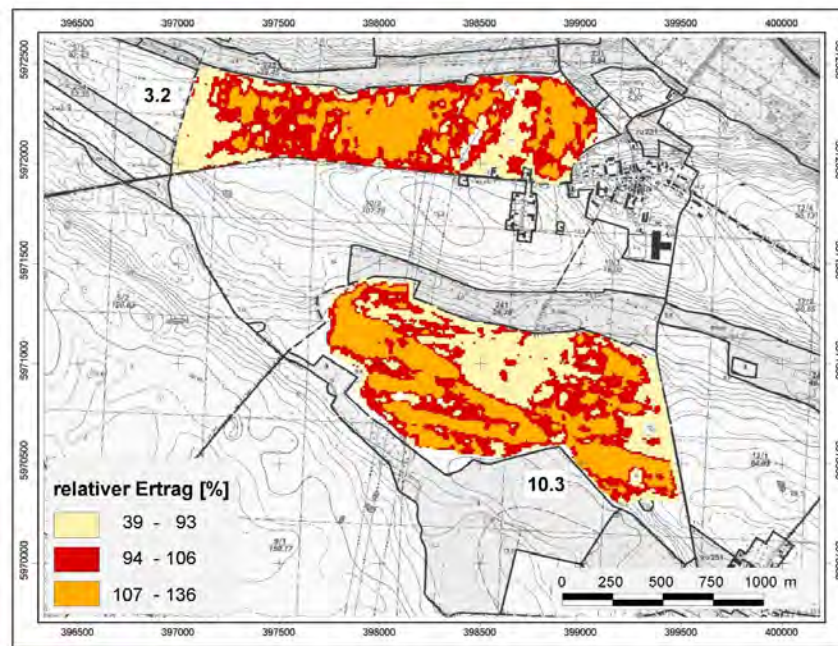
Die Lage der Testflächen (3.2, 10.2 und 10.3) ist aus Abbildung 3-1 zu entnehmen. Im Jahr 2001 wurden die beiden südlichen Testflächen 10.2 und 10.3, und im Jahr 2002 die nördliche und die südliche Testfläche (3.2 und 10.3) untersucht.



**Abb. 3-3:** Ergebnis der Reichsbodenschätzung für die Testflächen in Neetzow (WGS 84-UTM Zone 33).

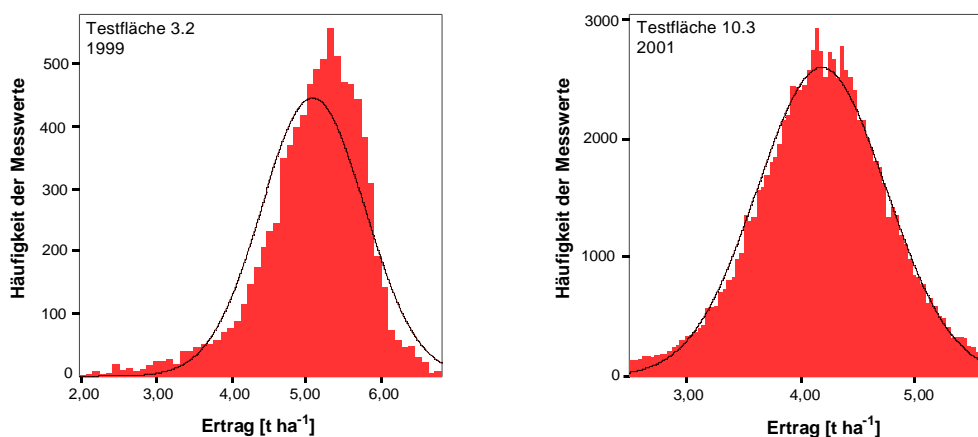
Alle drei Testflächen weisen ein relativ homogenes Relief mit Höhenunterschieden von maximal 10 m auf (Abb. 3-2). Nur bei 10.3 ist eine Gliederung in Kuppe, Hangbereich und Senke möglich. Die Reichsbodenschätzung gibt Hinweise auf vorhandene Bodenheterogenitäten (Abb. 3-3). Auf allen drei Testflächen dominieren sandige Böden mit unterschiedlich hohen Lehmanteilen. 10.3 zeigt das heterogenste Substratspektrum aller Testflächen und weist im Bereich der südwestlichen Senke auch sandige Lehme auf. Die durchschnittliche Bodenzahl nach dem Ackerschätzungsrahmen liegt zwischen 40 und 55 (KUNTZE ET AL. 1994).

Kleinräumig variable Produktionspotenziale lassen sich mit Ertragskartierungen erfassen. Die mit online Ertragsmonitoren gemessenen Roh-Ertragsdaten weisen allerdings verschiedene Fehler auf, die vor der Auswertung korrigiert werden müssen (PANTEN ET AL. 2002). Die vorliegenden Ertragsdaten für Winterweizen der Testflächen 10.3 und 3.2 aus den Jahren 2001 bzw. 1999 wurden analog der Ausführungen von HANEKLAUS ET AL. (2000) aufbereitet und nachfolgend je Testfläche anhand ihrer statistischen Merkmale in drei relative Klassen eingeteilt. Die relativen Ertragskarten sind in Abbildung 3-4 dargestellt.



**Abb. 3-4:** Relative Ertragskarten von Winterweizen der Testflächen 10.3 (2001; 100 % = 4,2 t ha<sup>-1</sup>) und 3.2 (1999, 100 % = 5,1 t ha<sup>-1</sup>) in Neetzow. Die Erträge sind aufgrund möglicher Kalibrierungsungenauigkeiten des Ertragserfassungssensors nicht als Absolutwerte zu verstehen (WGS 84, UTM Zone 33).

Dabei wurde die mittlere Klasse (94 % - 106 %) aus dem Mittelwert  $\pm 0,5$  Standardabweichung gebildet. Dieser Wertebereich deckte 36 % (10.3) bzw. 42 % (3.2) der normalverteilten Ertragsdaten der Jahre 2001 und 1999 ab (Abb. 3-5). Die beiden anderen Klassen resultierten aus den jeweiligen Werten, die eine höhere Standardabweichung vom Mittelwert aufwiesen.



**Abb. 3-5:** Häufigkeitsverteilung der fehlerbereinigten Ertragsdaten von Winterweizen auf den Testflächen 3.2 (1999) und 10.3 (2001) in Neetzow. Die Erträge sind aufgrund möglicher Kalibrierungsungenauigkeiten des Ertragserfassungssensors nicht als Absolutwerte zu verstehen.

### 3.3 Ground-Truth Erhebung

Die Analyse der Beziehungen zwischen Fernerkundungsdaten und Bestandesmerkmalen erfordert die Nutzung entsprechender Referenzdaten (Ground-Truth), die in situ zu erheben sind. Die Probenahme sollte effizient, methodisch auf die beabsichtigte Analyse abgestimmt sein und in einem angemessenen zeitlichen Rahmen erfolgen. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung des Projektes wurde eine Beprobungsstrategie entwickelt, die eine möglichst gute Abdeckung der natürlichen Variabilität der Standorte gewährleistete. Die Stichprobenzahl wurde so gewählt, dass die gesamte Probenahme zeitnah der Radaraufnahme realisiert werden konnte, und die Datenerfassung erfolgte als exakte, räumlich verortete Messung.

Im Vorfeld der Ground-Truth Kampagne war es notwendig einen Eindruck über die natürliche Heterogenität der Testflächen zu bekommen. Der Schwerpunkt lag aufgrund der thematischen Fragestellung in der Lokalisierung naturbedingter Bodenheterogenitäten innerhalb der Schläge, die zu unterschiedlicher Ausprägung der Vegetation führen können. Als wesentlicher Faktor für eine unterschiedliche Standortfruchtbarkeit gilt die Ausprägung des Geländereiefs (SCHRÖDER 1999).

#### 3.3.1 Probenahmestrategie

2001: Für die Kampagne 2001 wurde eine geschichtete Stichprobenahme (BAHRENBERG ET AL. 1999) durchgeführt, die auf Klassen unterschiedlicher potentieller Bodenwassergehalte basiert. Der potentielle Bodenwassergehalt wurde mit dem Wetness-Index-Modell (MOORE ET AL. 1993) bestimmt (Gleichung 3-1).

$$[3-1] \quad \omega = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \beta}\right)$$

$\omega$ : Wetness-Index

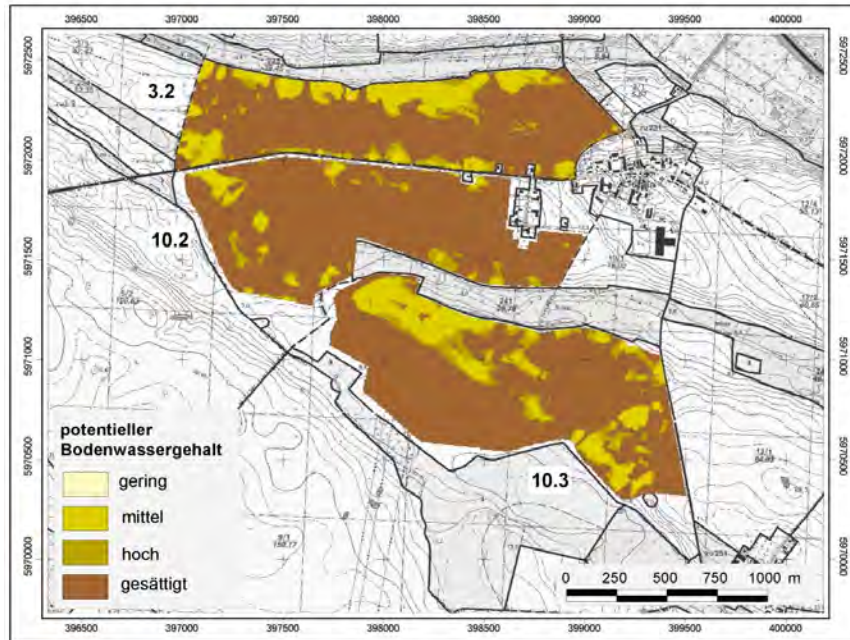
$A_s$ : punktspezifisches Einzugsgebiet [m<sup>2</sup>]

$\beta$ : Hangneigungswinkel [°]

Dieser Ansatz beruht lediglich auf topografischen Parametern und lässt die Bodeneigenschaften unberücksichtigt. Mit der Software SINMAP<sup>®</sup> (PACK ET AL. 1998) konnte die räumliche Verteilung der potentiellen Wassergehaltsklassen auf Grundlage des DGM (Kap. 3.1.2) berechnet werden (Abb. 3-6). Basierend auf der prozentualen Klassenverteilung

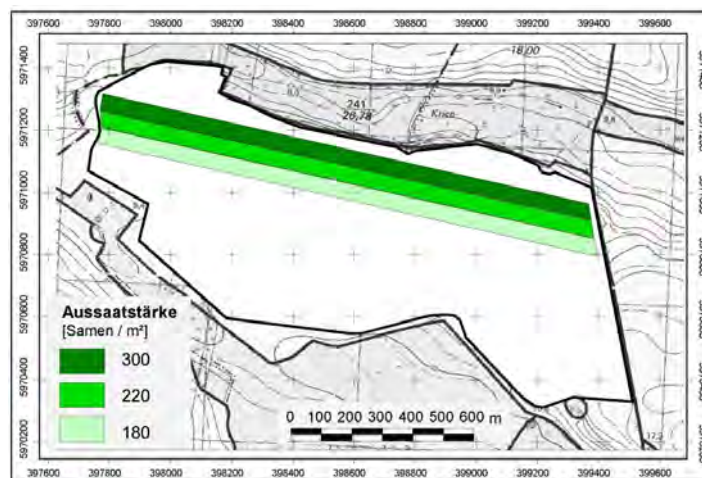


wurden die Probenahmestellen in der Fläche verteilt und ggf. im Feld modifiziert, um den Gegebenheiten vor Ort Rechnung zu tragen. Die Anzahl der an den einzelnen Aufnahmetermenin erhobenen Stichproben ist aus Tabelle 3-2 zu entnehmen. In beiden Kampagnen wurden unterschiedliche Punkte beprobt.



**Abb. 3-6:** Wetness-Index (MOORE ET AL. 1993) der Testflächen in Neetzow dargestellt in relativen Klassen potentiellen Bodenwassergehaltes nach SINMAP® (PACK ET AL. 1998) (WGS 84, UTM Zone 33).

Auf 10.3 wurde vom Landwirt ein Streifenversuch mit drei unterschiedlichen Aussaatstärken angelegt, um verschiedene Bestandesdichten zu erhalten (Abb. 3-7). Diese Streifen wurden bei der Probenahme mit einbezogen und zusätzlich je zweimal beprobt.



**Abb. 3-7:** Lage des Streifenversuchs (2001) mit unterschiedlichen Aussaatstärken auf der Testfläche 10.3 in Neetzow (WGS 84, UTM Zone 33).

2002: Für die Kampagne 2002 wurden zwei verschiedene Ansätze zur Probenahme auf beiden Testflächen gewählt. Auf 10.3 wurden die Stichproben entlang eines Transektes erhoben und auf 3.2 eine Rasterstichprobe durchgeführt. Der Abstand der Probepunkte wurde auf 50 m festgelegt, welcher der Literatur nach ausreichend für die Erfassung von Bodenvariabilitäten ist (HANEKLAUS ET AL. 1997).

Da Bestandesheterogenitäten üblicherweise einen hohen Zusammenhang mit dem Relief und den dadurch bedingten Standortunterschieden aufweisen (SCHRÖDER 1999), gewährleistet die Orientierung der Stichprobenahme an topografischen Ausprägungen die Abdeckung der vorhandenen Variabilität. Die Positionierung des Transektes und des Rasters erfolgte unter Integration der Hangneigung und der relativen Ertragsdaten (Abb. 3-4) des Jahres 2001 (10.3) bzw. 1999 (3.2). Die Hangneigungsinformation wurde aus dem DGM (Abb. 3-2) abgeleitet und entsprechend der *Bodenkundlichen Kartieranleitung* (AG BODEN 1994) in vier Klassen eingeteilt. Beide Informationsebenen wurden anschließend im GIS miteinander verschnitten, so dass 12 Klassenkombinationen entstanden. Das Transekt und das Raster wurden so positioniert, dass alle signifikant auftretenden Klassenkombinationen (> 2 % Flächenanteil) durch mindestens eine Stichprobe repräsentiert wurden.

Alle Probepunkte wurden im Feld mit einem differentiellen globalen Positionierungssystem<sup>15</sup> (DGPS) *Trimble Geoexplorer 3*<sup>®</sup> mit einer durchschnittlichen relativen Lagegenauigkeit von  $\pm 2,5$  m eingemessen (TRIMBLE 2000). Die Lage der Probepunkte wurde mit einer Ausnahme an allen drei Terminen beibehalten. Lediglich die Probenahme auf der Testfläche 3.2 im April 2002 wurde an abweichenden Punkten durchgeführt. Die Anzahl der erhobenen Stichproben ist aus Tabelle 3-2 zu entnehmen. Eine Stichprobe von Testfläche 3.2 war sowohl im Mai 2002, als auch im Juni 2002 durch Layover-Effekte im Radarbild (Kap. 2.3.1) gestört und wurde daher in der statistischen Analyse nicht berücksichtigt.

---

<sup>15</sup> Das GPS-Signal unterliegt einer geografischen Lageungenauigkeit, welche bei dem DGPS durch ein Korrektursignal kompensiert wird (ISENSEE & GRIEPENTROG 1998).

**Tab. 3-2:** Anzahl der Stichproben auf den Testflächen in Neetzow an verschiedenen Aufnahmetermen.

Testfläche	08. Mai 2001	09. Juni 2001	07. April 2002	08. Mai 2002	05. Juni 2002
3.2	n.e.	n.e.	12	18	18
10.3	18	19	26	26	25
10.2	14	14	n.e.	n.e.	n.e.

n.e. = Daten nicht erhoben

Am Aufnahmeterrin 07. April 2002 lag für 3.2 noch keine aufbereitete Ertragskarte vor, so dass abweichend nur die Hangneigung als Verortungskriterium der Probepunkte herangezogen wurde. Auf 10.3 wurden neben dem Transekt noch 5-6 weitere Stichproben genommen, die in ihrer geografischen Lage rein zufällig gewählt wurden.

### 3.3.2 Boden- und Vegetationsparameter

Im Rahmen der Ground-Truth-Kampagnen wurden verschiedene radarrelevante Pflanzen- und Bodenparameter in Anlehnung an CIHLAR ET AL. (1987) erhoben. Im Hinblick auf die spätere Auswertung erfolgte die Beprobung stets punktbezogen und nicht über eine größere Fläche verteilt.

*Vegetationshöhe:* Die absolute maximale Vegetationshöhe wurde an zehn Pflanzen gemessen und gemittelt, um einen repräsentativen Wert für die Teilfläche zu erhalten.

*Frische und trockene Biomasse:* Zur Erfassung der frischen ( $FM_V$ ) und trockenen Biomasse ( $TM_V$ ) wurden Weizenpflanzen auf einem  $\frac{1}{4}$  m<sup>2</sup> unmittelbar über dem Boden abgeschnitten und vor Ort gewogen. Die Proben dienten zur Bestimmung der frischen Biomasse und nach Trocknung bis zur Gewichtskonstanz (bei 85 °C) zur Ermittlung der trockenen Biomasse. Die Werte in dieser Arbeit beziehen sich stets auf einen Quadratmeter.

*Pflanzenwassergehalt:* Der Pflanzenwassergehalt (WG) wurde als Differenz von frischer und trockener Biomasse in [g m<sup>-2</sup>] ermittelt und als [%] der frischen Biomasse angegeben.

*Bestandesdichte:* Die Bestandesdichte wurde durch Zählen der auf einem  $\frac{1}{4}$  m<sup>2</sup> abgeschnittenen Halme ermittelt und auf einen Quadratmeter bezogen. Zum Entwicklungsstadium der Bestockung (im April 2002) waren die Halme nicht differenziert genug ausgebildet, so dass für die Bestandesdichte die Pflanzen von einem  $\frac{1}{4}$  m verwendet wurden.

*Bedeckungsgrad:* Das konventionelle Abschätzen des Bedeckungsgrades mit Hilfe eines Schätzrahmens unterliegt einer hohen Ungenauigkeit und der Subjektivität des Schätzers. Problematisch ist bei dieser Vorgehensweise die fehlende Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Der Bedeckungsgrad wurde mittels senkrecht aufgenommener Fotografien und anschließender Bildverarbeitung ermittelt. Im digital vorliegenden Bild konnte anhand der unterschiedlichen spektralen Eigenschaften von Boden und Pflanzen zunächst eine Trennung (ISODATA Klassifikator) und anschließend eine Berechnung des Boden- und Pflanzenanteils durchgeführt werden.

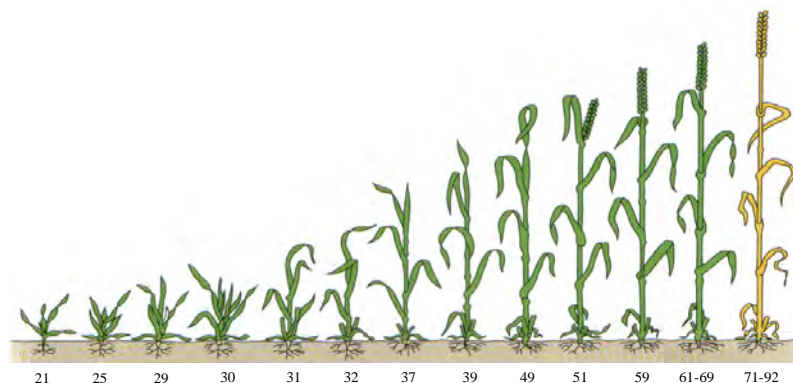
Die Trennung von Vegetation und Boden konnte aufgrund der vielfältigen Schattierungen nicht automatisch in zwei Klassen realisiert werden. Es wurden deshalb zwischen 10 und 15 Klassen gebildet, die manuell und per visueller Analyse der Klasse „Vegetation“ oder der Klasse „Boden“ zugeordnet wurden. Teilweise wurde der unüberwachten Klassifikation ein normalisierter Vegetationsindex in der Form:

$$[3-2] \quad VI = \frac{\rho_{grün} - \rho_{rot}}{\rho_{grün} + \rho_{rot}}$$

$\rho_{rot/grün}$  : Reflexionsintensität im roten bzw. grünen Spektralbereich

vorgeschaltet, um die folgende Klasseneinteilung zu vereinfachen.

*Phänologischer Zustand:* Das Entwicklungsstadium der Bestände wurde unter Verwendung des BBCH-Dezimal-Codes (MEIER 2001) bestimmt (Abb. 3-8). Die Kurzbezeichnung **BBCH** leitet sich ab von **B**iologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, **B**undessortenamt und **C**hemische Industrie.



**Abb. 3-8:** Entwicklungsstadien des Getreides nach BBCH-Dezimal-Code (BASF 1997).

*Reihenrichtung und Reihenabstand:* Der Reihenabstand wurde vor Ort gemessen. Die Reihenrichtung wurde aus den Radarbildern ermittelt und als Abweichung zur Radarblickrichtung angegeben in Grad (Tab. 3-3). Die Testflächen deckten eine nahezu senkrechte und auch eine parallele Aufnahmesituationen ab.

**Tab. 3-3:** Anbaurichtung auf den Testflächen in Neetzow in Bezug auf die Radarblickrichtung (2001/2002).

Testfläche	Jahr	Anbaurichtung [°]
10.2	2001	88
10.3	2001	81
10.3	2002	83
3.2	2002	6

*Bodenfeuchte:* Die Bestimmung der Bodenfeuchte wurde entsprechend der DIN 19683 durchgeführt. Zur Bestimmung der Feuchte der oberen 5 cm des Bodens wurden Proben mit Stechzylindern (100 cm<sup>3</sup>) genommen, vor Ort gewogen und zur Bestimmung des Wassergehaltes bei 105 °C getrocknet. Die Bodenfeuchte ist in Gew.-% angegeben.

*Lagerungsdichte:* Die Lagerungsdichte wurde aus dem Trockengewicht der Bodenprobe, dividiert durch ihr Volumen berechnet und in g m<sup>-3</sup> angegeben.

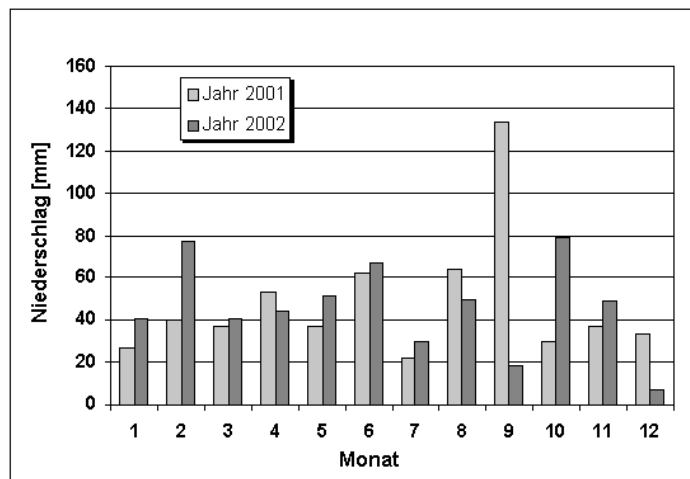
### 3.3.3 Witterung zu den Kampagnenterminen

In diesem Kapitel sind die Witterungsbedingungen zu den jeweiligen Kampagnen kurz zusammengefasst. Sämtliche Information wurden dem Agrarmeteorologischen Wetterbericht des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der lokalen Wetterstation des landwirtschaftlichen Betriebes in Neetzow entnommen. Im Hinblick auf die Interpretation der Radardaten spielen insbesondere die Bodenfeuchte, die Blattbenässung durch Tau oder Niederschlag und der Wind eine Rolle, da das Radarsignal durch diese Effekte beeinflusst werden kann (HOBBS ET AL. 1998). In Abbildung 3-9 sind die monatlichen Niederschlagsmengen in Neetzow dargestellt.

*08. Mai 2001:* Im Vorfeld und am Tag der Kampagne herrschte durchweg trockenes sonniges Wetter. In der Vorwoche fielen 6 mm Niederschlag. Dies führte zur Abtrocknung des Oberbodens, der relativ geringe Wassergehalte aufwies.

*09. Juni 2001:* Aufgrund der geringen Niederschläge im Vormonat (Abb. 3-9) wiesen die Böden im Untersuchungsgebiet Wassergehalte von weniger als 40 % der nutzbaren

Feldkapazität (nFk) auf. Zum Zeitpunkt der Kampagne herrschte, mit einer Tagesdurchschnittstemperatur von 12,3 °C, zu kaltes Wetter für die Jahreszeit und es war bedeckt. Am Nachmittag begann es zu regnen, wodurch einige Proben von 10.3 als Referenz kritisch zu betrachten sind.



**Abb. 3-9:** Monatliche Niederschlagsmengen in den Jahren 2001 und 2002 am Standort Neetzow.

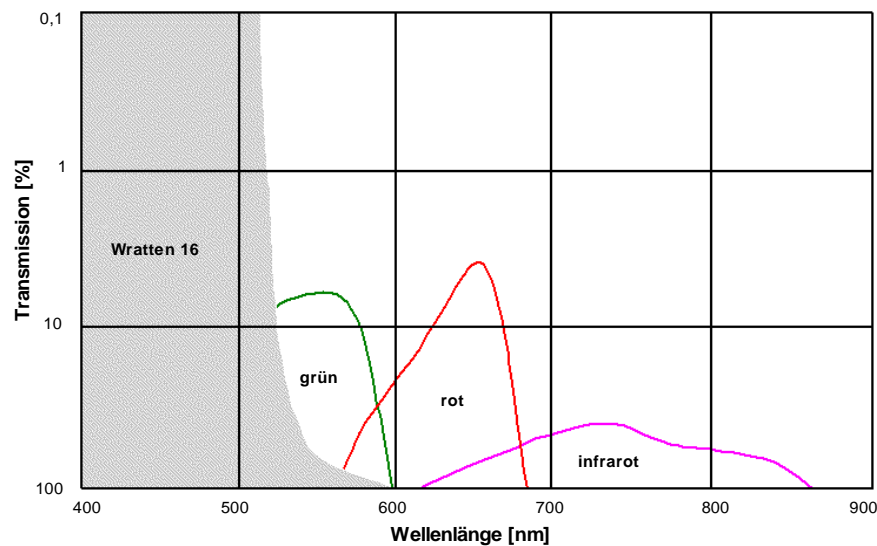
*07. April 2002:* Das Ende des Vormonats und der Anfang des Aprils waren durch sonnenscheinreiche und weitgehend trockene Witterung geprägt. In den Tagen zuvor fiel kein Niederschlag. Dies führte zur Abtrocknung des gesamten Krumenbereichs. Auf sandigen Böden gingen die Wassergehalte auf bis zu 70 % der nFk zurück.

*08. Mai 2002:* In der Vorwoche herrschte verhältnismäßig kühle und sonnenscheinarme Witterung und es waren 16 mm Niederschlag vor Ort gefallen. Die Böden waren im allgemeinen sehr feucht und wiesen stellenweise stauende Vernässungen auf. Am Tag der Kampagne herrschte in den Morgenstunden dichter Hochnebel, so dass der Weizenbestand mit Tau benetzt war. Erst gegen Mittag trocknete der Bestand vollständig ab.

*05. Juni 2002:* Die Woche war sonnenscheinreich und relativ trocken. In der Vorwoche fielen 11 mm Niederschlag. Die klimatischen Verhältnisse sorgten für ein starkes Austrocknen der Böden, insbesondere der leichten Standorte. Am Tag der Kampagne herrschte zur Mittagszeit und in den frühen Nachmittagsstunden stark böiger Wind.

### 3.4 Farb-Infrarot Luftbilder

Zu den jeweiligen Beprobungsterminen in den Jahren 2001/2002 wurden Farb-Infrarot-Luftbilder mit einer Reihenmeßkamera (Zeiss RMK A 15/23) in einem Maßstab von ca. 1:23000 durch das DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) aufgenommen. Als Filmmaterial wurde der im infraroten Spektralbereich empfindliche Kodak Aerochrome II 2443 verwendet (KODAK 1998). Ein montierter Zeiss D-Filter (entspricht Wratten 16, cut-off Wellenlänge 535 nm) unterdrückte den blauen Spektralbereich bei den Aufnahmen. Die spektrale Durchlässigkeit des verwendeten Filters ist in Abbildung 3-10 dargestellt.



**Abb. 3-10:** Spektrale Transmission des Kodak-Wratten 16 Filter.

Für die Ermittlung der spezifischen Reflexionsintensität war es notwendig, die jeweilige spektrale Sensitivität des Luftbildfilms zu bestimmen. Als Kriterium für die spektrale Bandbreite wurde die Halbwertsbreite (FWHM - Full Width at Half Maximum) verwendet. Jeder spektrale Kanal hat ein zentrales Maximum mit einer entsprechenden FWHM, welche in Tabelle 3-4 aufgeführt sind.

**Tab. 3-4:** Spektrale Sensitivität der Luftbildaufnahmen.

	Maximum [nm]	FWHM [nm]	Bandbreite [nm]
Grün	555	50	535 - 585
Rot	650	70	600 - 670
Infrarot	730	140	670 - 810

Die analog aufgenommenen Bilddaten wurden als Diapositiv entwickelt und eingescannt. Für jeden der fünf Beprobungstermine standen Luftbilddaten zur Verfügung. Lediglich die Aufnahme vom Juni 2001 war auf Grund starker Wolkenbedeckung nicht für eine weitere analytische Interpretation zu verwenden (Tab. 3-5).

**Tab. 3-5:** Verfügbarkeit und Aufnahmezeit der Luftbilder.

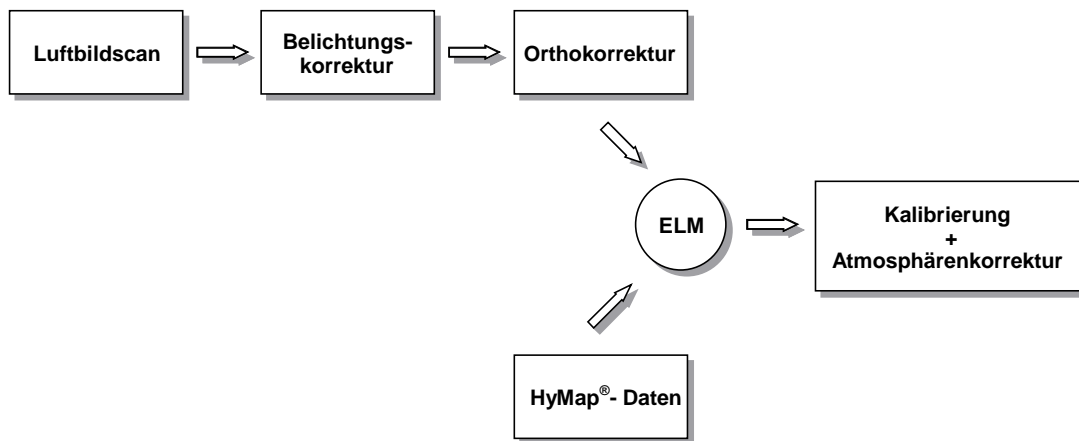
Termin	vorhanden	Uhrzeit
09.05.2001	x	13.30-14.00
09.06.2001	n.e.	n.e.
07.04.2002	x	12.30-13.00
08.05.2002	x	12.30-12.40
05.06.2002	x	11.00-11-20
n.e.: nicht erhoben		

Die Qualität der Luftbilder war durch radiometrische Störungen in Form von Beleuchtungsunterschieden beeinträchtigt, die vor der analytischen Auswertung in entsprechenden Vorverarbeitungsschritten weitestgehend korrigiert wurden.

#### 3.4.1 Vorverarbeitung der Luftbilder

Die Radiometrie von Luftbildern kann durch verschiedene Störfaktoren verfälscht sein. Aufnahmesystembedingte Belichtungsunterschiede innerhalb eines Bildes, können den Auswertungsprozess erschweren und zu erheblichen Fehlinterpretationen der Daten führen. Es gibt verschiedene geometrische und atmosphärische Störeinflüsse, die über spezielle Korrekturverfahren entfernt oder aber zumindest minimiert werden können. Die durchgeführten Bearbeitungsschritte und deren zugrundeliegende Theorie wird im Folgenden erläutert. In Abbildung 3-11 sind die durchgeführten Prozessierungsschritte in chronologischer Abfolge schematisch dargestellt.





**Abb. 3-11:** Chronologische Abfolge der Prozessierungsschritte für die absolute Kalibrierung der Farb-Infrarot-Luftbilder (ELM: Empirical Line Methode).

### *Korrektur der radiometrischen Störungen*

Ein radiometrischer Störfaktor ist der radiale Helligkeitsabfall (exposure fall off) in einem Linsensystem (LILLESAND & KIEFER 1994). Dieser systembedingte Effekt setzt sich aus den Komponenten a) radiale Abnahme der Beleuchtungsstärke und b) Vignettierung zusammen. Die Beleuchtungsstärke ist in der Linsenmitte am höchsten und verringert sich quadratisch mit der Entfernung zum Bildzentrum. Dieses Problem kommt insbesondere bei Weitwinkelobjektiven zum tragen und kann zu Belichtungsabfällen auf weniger als ein Achtel führen (LOTTMANN 2000). Der Vignettierungseffekt führt zu objektivinternen Schattenwürfen am Bildrand. Diese Schatten werden durch die Beschneidung eines schräg in das optische System einfallenden Strahlenbündels hervorgerufen, die durch die Blende oder die Objektivränder verursacht wird. Bei Luftbildaufnahmen finden daher Anti-Vignettierungsfilter Verwendung, die den Helligkeitsverlust verringern (LILLESAND & KIEFER 1994). Der radiale Belichtungsabfall ist hauptsächlich vom Linsensystem der Kamera und der verwendeten Blende abhängig, so dass eine exakte rechnerische Korrektur nur durchgeführt werden kann, wenn Kamera- und Aufnahmeparameter bekannt sind.

Weitere großflächige Reflexionsinhomogenitäten innerhalb einer Aufnahme können durch bi-direktionale Reflexion entstehen. Dieser Effekt wird durch das geometrische Verhältnis zwischen Sonne, Objekt und Aufnahmesensor verursacht und beeinflusst die Reflexion der Oberfläche in hohem Maße. Es können einzelne Bildbereiche entstehen, die extrem unterbelichtet sind, während andere Bereiche stark überstrahlt werden (*Hot Spot*), wodurch

nahezu die gesamte Objektinformation verloren gehen kann. Diese Art der Beeinträchtigung kann durch Aufnahmen zur Mittagszeit reduziert werden, da die bi-direktionalen Effekte bei nahezu senkrechtem Sonnenstand am geringsten sind. Der bi-direktionale Effekt spielt bei Landaufnahmen aus geringen bis mittleren Höhen eine größere Rolle, als atmosphärische Einflüsse (PELLIKKA ET AL. 2000). Er tritt wiederum vor allem bei Weitwinkelobjektiven auf und ist Wellenlängen abhängig (DEERING ET AL. 1999, SANDMEIER & ITTEN 1999). Der Einfluss auf die Radiometrie ist dabei im visuellen Spektralbereich (VIS) größer als im nahen Infrarot (NIR) (JACKSON ET AL. 1990, STAENZ ET AL. 1995, PELLIKKA 1998) und variiert in Abhängigkeit unterschiedlicher Vegetationstypen.

Eine Möglichkeit zur Korrektur der radiometrischen Störungen besteht darin, einen einfachen funktionalen Zusammenhang zwischen der entsprechenden Einflussgröße und den Grauwerten im Bild zu finden. Die Komplexität der Einflüsse lässt jedoch nur eine näherungsweise mathematische Modellierung des Belichtungsabfalls zu. Diese empirischen Modelle ermöglichen eine simultane Korrektur des bi-direktionalen Effektes und des radialen Belichtungsabfalls (KING 1991).

In den entsprechenden Softwarepaketen stehen für die Belichtungsabfall-Korrektur verschiedene Modelle zur Verfügung. ERDAS Imagine<sup>®</sup> bietet hierfür das Modul *color balancing* an (ERDAS 2001). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden exponentielle und parabolische Modellansätze getestet, die jedoch beide keine zufriedenstellenden Resultate lieferten. Durch Mittelwertbildung aus dem Ergebnis der exponentiellen Korrektur und des Ursprungsbildes konnte jedoch eine akzeptable Korrektur erzielt werden. Aus Mangel an objektiven Bewertungskriterien (BROSTUEN 1999) wurde die Qualität visuell beurteilt.

### *Orthokorrektur*

Innerhalb eines Luftbildes liegen verschiedene Lageverzerrungen von Objekten vor, die durch die Kameraorientierung im Raum und das Geländere relief hervorgerufen werden. Da eine akkurate Analyse der Bildinformation nur mit hoher Lagegenauigkeit der bildinternen Strukturen und Objekte möglich ist, müssen diese Verzerrungen zuvor korrigiert werden. Mit der Korrektur der Lagegenauigkeit wird die Bildinformation gleichzeitig auf ein geografisches Referenzkoordinatensystem angepasst. Die Referenzkoordinaten wurden aus den offiziellen ATKIS-Daten entnommen, die eine Lagegenauigkeit von  $\pm 3$  m gewährleisten (LGN 2002).

Die Orthokorrektur wurde mit der Passpunktmethode und dem DGM (Kap. 3.1.2) auf die Gauß-Krüger-Kartenprojektion (3. Streifen, Potsdam Rauenberg) durchgeführt. Für die Transformation wurde das bilineare Triangulationsmodell von ERDAS Orthobase<sup>®</sup> verwendet.

Für die Vergleichbarkeit der Luftbilder verschiedener Aufnahmezeitpunkte ist neben der geografischen Lagegenauigkeit auch die gegenseitige Passgenauigkeit der Aufnahmen von Bedeutung, die mit Hilfe der Ko-registrierung der Bilddaten erreicht wurde. Hierbei diente ein exakt orthokorrigiertes Bild (Masterszene) zur Ermittlung der Referenzkoordinaten für die weiteren Aufnahmen. Als Gütemaß für die Orthokorrektur wurde der RMS-Fehler (*Root Mean Square*) verwendet. Er gibt die Abweichung zwischen der Eingabekoordinate und der durch die Transformation berechneten Koordinate an (ERDAS 1999) und berechnet sich wie folgt:

$$[3-3] \quad RMS = \sqrt{(x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2}$$

$x_i$  und  $y_i$  sind die Eingangskordinaten

$x_r$  und  $y_r$  sind die transformierten Koordinaten

Die Orthokorrektur lieferte ein Bildprodukt in 0,5 m Pixelauflösung. Für die Vergleichbarkeit mit den Radardaten wurden die Luftbilder im Anschluss an alle Vorverarbeitungsschritte in die UTM-Projektion (WGS 84, Zone 33) transformiert und auf 1 m Pixelauflösung umgerechnet.

#### *Radiometrische Kalibrierung und Atmosphärenkorrektur*

Das aufgenommene Signal wird vom Reflexionsverhalten der Oberfläche beeinflusst. Im Idealfall, ohne störende Einflüsse, würde ein Teil der solaren Strahlung vom Objekt direkt reflektiert und könnte vom Sensor / Kamera gemessen werden. Die gemessene Strahlung entspricht dann der aktuellen Bodenreflexion. Durch verschiedene störende Einflüsse wird das gemessene Signal jedoch gedämpft. Einen Hauptanteil daran tragen die Streuprozesse der Atmosphäre, die durch die verschiedenen Atmosphärgase und Aerosole ausgelöst werden. Des Weiteren sind die spektralen Reflexionswerte immer nur relative Messungen und erfordern eine Kalibrierung auf einen Referenzstandard. Ein einfaches und effektives Verfahren zur Korrektur der störenden Atmosphäreinflüsse und Kalibrierung der Fernerkundungsdaten ist die Empirical Line Methode (ROBERTS ET AL. 1985, SMITH & MILTON 1999).

*Empirical Line Methode (ELM)*: Dieses Verfahren beruht auf einem vereinfachten linearen Modellansatz. Streng genommen verhalten sich die atmosphärischen Effekte nicht exakt linear und die bi-direktionellen Reflexionseigenschaften der Objekte werden außer Acht gelassen (MEHL 1994). Die Ergebnisse von ROBERTS ET AL. (1985) CONEL ET AL. (1987), KRUSE ET AL. (1990) und FARRAND ET AL. (1994) belegen jedoch, dass trotz dieses einfachen Ansatzes sehr gute Ergebnisse hinsichtlich der Atmosphärenkorrektur erzielt werden können. Gleiches gilt auch für die Kalibrierung der Daten, wie SMITH und MILTON (1999), sowie BEN-DOR und LEVIN (2000) in ihren Arbeiten zeigen konnten. Die Güte des Ergebnisses ist dabei in hohem Maße von der Qualität der Referenzflächen / -daten abhängig. So sollten die Referenzflächen in ihrer Größe ein Vielfaches der Pixelauflösung betragen, in etwa *Lambert'scher Reflexion* folgen, möglichst spektral homogen sein und keine zeitlich variablen Strukturen enthalten (SMITH & MILTON 1999).

Die ELM kann im einfachsten Ansatz mit einer sehr hellen und einer sehr dunklen Referenzfläche durchgeführt werden. Die Genauigkeit der Reflexionsgradbestimmung wird verbessert, wenn bis zu vier Referenzflächen in das lineare Regressionsmodell einfließen (FARRAND ET AL. 1994, PRICE ET AL. 1995, BEN-DOR & LEVIN 2000). Bei der Verwendung von mehr als zwei Referenzflächen wird das lineare Regressionsmodell nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Die Transformation der aufgenommenen Grauwerte ( $Dn_i$ ) in absolute Reflexionswerte ( $R_i$ ) für jeden Kanal  $i$  erfolgt über die mathematische Beziehung:

$$[3-4] \quad R_i = a * Dn_i + b,$$

wobei  $a$  die Steigung (gain) der Geraden und  $b$  den Achsenabschnitt (offset) beschreibt.

Korrekterweise müssen Referenzmessungen zeitgleich mit der Bildaufnahme erfolgen. Unter der Annahme gleicher atmosphärischer Verhältnisse und der Verwendung spektral invarianter Referenzflächen können auch zeitlich versetzte Referenzmessungen für die Berechnung herangezogen werden und zu guten Resultaten führen (BEN-DOR & LEVIN 2000).

In der vorliegenden Arbeit standen keine zeitnahen Referenzmessungen zur Verfügung. Für die ELM wurden spektrale Referenzsignaturen aus absolut kalibrierten Bilddaten des hyperspektralen HyMap<sup>®</sup>-Sensors extrahiert, die im Frühsommer 1999 aufgenommen wurden. Detaillierte Informationen über den HyMap<sup>®</sup>-Sensor finden sich in COCKS ET AL. (1998). Aufgrund vergleichbarer Witterungsverhältnisse zu den Aufnahmetermenen kann von

ähnlichen atmosphärischen Bedingungen ausgegangen werden. Die Verwendung spektral invarianter Flächen gewährleistete eine den aktuellen Gegebenheiten vergleichbare Referenzsignatur.

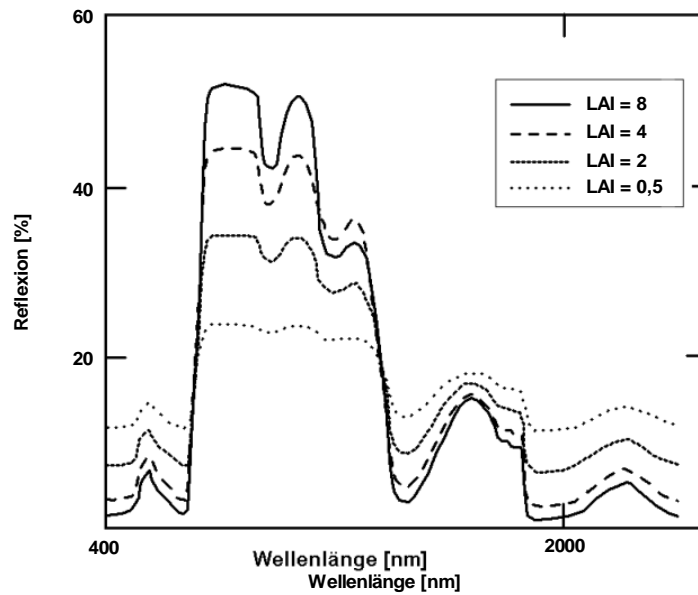
Entsprechend der spektralen Charakterisierung (Tab. 3-4) der Luftbildaufnahmen wurden die hyperspektralen HyMap<sup>®</sup>-Daten mittels der spektralen Resamplingmethode des Softwarepakets ENVI<sup>®</sup> auf drei spektrale Kanäle reduziert. Hierbei wurde ein Gauß'sches Modell zu Grunde gelegt, welches die FWHM-Abstandsinformation mit berücksichtigt (ENVI 2000). Dieses Modell war eine Annäherung an die spektrale Sensitivität des Filmmaterials und führte zu einer Gewichtung der einfließenden spektralen Kanäle.

Aus den beiden nun spektral vergleichbaren Datensätzen des Luftbildes und der HyMap<sup>®</sup>-Daten wurde die spektrale Signatur von vier Referenzflächen unterschiedlich starker Reflexion extrahiert. Es wurde zunächst das Luftbild vom 08. Mai 2002 kalibriert, um danach als Basis für die Kalibrierung der anderen Luftbilder zu dienen. Für jeden Spektralkanal des Luftbildes wurde separat ein Scatterogramm mit den jeweiligen Grauwerten der Bilddaten als X-Achse und der absoluten Bodenreflexion der Referenzfläche aus den HyMap<sup>®</sup>-Daten als Y-Achse erstellt (Abb. A-1a-c). Die Transformation der Grauwerte in absolute Reflexionswerte erfolgt für jeden Kanal durch Verrechnung mit dem ermittelten Regressionsmodell.

#### 3.4.2 Vegetationsindex

Das Reflexionssignal eines photosynthetisch aktiven Pflanzenbestandes setzt sich aus den Signalen verschiedener Pflanzenbestandteile und Bodenkomponenten zusammen. Zu den Einflussfaktoren zählen die Größe der Blattoorgane, der Bodenbedeckungsgrad (Bodenanteil), die Dichte des Bestandes (Schattenanteil), sowie die vertikale und horizontale Gliederung des Bestandes (Oberflächenrauigkeit und Reihenrichtung). Diese Faktoren verändern sich im Laufe der Vegetationsperiode und führen zu charakteristischen Unterschieden im Reflexionssignal (ERASMI 2002). Einen umfassenden Überblick über die zu Grunde liegenden Prozesse geben u.a. SCHELLBERG (1990), USTIN ET AL. (1999) und LILIENTHAL (2003).

In der Gesamtwirkung führt die Zunahme an Biomasse bzw. Blattschichten generell zu einer Reflexionszunahme im nahen Infrarot und einer geringen Abnahme im Bereich des roten Spektrums (Abb. 3-12).



**Abb. 3-12:** Einfluss des Blattflächenindex (LAI) auf die Reflexionssignatur von Vegetationsbeständen (verändert nach BARET & JACQUEMOND 1994).

Dieser Sachverhalt wird bei Vegetationsbeobachtungen ausgenutzt. Auf Grundlage dieser Reflexionsänderungen wurden verschiedenste Vegetationsindizes (VI) entwickelt (BANNARI ET AL. 1995), die besonders sensitiv auf Unterschiede bezüglich verschiedener Bestandesmerkmale reagieren. Die meisten VI's setzen die Reflexion im roten und infraroten Spektralbereich in Beziehung zueinander. Der gebräuchlichste Vegetationsindex ist der von ROUSE ET AL. (1974) entwickelte *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Er berechnet sich nach folgender Gleichung (3-5):

$$[3-5] \quad NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_r}{\rho_{NIR} + \rho_r}$$

$\rho_{NIR/r}$ : Reflexionsintensität im nahen Infrarot bzw. roten Spektralbereich

Der Wertebereich des Indizes liegt zwischen +1 und -1. Durch die einfache Normierung der Indexwerte ist ein Vergleich zwischen verschiedenen Aufnahmen möglich. Ein weiterer Vorteil dieser Ratio-Bildung liegt in der Reduzierung radiometrischer Störeffekte, wie etwa Schattenwurf und Beleuchtungsunterschiede (LEBLON 1997).

Labor- und Feldstudien zeigen, dass ab einem NDVI von > 0,2 das Reflexionssignal der Vegetation über das Bodensignal dominiert (LACAZE 1996). Als problematisch für Vegetationsbeobachtungen erweist sich der Sättigungseffekt des NDVI bei zunehmendem

Blattflächenindex (LAI). Je nach Bedeckungsgrad und Vegetationstyp tritt eine Sättigung bei einem LAI zwischen 1 und 3 auf (SELLERS 1985). Andere Studien kommen auf Sättigungsgrenzen bei einem LAI zwischen 2 und 6 (HATFIELD ET AL. 1985). Einen weiteren, aber schwer erfassbaren Einfluss übt die Blattstellung der Einzelpflanzen aus (ASNER 1998). Morphologisch verschiedene Weizensorten, mit unterschiedlicher Blattstellung, zeigen ein abweichendes Reflexionsverhalten (STADTBÄUMER 1988, WIEGAND ET AL. 1992, WILTSHIRE ET AL. 2002). Trotz dieser Probleme konnten verschiedene Studien signifikante Zusammenhänge zwischen NDVI und u.a. Biomasse, Wassergehalt, LAI und Bestockungsdichte aufzeigen (TUCKER 1979, ASRAR ET AL. 1984, WANJURA & HATFIELD 1987, WIEGAND 1992, TAYLOR ET AL. 1997, FLOWERS ET AL. 2001).

Im Rahmen der Arbeit wurde aus den zuvor radiometrisch- und ortho-korrigierten Luftbildaufnahmen der *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) berechnet, um Aussagen über die Biomassevariabilität innerhalb der Bestände treffen zu können. Auf die Verwendung der Aufnahme vom April 2002 wurde verzichtet, da der NDVI nur sehr geringe Werte aufwies, die auf ein dominierendes Bodensignal hindeuteten.

### 3.4.3 Extraktion der NDVI-Werte

Für die Extraktion der Werte wurden die Bilddaten und die Probepunkte in einem GIS überlagert. Die Werte des NDVI wurden für jeden Probepunkt extrahiert. Die Extraktion erfolgte pixelbasiert, da bei dieser Methode bessere Beziehungen zur Biomasse vorhanden waren als bei der Extraktion einer Kreisfläche von 2,5 m Radius (Kap. 3.5.3).

## 3.5 Radardaten des E-SAR

Die in der Arbeit verwendeten SAR-Daten wurden mit dem E-SAR-Sensor des DLR aufgezeichnet. Das E-SAR (*Experimental Synthetic Aperture Radar*) ist ein multi-dimensionaler<sup>16</sup> flugzeuggetragener Radarsensor (Abb. 3-13) der in verschiedenen Frequenzbereichen und Polarisationen arbeitet (HORN 1997).

---

<sup>16</sup> Ein multi-dimensionaler Radarsensor kann Daten in verschiedenen Wellenlängen und Polarisationen erheben.

Zum Zweck der Bestimmung von Bestandesmerkmalen kamen die voll-polarimetrische (*quad-pol*) L-Band- und die dual-polarimetrische (*dual-pol*) X-Band-Konstellation zur Anwendung. Das L-Band entspricht einer Wellenlänge von 23 cm und das X-Band einer von 3 cm (Tab. 2-1). Aufgrund der technischen Spezifikationen des E-SAR konnten nur die Aufnahmen der L-Band Konfiguration in einem Überflug realisiert werden. Die beiden Polarisationen des X-Bandes mussten anschließend während separaten Flügen aufgezeichnet werden.



**Abb. 3-13:** Flugzeug vom Typ Dornier DO-128 mit E-SAR Sensor.

Die Aufzeichnungen erfolgten an fünf verschiedenen Aufnahmezeitpunkten im Frühjahr / Sommer der Jahre 2001/02, zeitgleich mit den Felderhebungen (Tab. 3-6). Technische Probleme am Radarsensor führten dazu, dass der erste Aufnahmeflug einen Tag später als die Probenahme erfolgte. Aufgrund gleicher Witterungslage an beiden Tagen war von einer Vergleichbarkeit der Vegetations- und Bodenparameter auszugehen.

**Tab. 3-6:** Aufnahmezeitpunkte der Radardaten vom Untersuchungsgebiet in Neetzow.

Datum	X-Band	L-Band	Aufnahmezeitraum
09.05.2001	dual-pol	quad-pol	11.30 – 13.00 h
09.06.2001	dual-pol	quad-pol	12.20 – 15.00 h
07.04.2002	dual-pol	quad-pol	12.30 – 15.00 h
08.05.2002	dual-pol	quad-pol	10.45 – 13.15 h
05.06.2002	dual-pol	quad-pol	13.05 – 15.10 h

Der gesamte Aufnahmestreifen hatte eine Ausdehnung (Azimuth \* Range) von 8 x 3 km. Für die Auswertungen war nur der Bereich der drei Testflächen notwendig, der dafür aus der Gesamtszene ausgeschnitten (Subimage) wurde.



Für die Geokodierung und die radiometrische Kalibrierung der Bilddaten in den unterschiedlichen Frequenzbereichen und Polarisationen wurden von dem DLR im Testgebiet dreiseitige (trihedral) *Cornerreflektoren*<sup>17</sup> als Kontrollpunkte aufgestellt (Abb. 3-14), die mit einem DGPS exakt eingemessen wurden.



**Abb. 3-14:** Cornerreflektor für die radiometrische Kalibrierung und die Geokodierung der Radardaten.

### 3.5.1 Vorverarbeitung der Radardaten

Die komplexe Prozessierung der E-SAR-Daten erfolgte unter Berücksichtigung der spezifischen Systemparameter beim DLR. Die einzelnen Prozessierungsschritte sind bei HORN (1999) und PAPTHANASSIOU & ZINK (1998) nachzulesen. Anhand der Antennenparameter und den Aufnahmebedingungen erfolgten verschiedene Prozessierungsschritte, die zu verschiedenen digitalen Datenprodukten führten (HORN ET AL. 1999). Es wurde ein DGM aus interferometrischen Daten der Befliegung abgeleitet, eine Incidence Angle Map (*IAM*) und ein in *Ground-Range*-Geometrie vorliegender Bilddatensatz generiert (*Single-* und *4-Multi-Look*). Die durchgeführte *Multi-Look*-Prozessierung (Kap. 2.3.1) hat die Reduzierung des Speckle-Effektes zum Ziel, führt aber auch zu einer entsprechenden Verringerung der räumlichen Auflösung der SAR-Daten (HENDERSON ET AL. 1998). Die wesentlichen Aufnahmeparameter der Radarkanäle sind in Tabelle 3-7 zusammengefasst.

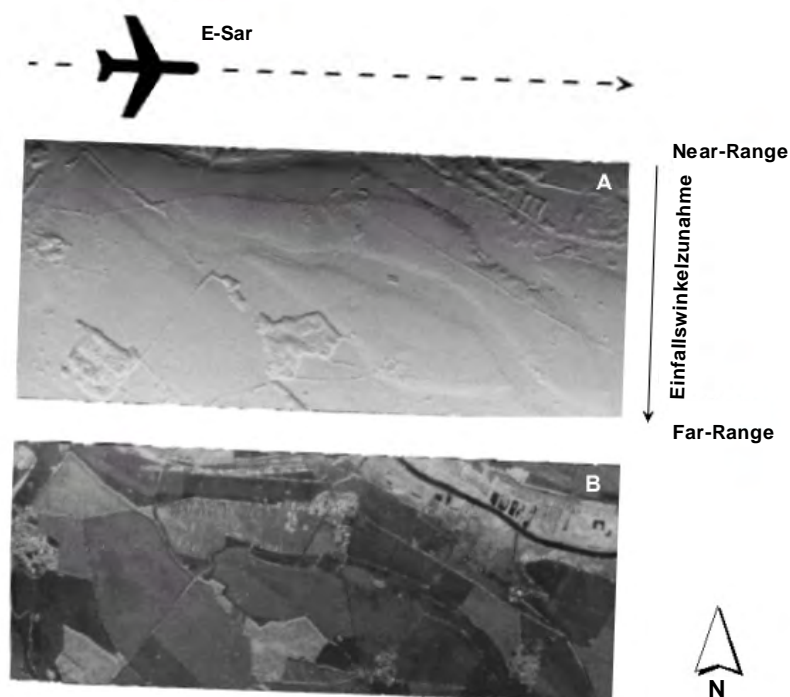
---

<sup>17</sup> Dreiseitige Cornerreflektoren weisen aufgrund ihrer Form und ihres Materials eine besonders hohe Rückstreuung auf. Sie dienen daher als Referenz für die Kalibrierung und die Georeferenzierung der Radaraufzeichnungen.

**Tab. 3-7:** Aufnahmeparameter der E-SAR Daten (PRO SMART 2002).

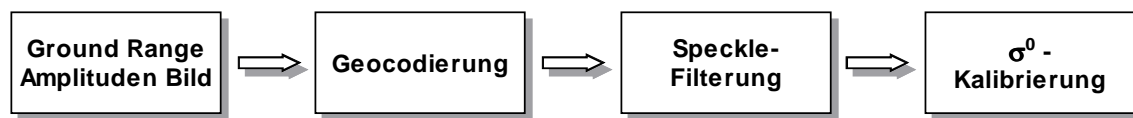
	Slant Range Auflösung [m]	Azimuth Auflösung [m]	Azimuth Auflösung 4 Looks [m]	Kalibrierungs- genauigkeit [dB]	Frequenz [GHz]	Zenitwinkel [°]	Einfallswinkel Near – Far Range [°]
X-Band	2	0,7	1,8	$\pm 1$	9,6	35	25 - 44
L-Band	2	0,7	1,8	$\pm 1,5$	1,3	35	25 - 44

Abbildung 3-15 zeigt die räumliche Verteilung des lokalen Einfallswinkels für die L-Band-Konfiguration. Eindeutig zu erkennen ist neben der Zunahme des Einfallswinkels vom *near-* zum *far-range* auch, dass dem Sensor zugeneigte Hänge kleine Einfallswinkel aufweisen (dunkel), während entgegengesetzt exponierte Bereiche große Winkel haben (hell). Deutlich zeigt sich der Effekt der unterschiedlichen Einfallswinkel im *near-* und *far-range* durch eine abnehmende Rückstreuintensität (Abb. 3-15 B).



**Abb. 3-15:** Einfluss des Einfallswinkels auf die Rückstreuintensität.  
 A: Geocodierte Incidence Angle Map (IAM) der L-Band-Konfiguration;  
 B: geocodiertes ground-range Amplituden-Bild (L-HH).

Für eine analytische Auswertung der Bilddaten waren noch weitere Verarbeitungsschritte notwendig, die in den folgenden Unterpunkten ausführlich erläutert werden. Die Prozessierungskette ist in Abbildung 3-16 schematisiert dargestellt.



**Abb. 3-16:** Schematische Darstellung des chronologischen Ablaufs der durchgeführten Prozessierungsschritte.

### *Geometrische Korrektur*

Die Verwendung von Bilddaten in Ground-Range-Geometrie erleichtert deren Geocodierung, da die verzerrte geometrische Darstellung der Rohdaten im Schrägentfernungsbild (*Slant-Range*) bereits in horizontale Entfernungen umgerechnet wurde (*Ground-Range*). Diese Abbildung entspricht den realen Verhältnissen (HOCHSCHILD 1995).

Die prozessierten Ground-Range-Daten wurden vom DLR unter Verwendung des abgeleiteten digitalen Geländemodells auf ein kartografisches Referenzsystem (UTM-Kartenprojektion Zone 33, WGS84 Spheroid) georeferenziert. Die Pixelauflösung und die horizontale Lagegenauigkeit betrug jeweils 1 m (PROSMART 2002).

### *Reduzierung des Speckle-Effektes*

Die Eliminierung des Speckle-Effektes liefert eine Extraktion von intensitätsbezogenen Merkmalen und erlaubt eine weitaus bessere und exaktere Interpretation und adäquatere visuelle Darstellung der Bilddaten. Die physikalischen Grundlagen des Speckle und dessen Reduzierung sind in Kapitel 2.3.1 zusammengefasst. Aufgrund der vom DLR durchgeführten 4-Look-Prozessierung wiesen die Bilddaten bereits einen deutlich reduzierten Speckle-Einfluss gegenüber den Single-Look-Daten auf.

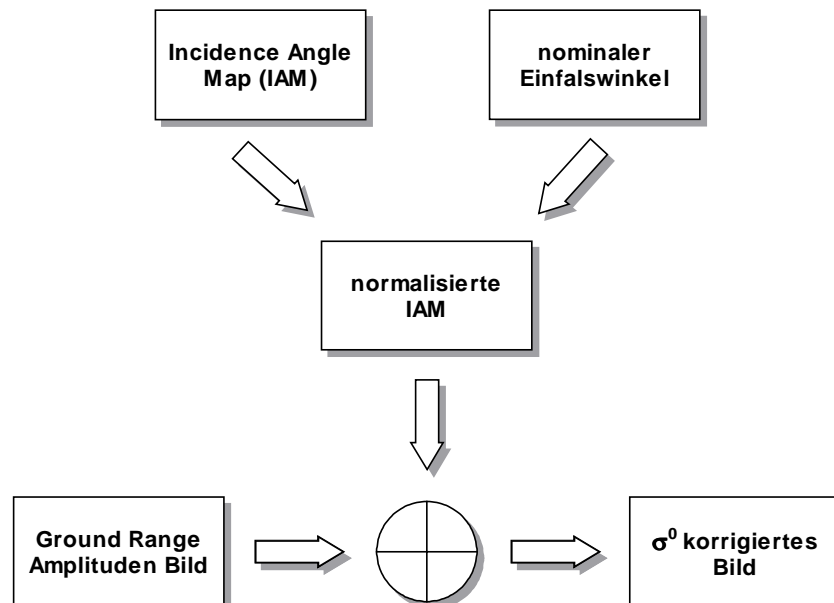
Da in den Bilddaten noch immer eine körnige Struktur vorhanden war, sollte eine weitere Korrektur des Speckle zu einer weiteren Reduzierung der Signalvarianz in den Bilddaten führen. Es wurde angenommen, dass die Geokodierung der Bilddaten deren Statistik nicht wesentlich verfälscht und eine Filterung nicht beeinträchtigt. Die Wahl des optimalen Filterverfahrens ist jeweils vom Datenmaterial und der Fragestellung abhängig (KLENKE 1999). Es wurden verschiedene adaptive Filterverfahren, die in ERDAS-Imagine<sup>®</sup> zur Verfügung stehen, mit unterschiedlichen Fenstergrößen (3x3, 5x5, 7x7) untersucht, und die jeweiligen Resultate visuell analysiert. Eine quantitative Bewertung der Filter war nicht möglich, da kein Qualitätsmaß existiert (HOLECZ 1993). Die Ergebnisse der verschiedenen Filterverfahren

unterschieden sich in der Intensität der Speckleunterdrückung und dem Verlust an räumlicher Auflösung und Detailinformation, welcher sich in einer erhöhten Unschärfe bemerkbar machte. Dieser Unschärfeneffekt führt ebenfalls zu einer Verringerung der Lagegenauigkeit der Daten (PRIETZSCH 1999).

Letztendlich wurde der Frost-Filter-Algorithmus (FROST ET AL. 1982) mit einer Filtermatrix von 5x5 Pixeln auf alle verwendeten Bilddaten angewendet. Der Frost-Filter verwendet den Variationskoeffizienten innerhalb der Filtermatrix als Beurteilungsmaß für die Homogenität der Grauwerte. Der Variationskoeffizient wurde entsprechend dem für 4-Look-Amplituden Bilder geltenden theoretischen Wert von 0,26 (LEE ET AL. 1994) voreingestellt.

### *Kalibrierung des Rückstreukoeffizienten $\sigma^0$*

Erst die absolute Kalibrierung der Intensitätswerte der Radaraufzeichnung in Rückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  (*sigma naught*), die üblicherweise erst beim Anwender durchgeführt wird, ermöglicht einen quantitativen Vergleich von Radarmessungen unterschiedlicher Aufnahmesensoren und Aufnahmezeitpunkte bzw. den Vergleich unterschiedlicher Geländeobjekte innerhalb einer Aufnahme. Die Kalibrierung ist schematisch in Abbildung 3-17 dargestellt.



**Abb. 3-17:** Schematische Darstellung der *Sigma naught* Kalibrierung ( $\sigma^0$ ) der E-SAR Daten.

Die absolute Kalibrierung der *ground-range* Amplituden-Bilder wurde mit dem Bildverarbeitungssystem ERDAS-Imagine<sup>®</sup> durchgeführt. Grundvoraussetzungen für eine erfolgreiche Kalibrierung sind dabei Kenntnisse über Antennenparameter und Abbildungsgeometrie des Sensors. Diese notwendigen Informationen wurden aus dem Header-File des zu verarbeitenden Datensatzes entnommen und als Variablen in das Kalibrierungsmodell (DLR 1994) eingebracht. Unter Einbeziehung des lokalen Einfallswinkels ( $\theta_{loc}$ ) und der am Sensor registrierten Rückstreuintensität  $\beta^0$  wurde der Rückstreuoeffizient kalibriert.

Der für die Berechnung von  $\sigma^0$  notwendige lokale Einfallswinkel  $\theta_{loc}$  (*local incidence angle*) wurde durch die IAM bereitgestellt. Im Kalibrierungsmodell wurde durch Schwellenwerte dafür gesorgt, dass der Sinus von  $\theta_{loc}$  nicht  $\leq 0$  und damit ungültig wurde.  $\theta_{loc}$  wurde für die gesamte Szene auf einen nominalen Einfallswinkel von  $\theta = 35^\circ$  normalisiert, der in etwa dem Einfallswinkel im Szenenmittelpunkt (Zenithwinkel) entsprach (Tab. 3-7). Dadurch wurden die SAR-Aufnahmen topografisch normalisiert und Reliefeinflüsse radiometrisch korrigiert.

Im Aufnahmesystem begründete radiometrische Verzerrungen durch Near-Far-Range-Effekte, die zu unterschiedlich hohen Rückstreuwerten führen (Abb. 3-15), wurden hierbei ebenfalls reduziert. Ohne diese Normalisierung hätte der Einfallswinkel über den gesamten Aufnahmestreifen variiert und einen quantitativen Vergleich der Rückstreuintensitäten unmöglich gemacht. Der durch den Depressionswinkel vorgegebene nominale Einfallswinkel variierte von ca.  $25^\circ$  im *near-range* und ca.  $44^\circ$  im *far-range* (Tab. 3-7). Der kalibrierte Rückstreuoeffizient  $\sigma^0$  wurde nach folgender Gleichung (3-6) berechnet (DLR 1994, SU ET AL. 1997) :

$$[3-6] \quad \sigma^0 [dB] = \beta^0 [dB] + 10 * \log * \sin(\theta_{loc})$$

- $\theta_{loc}$  - lokaler Einfallswinkel [°]
- $\sigma^0$  - kalibrierter Rückstreuoeffizient [dB]
- $\beta^0$  - Radar-Brightness [dB]

Die Rückstreuintensitätswerte  $\beta^0$  [dB] wurden aus den aufgezeichneten Pixelwerten mit Hilfe einer systemspezifischen Kalibrierungskonstanten ( $K$ ) nach Gleichung 3-7 ermittelt (DLR 1994, SU ET AL. 1997):

$$[3-7] \quad \beta^0 [dB] = 10 * \log(DN + 32768)^2 - K$$

$\beta^0$  - Radar-Brightness [dB]

$DN$  - Pixel Value

$K$  - Kalibrierungskonstante

Die Kalibrierungskonstante betrug für den aufgenommenen Datensatz 60. Sie wurde während der SAR-Aufzeichnung aus der Rückstreuung der *Cornerreflektoren* ermittelt. Nach Angaben des DLR betrug die absolute Kalibrierungsgenauigkeit für das L-Band  $\pm 1,5$  dB, und für das X-Band wurde sie mit weniger als  $\pm 1$  dB Ungenauigkeit angegeben (HORN ET AL. 1999). Die relative Aufzeichnungsungenauigkeit des Sensors lag bei etwa 0,5 dB (PROSMART 2002). Durch den Kalibrierungsschritt wurde die radiometrische Auflösung der Bilddaten von zuvor 16-bit (65536 Graustufen) auf 8-bit (256 Graustufen) reduziert.

### 3.5.2 Extraktion der Radarrückstreuwerte

Für die statistischen Analysen mussten die im Feld erhobenen Bestandesmerkmale und die Radarrückstreuwerte in Beziehung gesetzt werden. Hierfür war es notwendig, die mit den Probenahmepunkten korrespondierenden Grauwerte im Radarbild zu lokalisieren und zu extrahieren. Dieser Arbeitsschritt wurde mit Hilfe eines GIS durchgeführt.

Trotz Speckle-Filterung waren die Radardaten weiterhin verrauscht. Diese radiometrische Störung und die eventuell vorhandenen geografischen Lageungenauigkeiten lassen eine pixelweise Rückstreuanalyse landwirtschaftlicher Bestände unangebracht erscheinen (KÜHBAUCH 2002). Aus diesem Grund wurden die Grauwerte aus einer kreisförmigen Umgebung von 2,5 m Radius (ca. 19 m<sup>2</sup>) um den Probepunkt herum gemittelt. Mögliche Signaturverfälschungen durch Objekte, wie Fahrstreifen und Bauminseln wurden ausgeschlossen, so dass der gemittelte Wert auf einer unterschiedlichen Anzahl von Pixeln basieren konnte.

Die Größe der Messpunktumgebung musste der Repräsentativität der Stichprobe gerecht werden. Die Wahl einer größeren Fläche als ca. 19 m<sup>2</sup> hätte aufgrund der kleinräumigen Bestandesheterogenitäten des Winterweizens die Repräsentativität der Stichproben in Frage gestellt. Auf eine Limitierung der verwendeten Pixel auf Grundlage eines multidimensionalen Abstands- oder Homogenitätskriteriums (z.B. spectral euclidian distance) wurde bei den

Radardaten verzichtet, um eine Ergebnisverfälschung durch mögliche Speckle-Pixel innerhalb des Messareals auszuschließen.

Neben den sechs Einzelkanälen wurde der Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen des L-Bandes berechnet (*r-cross*). Aufgrund der üblicherweise vorhandenen Reziprozität gilt im Allgemeinen  $HV = VH$  (RANEY 1998). Nach BOERNER ET AL. (1998) wird die kreuz-polare Rückstreuung daher häufig als Mittelwert beider Kanäle angegeben.

### 3.5.3 *Polarisationsindizes*

Neben den absoluten Radarrückstreusignalen der einzelnen Radarkanäle wurde im Rahmen der Arbeit analysiert, inwiefern Kombinationen der verschiedenen Radarparameter zu einem Informationsgewinn bezüglich der untersuchten Bestandesmerkmale führen. In Anlehnung an die aus der optischen Fernerkundung bekannten Vegetationsindizes wurden verschiedene lineare Kanalkombinationen erstellt. Hierbei wurde u.a. auf Indizes zurückgegriffen, für die in der jüngeren Forschung gute Ergebnisse berichtet wurden (LEMOINE 1991, POPE ET AL. 1994, STEINGIEBER & KÜHBAUCH 1998, PALOSCIA 1998). Zudem wurden diverse Kombinationsmöglichkeiten entwickelt, die bisher noch nicht publiziert wurden.

Im Folgenden werden diese Kombinationen als Polarisationsindizes bezeichnet. Die den Indizes zugrundeliegenden Rechenoperationen wurden mit den extrahierten Rückstreuwerten der einzelnen Kanäle (Kap. 3.5.2) durchgeführt. Eine Auflistung aller verwendeten Polarisationsindizes findet sich im Anhang (Tab. A-9a).

### 3.6 *Statistische Analysemethoden*

Die Daten wurden einer deskriptiven statistischen Analyse unterzogen, um die Größenordnung und Varianz der Daten zu veranschaulichen. Als Variationsmaß werden die Standardabweichung ( $\sigma$ ) und für Vergleichszwecke der normierte Variationskoeffizient ( $v$ ) angegeben. Für die Prüfung auf Normalverteilung als Voraussetzung für die in der Arbeit verwendeten statistischen Verfahren wurde der Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,05$  (zweiseitiges Signifikanzniveau 95 %) durchgeführt. Je höher die ermittelte asymptotische Signifikanz ist, desto wahrscheinlicher liegt Normalverteilung des überprüften Merkmals vor.

Die zur Anwendung gekommenen statistischen Methoden dienen vornehmlich der Zusammenhangsanalyse und der Modellerstellung. Die Signifikanzgrenzen der linearen Korrelations- und Regressionsanalyse wurden auf zweiseitigem Signifikanzniveau ( $\alpha$ ) ermittelt und wie folgt gekennzeichnet:

- \* signifikant,  $\alpha < 5\%$
- \*\* hoch signifikant,  $\alpha < 1\%$

Als Interpretationsschlüssel der Korrelationskoeffizienten nach PEARSON wurde der Vorschlag von BROSIUS (1999) verwendet (Tab. 3-8). Die Qualität der Genauigkeit und das Generalisierungsvermögen des Regressionsmodells wurde mit Hilfe der Kreuzvalidierung (*Cross-Validation*) beurteilt, welche eine unverzerrte und verlässliche Fehlerschätzung anhand eines neuen, unabhängigen Datensatzes ermittelt (FRIEDL & STAMPFER 2001).

**Tab. 3-8:** Interpretationsschlüssel für den Korrelationskoeffizienten.

r	Güte
0	Keine Korrelation
> 0 – 0,2	Sehr schwache Korrelation
0,2 – 0,4	Schwache Korrelation
0,4 – 0,6	Mittlere Korrelation
0,6 - 0,8	Starke Korrelation
0,8 - < 1	Sehr starke Korrelation
1	Perfekte Korrelation

Die theoretischen Hintergründe der weiteren statistischen Verfahren (Cluster- und Diskriminanzanalyse) werden in den folgenden Punkten kurz erläutert. Sämtliche statistischen Analysen wurden mit dem Statistikprogramm SPSS<sup>®</sup> 10 durchgeführt.

### *Clusteranalyse*

Die hierarchische Clusteranalyse nach der *Ward-Linkage-Methode* wurde zur Gruppierung der Stichproben auf Basis der Bestandesdichte durchgeführt. Es wurden nur z-transformierte Variablen in die Analyse integriert. Die Gruppenzugehörigkeit der einzelnen Probepunkte, die als Variable in die Diskriminanzanalyse einfluss, ist im Anhang aufgeführt (Tab. A-1, A-2).

Das Verfahren der hierarchischen Clusteranalyse ist ein so genanntes struktur-bildendes Verfahren, bei dem Stichproben mit ähnlicher Ausprägung bezüglich einer oder mehrerer



Variablen zu Gruppen zusammengefasst werden. Ziel der Clusteranalyse ist es, die Fälle so in Cluster einzuteilen, dass sie in sich möglichst homogen und untereinander maximal verschieden sind. Als Distanzmaß wird häufig die quadrierte euklidische Distanz (Gleichung 3-8) verwendet (STOYAN ET AL. 1997). Für die beiden Fälle X und Y ergibt sich die quadrierte euklidische Distanz ( $D^2$ ) für n Variablen aus:

$$[3-8] \quad D^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2$$

Da die Größe der Distanz im multi-dimensionalen Merkmalsraum wesentlich von den Dimensionen der Variablen abhängt, ist es notwendig, die Variablenwerte vor der Berechnung zu standardisieren, um Skaleneffekte auszuschließen.

Nach der Berechnung der Distanzmaße erfolgt die Clusterbildung durch hierarchische Agglomeration. Dabei wird zunächst jeder Fall als ein eigenständiges Cluster betrachtet. Im ersten Schritt werden dann die beiden Fälle mit der geringsten Distanz zu einem Cluster zusammengefasst. Von den nun vorhandenen Clustern werden wieder die beiden ähnlichsten Cluster zu einem zusammengefasst usw. Existieren Cluster mit mehreren Objekten (das ist bereits ab dem zweiten Schritt der Fall), gibt es verschiedene Verfahren der Clusterbildung, die sich hinsichtlich ihrer Definition der Ähnlichkeit zwischen den Clustern unterscheiden (BAHRENBERG ET AL. 1992). Insbesondere dem Ward-Algorithmus wird die Eigenschaft zugeschrieben, in etwa gleich große und homogene Cluster zu liefern, sofern keine Ausreißer in den Daten vorliegen (STOYAN ET AL. 1997).

Der Nachteil der hierarchischen Clusteranalyse liegt in ihrem schrittweisen Vorgehen und dem Umstand, dass einmal gebildete Cluster nicht mehr aufgelöst oder umgeordnet werden können. Ein weiteres Problem stellen Ausreißer in der Stichprobe dar, die häufig zu singulären Clustern führen.

### *Diskriminanzanalyse*

Die Diskriminanzanalyse stellt im Vergleich zur Regressionsanalyse eine Generalisierung dar. Aufgrund der Variabilität der Radardaten und deren Beeinträchtigung durch den Speckle-Effekt erscheint die Zusammenhagsuntersuchung auf Gruppenbasis sinnvoll.

Die Diskriminanzanalyse wurde zur Überprüfung der Gruppierung herangezogen, die mittels der Clusteranalyse erstellt wurde. Die Gruppenzugehörigkeit ging als abhängige Variable in das Modell ein. Als unabhängige, diskriminierende Variable wurden die zugehörigen Grauwerte der Radarrückstreuung bzw. der NDVI verwendet. Mit dieser Herangehensweise wurde überprüft, ob auf Grundlage der Fernerkundungsdaten eine der Clusterung der Bestandesdichte vergleichbare Gruppierung der Proben vorgenommen wird. Anhand der ermittelten linearen Klassifizierungsfunktion war es nachfolgend möglich jedes einzelne Pixel des Radarbildes oder des NDVI-Derivats anhand seines Grauwertes der zugehörigen Gruppe zuzuordnen.

Die Ursprünge der (linearen) Diskriminanzanalyse gehen auf FISHER (1936) zurück. Sie ist ein multivariates Verfahren zur Analyse von Gruppenunterschieden und zählt, wie auch die Regressionsanalyse, zu den struktur-prüfenden Verfahren (BACKHAUS ET AL. 2000). Sie wird vor allem für die folgenden Problemstellungen genutzt:

- ▶ Sind die Gruppen hinsichtlich der Variablen signifikant verschieden?
- ▶ Welche Variablen sind besonders für die Erklärung einer Differenzierung der Gruppen geeignet?
- ▶ Lässt sich die Gruppenzugehörigkeit aufgrund von Merkmalsausprägungen vorhersagen?

Es können nicht nur die Zusammenhänge zwischen den Variablen aufgedeckt, sondern auch fehlende Werte einer abhängigen Variablen mit Hilfe einer Modellfunktion aus den Werten der erklärenden Variablen vorhergesagt werden (BROSIUS 1999). Im Gegensatz zur Regressionsanalyse werden Variablen unterhalb des Intervallskalenniveaus als abhängige Variable verwendet. Die Werte der abhängigen Variablen drücken somit lediglich eine Gruppenzugehörigkeit aus (Gruppierungsvariable). Die Güte einer Diskriminanzfunktion, d.h. die Trennkraft der Variablen bezüglich der verschiedenen Gruppen kann anhand verschiedener Parameter beurteilt werden. Nach BACKHAUS ET AL. (2000) ist *Wilk's Lambda* die gebräuchlichste Methode.

Die Wahl der Variablen sollte abhängig von der jeweiligen Fragestellung sein. Führt man die Diskriminanzanalyse mit denselben Variablen durch, die zuvor für die Gruppenbildung herangezogen wurden, kann die diskriminatorische Eignung dieser analysiert werden

(BACKHAUS ET AL. 2000). Durch die Verwendung anderer Variablen kann eine Aussage über mögliche Zusammenhänge zwischen der dominierenden Gruppierungsvariablen und den diskriminierenden Variablen getroffen werden (DEMPSEY ET AL. 1997). Ursprünglich als multivariates Verfahren konzipiert, kann die Diskriminanzanalyse auch mit einer diskriminierenden Variablen angewendet werden.

Die Diskriminanzanalyse liefert als ein Ergebnis die „*Fisher's Lineare Diskriminanzfunktion*“, welche zur Klassifizierung der unabhängigen Variablen genutzt werden kann (BACKHAUS ET AL. 2000). Die Funktionen lassen sich im vorliegenden Fall allgemein in der Form von Gleichung 3-9 darstellen:

$$[3-9] \quad D = a_n + b_n * X$$

a: Konstante

b: Diskriminanzkoeffizient

X: Wert der erklärenden Variablen

Unter Verwendung von *Fisher's linearer Diskriminanzfunktion* als Klassifikationsvorschrift kann die direkte Zuordnung nicht klassifizierter Merkmalswerte zu einer der vorgegebenen Gruppen erfolgen. Die Anwendung der Klassifizierungsfunktion direkt auf die Merkmalswerte setzt allerdings voraus, dass annähernd gleiche Streuung innerhalb der Gruppen unterstellt werden kann (BACKHAUS ET AL. 2000).

Anhand der Klassifikationsgenauigkeit, die mit der Diskriminanzfunktion erzielt wird, kann die Güte des Modells beurteilt werden. In der Klassifizierungsmatrix wird die tatsächliche Gruppenzugehörigkeit mit der diskriminanzanalytisch ermittelten verglichen, und eine Trefferquote berechnet. Wird die Trefferquote auf Basis derselben Stichproben berechnet, die der Schätzung der Diskriminanzfunktion dienten (Resubstitutions-Methode), so ist sie im allgemeinen optimistisch überhöht (ERB 1990). Eine fast unverzerrte Schätzung der Trefferquote wird dagegen durch die *Leave-one-out* Kreuzvalidierung geliefert (FRIEDL & STAMPFER 2001). Sie dient u.a. auch zum Testen der prognostischen Fähigkeit des Modells (ERB 1990).

## 4 Ergebnisse

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Analyse des Informationspotenzials multi-dimensionaler SAR-Daten für die teilschlagspezifische Landbewirtschaftung. Um einen Vergleich verschiedener Fernerkundungssysteme zu ermöglichen, wurden zeitgleich zu den Radardaten Farb-Infrarot-Luftbilder untersucht.

Der Schwerpunkt der Arbeit lag auf der Analyse der Zusammenhänge zwischen Fernerkundungsinformation und räumlicher Variabilität von Bestandesdichte und Biomasse. Insbesondere wurde der Informationszugewinn durch simultan aufgezeichnete Radarkanäle unterschiedlicher Wellenlängen und Polarisationen im Vergleich zu einkanaligen Aufnahmesystemen untersucht.

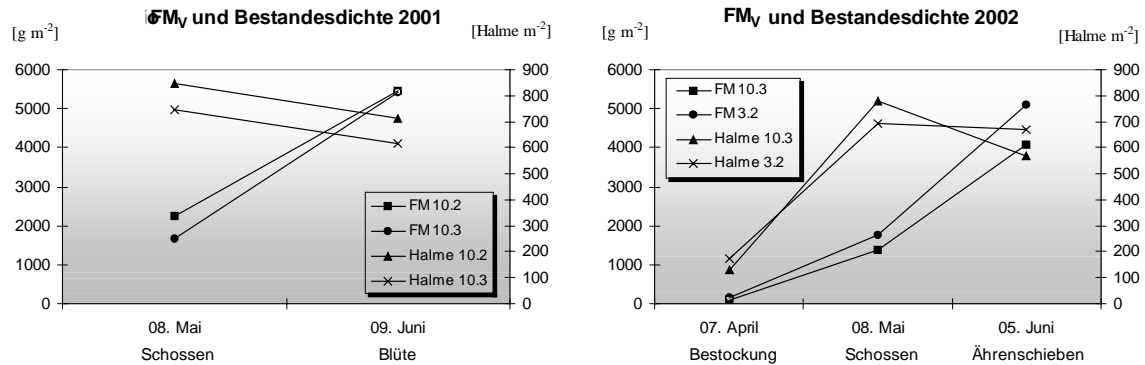
In Kapitel 4.1 und 4.2 werden neben der statistischen Analyse der Referenzdaten der Testflächen auch Qualität und Ausprägung der Bilddaten beschrieben. In Kapitel 4.3 wird die Variation der Radarrückstreuung zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten analysiert. Abschließend werden in Kapitel 4.4 Zusammenhänge zwischen der räumlichen Variabilität der Bestandesmerkmale und der Fernerkundungsinformation untersucht.

### 4.1 Deskriptive Statistik der Bestandesmerkmale

In diesem Kapitel wird ein deskriptiver Überblick über die Variabilität des Wachstums der untersuchten Winterweizenbestände in Neetzow zu verschiedenen Aufnahmetermen gegeben. Es war das Ziel der vorliegenden Arbeit, mittels Radarbilddaten vorliegende Bestandesheterogenitäten zu erfassen. Aus diesem Grund werden nachfolgend die Ergebnisse der Ground-Truth-Kampagnen der Jahre 2001 und 2002 zusammengefasst dargestellt. Die vollständige Aufstellung der erhobenen Werte an jeder einzelnen Probenahmestelle befindet sich im Anhang (Tab. A-3a-d, Tab. A-4a-f).

Eine Übersicht der Entwicklung von frischer Biomasse ( $FM_v$ ) und Bestandesdichte in den Untersuchungszeiträumen ist in Abbildung 4-1 dargestellt. In den Tabellen 4-1 bis 4-4 sind die Minima, Maxima, die arithmetischen Mittel, die Standardabweichungen sowie die Variationskoeffizienten aller Vegetations- und Bodenparameter aufgeführt. Die

Untersuchungen erstreckten sich über die vier verschiedenen Entwicklungsstadien Bestockung, Schossen, Ährenschieben und Blüte des Winterweizens hinweg.



**Abb. 4-1:** Entwicklung frischer Biomasse ( $FM_V$ ) und Bestandesdichte (Halme) von Winterweizen auf den Testflächen 10.2, 10.3 und 3.2 in Neetzow (Originaldaten befinden sich im Anhang: Tab. A-3a-d, Tab. A-4a-f).

Abbildung 4-1 zeigt auf allen Testflächen einen Anstieg der frischen Biomasse des Weizens im Entwicklungsverlauf. Die Bestandesdichte nahm dagegen in der ersten Entwicklungsphase zu und im Verlauf des Schossens ab (Abb. 4-1, rechts). Es wird deutlich, dass die Veränderungen in den verschiedenen Beständen nicht einheitlich verliefen, und Unterschiede in der Menge an frischer Biomasse und Bestandesdichte vorlagen.

Im Jahr 2001 lag auf 10.2 sowohl zum Zeitpunkt des Schossens (08. Mai – BBCH 32) als auch zu Beginn der Blüte (09. Juni – BBCH 59-61) ein um 12-13 % dichter Bestand als auf 10.3 vor. Die Variationskoeffizienten ( $v$ ) lassen erkennen, dass beide Weizenbestände während des Schossens eine stark unterschiedliche Variabilität in der Bestandesdichte aufwiesen (Tab. 4-1, Tab. 4-2). Der Variationskoeffizient war auf 10.3 mit  $v = 27\%$  nahezu doppelt so hoch wie auf 10.2 ( $v = 14\%$ ). Ergänzend hierzu sind in Abbildung 4-2 die Extreme der Bestandesdichten auf beiden Testflächen abgebildet.

Die Variabilität der frischen Biomasse war zum Zeitpunkt des Schossens ebenfalls auf 10.3 höher als auf 10.2 ( $v = 21\%$  vs.  $18\%$ ). Sie näherte sich jedoch im Entwicklungsverlauf der Weizenbestände auf einen nahezu identischen Variationskoeffizienten ( $v = 16\%$  vs.  $v = 17\%$ ) an (Tab. 4-1, Tab. 4-2). Der prozentuale Bedeckungsgrad (BG) verdeutlicht, dass zu beiden Aufnahmetermen eine hohe, aber nicht vollständige Bodenbedeckung vorlag.

**Tab. 4-1:** Deskriptive Statistik der Boden- und Vegetationsparameter der Testfläche 10.3 in Neetzow (2001, Winterweizen).

10.3 2001	Boden			Vegetation						
	FM <sub>B</sub> [g]	TM <sub>B</sub> [g]	WG <sub>B</sub> [Vol-%]	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	WG <sub>V</sub> [%]	Höhe [cm]	Halme m <sup>-2</sup>	BG [%]	BBCH
08. Mai 2001 (BBCH 32 - Schossen )										n=18
Minimum	276	262	7,2	816	139	77,4	39	476	63	n.e.
Maximum	320	301	15,3	2438	409	83,9	45	1388	89	n.e.
Mittelwert	297	279	11,2	1661	299	81,9	42	744	76,4	n.e.
σ	12,6	11,4	2,8	359	60,9	1,6	2	202	7,5	n.e.
v [%]	4,25	4,1	25,0	21,6	20,4	2	5	27	9,9	n.e.
09. Juni 2001 (BBCH 59-61 – Beginn der Blüte)										n=19
Minimum	251	231	5,8	4066	933	75,9	70	476	82,9	n.e.
Maximum	314	293	15,5	7747	1407	81,8	92	856	93,5	n.e.
Mittelwert	287	272	9,4	5413	1142	78,7	80	618	89,2	n.e.
σ	15,0	17,1	3,2	896	134	1,6	5	100	3,5	n.e.
v [%]	5,24	6,27	34,5	16,6	11,8	2,0	6	16	3,9	n.e.

FM<sub>B</sub>: Bodenfrischgewicht, TM<sub>B</sub>: Bodentrockengewicht, WG<sub>B</sub>: volumetrische Bodenfeuchte, FM<sub>V</sub>: Biomasse Frischgewicht, TM<sub>V</sub>: Biomasse Trockengewicht, WG<sub>V</sub>: Pflanzenwassergehalt, BG: Bedeckungsgrad, BBCH: Wachstumsstadium, v [%]: Variationskoeffizient, σ: Standardabweichung, n.e.: nicht erhoben

**Tab. 4-2:** Deskriptive Statistik der Boden- und Vegetationsparameter der Testfläche 10.2 in Neetzow (2001, Winterweizen).

10.2 2001	Boden			Vegetation						
	FM <sub>B</sub> [g]	TM <sub>B</sub> [g]	WG <sub>B</sub> [Vol-%]	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	WG <sub>V</sub> [%]	Höhe [cm]	Halme m <sup>-2</sup>	BG [%]	BBCH
08. Mai (BBCH 32 - Schossen)										n=14
Minimum	278	262	9,0	1632	296	80,6	43	648	71,0	n.e.
Maximum	332	307	15,7	3003	518	83,5	50	1048	83,0	n.e.
Mittelwert	305	284	11,9	2246	394	82,4	46	849	78,5	n.e.
σ	19,9	15,8	2,2	404	70,0	0,8	2	120	3,8	n.e.
v [%]	6,52	5,55	18,4	18,0	17,8	0,9	5	14	4,9	n.e.
09. Juni (BBCH 59-61 – Beginn der Blüte)										n=14
Minimum	272	260	5,8	3737	895	76,1	80	492	80,8	n.e.
Maximum	318	294	15,0	6843	1387	81,4	90	908	91,9	n.e.
Mittelwert	292	275	10,3	5458	1152	78,6	85	714	86,6	n.e.
σ	14,6	11,5	3,4	1007	154	2,1	3	119	3,9	n.e.
v [%]	5,01	4,16	33,4	18,5	13,3	2,7	4	17	4,5	n.e.

FM<sub>B</sub>: Bodenfrischgewicht, TM<sub>B</sub>: Bodentrockengewicht, WG<sub>B</sub>: volumetrische Bodenfeuchte, FM<sub>V</sub>: Biomasse Frischgewicht, TM<sub>V</sub>: Biomasse Trockengewicht, WG<sub>V</sub>: Pflanzenwassergehalt, BG: Bedeckungsgrad, BBCH: Wachstumsstadium, v [%]: Variationskoeffizient, σ: Standardabweichung, n.e.: nicht erhoben

Die Variabilität des Bodenwassergehaltes war zu Beginn der Untersuchung (08. Mai 2001) auf beiden Testflächen mit  $v > 18\%$  relativ stark ausgeprägt und erfuhr durch die Abtrocknung zum zweiten Aufnahmetermin hin eine weitere Zunahme auf  $v > 33\%$  (Tab. 4-1, Tab. 4-2).



**Abb. 4-2:** Senkrechtaufnahmen der Winterweizenbestände auf den Testflächen in Neetzow vom Mai 2001. A und B: Min. und Max. der Bestandesdichte auf 10.3. C und D: Min. und Max. der Bestandesdichte auf 10.2.

Im Jahr 2002 unterschieden sich die Bestände auf den Testflächen 10.3 und 3.2 über den gesamten Entwicklungsverlauf hinweg. Dies äußerte sich durchgängig in den absoluten Werten der Bestandesmerkmale, aber auch in deren Variabilität (Tab. 4-3, Tab. 4-4).

Während der Bestockung (07. April – BBCH 22-26) zeigten beide Bestände nur geringe Unterschiede hinsichtlich ihrer Bestandesdichte und frischer Biomasse. Auf 10.3 wurden für beide Merkmale geringere Werte gemessen als auf 3.2, wobei deren Variabilität auf beiden Testflächen nahezu identisch war.

Im weiteren Verlauf der Bestandesentwicklung nahm die Unterschiedlichkeit beider Weizenbestände zu. Während die Variabilität der Bestandesdichte auf 3.2 zum Zeitpunkt des Schossens (08. Mai – BBCH 31-33) auf nahezu gleichem Niveau geblieben war ( $v = 14\%$ ), stieg sie auf 10.3 auf  $v = 25\%$  an. Wie aus den Tabellen 4-3 und 4-4 zu ersehen ist, war die mittlere Bestandesdichte auf 10.3 um ca. 90 Halme höher als auf 3.2 (780 vs. 693 Halme pro  $m^2 \cong ca. 11\%$ ). Der Aufwuchs an frischer Biomasse war hingegen auf 10.3 weiterhin geringer. Die Variabilität dieses Merkmals nahm im Vergleich zum Vormonat in beiden Beständen ab, blieb aber auf 10.3 ( $v = 23\%$ ) höher als auf 3.2 ( $v = 14,7\%$ ).

**Tab. 4-3:** Deskriptive Statistik der Boden- und Vegetationsparameter der Testfläche 10.3 in Neetzow (2002, Winterweizen).

10.3 2002	Boden			Vegetation						
	FM <sub>B</sub> [g]	TM <sub>B</sub> [g]	WG <sub>B</sub> [Vol-%]	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	WG <sub>V</sub> [%]	Höhe [cm]	Halme m <sup>-2</sup>	BG [%]	BBCH
07. April (Bestockung BBCH 22-26)										<i>n</i> =26
Minimum	134	124	4,5	54,4	17,6	58,2	10	88	11,3	22
Maximum	171	155	12,9	155	53,4	70,7	13	160	44,4	26
Mittelwert	153	140	8,7	93,5	32,9	64,8	11	130	30,7	23
σ	10,6	9,20	2,3	27,0	9,7	3,0	1	15	10,0	n.e.
v [%]	6,95	6,60	26,3	28,9	29,3	4,7	6	12	32,6	n.e.
08. Mai (Schossen BBCH 31-32)										<i>n</i> =26
Minimum	144	120	12,2	884	107	85,7	34	556	49,1	31
Maximum	190	167	20,0	2152	265	87,9	43	1488	84,3	32
Mittelwert	170	145	14,8	1391	184	86,8	39	780	70,9	31
σ	12,2	12,3	2,6	320	42,4	0,6	3	194	9,2	n.e.
v [%]	7,2	8,50	17,5	23,0	23,1	0,7	7	25	13,0	n.e.
05. Juni (Ährenschieben BBCH 47-61)										<i>n</i> =25
Minimum	109	105	1,8	2768	635	75,3	62	372	82,1	47
Maximum	163	147	12,5	5576	1020	82,9	84	836	95,2	61
Mittelwert	141	132	5,7	4075	841	79,1	68	566	89,1	55
σ	12,0	10,3	3,2	712	101	1,9	5	131	3,6	n.e.
v [%]	8,55	7,80	55,9	17,5	12,0	2,4	8	23	4,1	n.e.

FM<sub>B</sub>: Bodenfrischgewicht, TM<sub>B</sub>: Bodentrockengewicht, WG<sub>B</sub>: volumetrische Bodenfeuchte, FM<sub>V</sub>: Biomasse Frischgewicht, TM<sub>V</sub>: Biomasse Trockengewicht, WG<sub>V</sub>: Pflanzenwassergehalt, BG: Bedeckungsgrad, BBCH: Wachstumsstadium, v [%]: Variationskoeffizient, σ: Standardabweichung, n.e.: nicht erhoben

Zum Stadium des Ährenschiebens (05. Juni - BBCH 55) hatte die Bestandesdichte auf 10.3 von 780 Halmen auf 566 Halme pro  $m^2$  bei gleichbleibender Variabilität ( $v = 23\%$ ) abgenommen (Tab. 4-3). Dagegen blieb sie auf 3.2 im Vergleich zum Schossen mit 670 Halmen pro  $m^2$  im Mittel nahezu unverändert, verringerte sich aber in ihrer Variabilität auf



v = 8 % (Tab. 4-4). Der Zuwachs an Biomasse setzte sich mit der Bestandesentwicklung fort, wobei die Variabilität des Massenzuwachses weiter abnahm.

**Tab. 4-4:** Deskriptive Statistik der Boden- und Vegetationsparameter der Testfläche 3.2 in Neetzow (2002, Winterweizen).

3.2 2002	Boden			Vegetation						
	FM <sub>B</sub> [g]	TM <sub>B</sub> [g]	WG <sub>B</sub> [Vol-%]	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	WG <sub>V</sub> [%]	Höhe [cm]	Halme m <sup>2</sup>	BG [%]	BBCH
07. April (Bestockung BBCH 22-25)										n=12
Minimum	119	107	7,8	79,5	23,8	65,3	10	140	40,2	22
Maximum	173	157	14,6	220	67,0	70,8	12	212	56,1	25
Mittelwert	146	130	11,2	153	48,4	68,5	11	175	50,6	24
σ	15,7	14,7	1,9	38,7	12,9	1,4	1	22	5,4	n.e.
v [%]	10,8	11,4	17,3	25,3	26,7	2,1	7	12	10,6	n.e.
08. Mai (Schossen BBCH 31-33)										n=17
Minimum	153	129	14,5	1168	183	84,3	41	488	57,4	31
Maximum	184	155	18,8	2272	309	87,5	49	860	85,7	33
Mittelwert	171	143	16,2	1770	247	86,0	44	693	75,6	32
σ	9,01	7,93	1,3	260	29,2	0,8	2	96	7,6	n.e.
v [%]	5,26	5,53	8,1	14,7	11,9	0,9	5	14	10,0	n.e.
05. Juni (Ährenschieben BBCH 55)										n=17
Minimum	133	119	9,1	4064	747	75,2	82	528	82,4	55
Maximum	180	164	12,8	6208	1282	82,1	91	752	89,5	55
Mittelwert	155	138	10,8	5116	997	80,5	86	670	85,9	55
σ	13,9	12,9	1,0	537	115	1,6	2	55	2,4	n.e.
v [%]	8,94	9,36	9,0	10,5	11,5	2,0	3	8	2,8	n.e.

FM<sub>B</sub>: Bodenfrischgewicht, TM<sub>B</sub>: Bodentrockengewicht, WG<sub>B</sub>: volumetrische Bodenfeuchte, FM<sub>V</sub>: Biomasse Frischgewicht, TM<sub>V</sub>: Biomasse Trockengewicht, WG<sub>V</sub>: Pflanzenwassergehalt, BG: Bedeckungsgrad, BBCH: Wachstumsstadium, v [%]: Variationskoeffizient, σ: Standardabweichung, n.e.: nicht erhoben

Der Bodenwassergehalt variierte im gesamten Untersuchungszeitraum 2002 zwischen 5,7 % und 16,2 % (Tab. 4-3, Tab. 4-4). Die Testfläche 10.3 erwies sich im Mittel durchgängig als trockenerer Standort mit einer weitaus höheren Variabilität der Bodenfeuchte (max. v = 56 %) im Vergleich zu 3.2. Erst zum Stadium des Ährenschiebens war der Boden mit einem durchschnittlichen Bedeckungsgrad von > 86 % auf beiden Testflächen nahezu vollständig mit Vegetation bedeckt.

Zusammenfassend geht aus der statistischen Analyse der Ground-Truth-Daten verschiedener Aufnahmezeitpunkte hervor, dass sich die jeweiligen Weizenbestände in ihrer schlaginternen Bestandesvariabilität unterschieden. Die Stichprobenahme spiegelte insbesondere für die Bestandesmerkmale frische Biomasse und Bestandesdichte eine hohe Heterogenität wider. Die Annahme der Normalverteilung von Boden- und

Vegetationsmerkmalen war bis auf geringe Unsicherheiten weitestgehend gerechtfertigt (Tab. 4-5).

**Tab. 4-5:** Test auf Normalverteilung der Boden- und Bestandesmerkmalen des Winterweizens auf den Testflächen in Neetzow in den Jahren 2001/02 (Asymptotische Signifikanz des Kolmogorov-Smirnov-Tests,  $\alpha=0,05$ ).

Testfläche Aufnahmedatum	10.2		10.3		10.3			3.2		
	Mai 01 <i>n</i> =14	Juni 01 <i>n</i> =14	Mai 01 <i>n</i> =18	Juni 01 <i>n</i> =19	April 02 <i>n</i> =26	Mai 02 <i>n</i> =26	Juni 02 <i>n</i> =25	April 02 <i>n</i> =12	Mai 02 <i>n</i> =18	Juni 02 <i>n</i> =18
FM <sub>B</sub> [g]	0,86	0,60	0,94	0,87	0,93	0,44	0,74	1,00	0,69	0,99
TM <sub>B</sub> [g]	0,87	0,91	0,89	0,94	0,84	0,17	0,85	1,00	0,96	0,97
WG <sub>B</sub> [%]	0,83	0,84	0,48	0,19	0,50	0,21	0,28	0,97	0,82	0,93
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,94	0,84	0,94	0,92	0,81	0,58	0,72	0,90	0,96	0,99
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,97	0,96	0,98	0,63	0,68	0,96	0,86	0,86	0,79	0,62
WG <sub>V</sub> [%]	0,98	0,64	0,88	1,00	0,99	0,96	0,93	0,90	0,72	0,54
Höhe [cm]	0,60	0,76	0,10	0,71	0,00	0,56	0,44	0,10	0,75	0,67
Halme [m <sup>-2</sup> ]	1,00	0,98	0,44	0,85	0,40	0,64	0,72	0,77	1,00	0,73
BG [%]	0,18	0,55	0,92	0,03	0,55	0,90	0,48	0,76	0,51	0,44

FM<sub>B</sub>: Bodenfrischgewicht, TM<sub>B</sub>: Bodentrockengewicht, WG<sub>B</sub>: volumetrische Bodenfeuchte, FM<sub>V</sub>: Biomasse Frischgewicht, TM<sub>V</sub>: Biomasse Trockengewicht, WG<sub>V</sub>: Pflanzenwassergehalt, BG: Bedeckungsgrad  
Allgemein gilt: Je höher der Signifikanzwert ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit der Normalverteilung der Daten

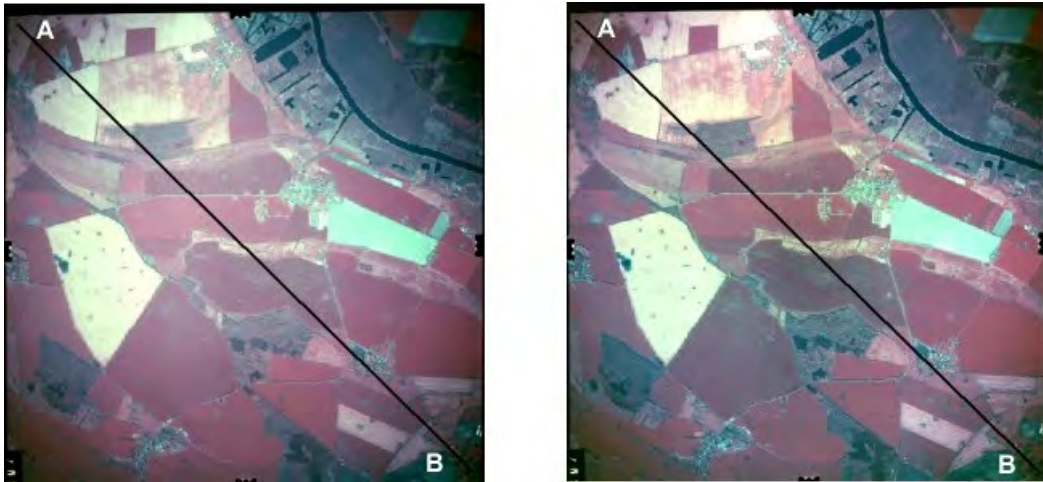
## 4.2 Qualität der Fernerkundungsdaten

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Vorprozessierung von Luftbildern (Kap. 4.2.1) und Radarbilddaten (Kap. 4.2.2) einer Qualitätskontrolle unterzogen.

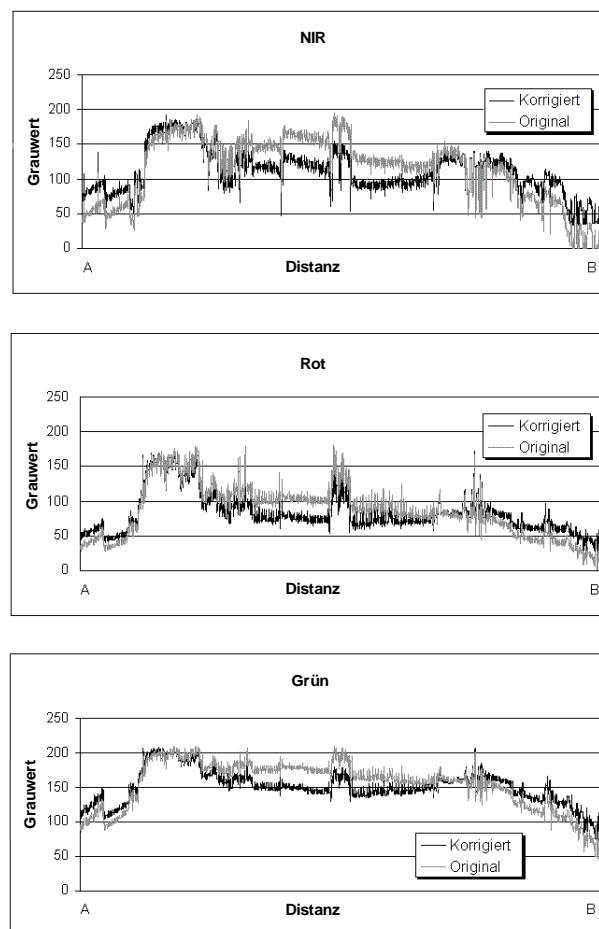
### 4.2.1 Qualität der vorprozessierten Luftbilder

Radiometrische und geometrische Korrekturen wurden vorgenommen, um das Bildmaterial auf höchstmögliches Qualitätsniveau zu bringen. Zu diesen Verarbeitungsschritten gehörten die Korrektur des Helligkeitsrandabfalls (Belichtungskorrektur) und die Orthokorrektur (Kap. 3.4.1). In Abbildung 4-3 ist das Ergebnis der Belichtungskorrektur exemplarisch am Beispiel der Luftbildaufnahme von Neetzow vom 08. Mai 2002 dargestellt. Die Abbildung zeigt den Helligkeitsausgleich zwischen dem überstrahlten Bildmittelpunkt und den Randbereichen, insbesondere den Ecken.

Die Korrekturunterschiede im Vergleich der einzelnen Spektralkanäle werden in der grafische Darstellung der Grauwerte in Abbildung 4-4 deutlich. Die Distanz auf der X-Achse entspricht dabei der Distanz entlang der Diagonalen von A nach B in Abbildung 4-3.



**Abb. 4-3:** Korrektur des Helligkeitsrandabfalls; links: CIR-Luftbild vor der Korrektur; rechts: CIR-Luftbild nach der Korrektur (Aufnahmedatum: 08.05.2002; Neetzow, CIR: color-infrarot).



**Abb. 4-4:** Grauwertdifferenz zwischen dem belichtungskorrigierten Luftbild und der Originalaufnahme je spektralem Aufnahmekanal entlang einer Diagonalen von A nach B (Abb. 4-3).

Eine vollständige Kompensation der radiometrischen Verzerrungen war durch das Korrekturverfahren nicht möglich, so dass der Helligkeitsrandabfall in verringertem Ausmaß weiterhin vorhanden war. Er war jedoch im Rahmen der weiteren Bildauswertung von geringer Relevanz, da sich die Testflächen fast ausschließlich im Bildzentrum befanden. Lediglich in der Luftbildaufnahme vom 08. Mai 2001 grenzten die Testflächen an den zentralen linken Bildrand. Das überstrahlte Bildzentrum wurde weitestgehend radiometrisch korrigiert. Innerhalb der Testfläche 10.3 waren keine gerichteten Helligkeitsunterschiede festzustellen, wohingegen innerhalb der Testflächen 10.2 (08. Mai 2001) und 3.2 (05. Juni 2002) weiterhin geringe radiometrische Verzerrungen vorlagen.

Die Orthokorrektur der Luftbilder wurde in verschiedenen Schritten durchgeführt (Kap. 3.4.1). Nach der Erstellung einer Masterszene (05. Juni 2002) wurden die weiteren Luftbilder auf diese ko-registriert. Für die Qualitätsbeurteilung der Orthokorrektur wurde der RMS-Fehler verwendet. Dieser lag für alle Luftbilder deutlich unter 1 (Tab. 4-6), wodurch die Abweichung der berechneten Koordinaten kleiner als ein Bildpixel war. Bei einer Pixelauflösung von 0,5 m war der Lagefehler somit geringer als ein halber Meter und für landwirtschaftliche Fragestellungen als hinreichend anzusehen (MORAN 2000).

**Tab. 4-6:** RMS-Fehler der Orthokorrektur der Luftbilder von Neetzow.

Aufnahmedatum	GCP	Total-RMS	x-RMS	y-RMS	z-RMS
08. Mai 2001	9	0,021	0,537	0,455	0,171
08. Mai 2002	9	0,018	0,295	0,679	0,136
05. Juni 2002	9	0,003	0,056	0,009	0,032

GCP: Ground Control Point (Passpunkt); die Aufnahme vom Juni 2002 wurde als Master für die anschließende Ko-registrierung der weiteren Aufnahmen verwendet

Die absolute Kalibrierung der Luftbilder erfolgte mittels der *Empirical Line Methode* (Kap. 3.4.1) und absolut kalibrierter HyMap<sup>®</sup>-Daten als Referenzreflexion. Die Regressionsergebnisse ( $0.84 < r^2 < 0.99$ ) erwiesen sich für alle drei Spektralkanäle als sehr gut (Tab. 4-7). Die erstellten Streudiagramme sind im Anhang (Abb. A-1a-c) aufgeführt. Die Qualitätskontrolle der Kalibrierungsergebnisse erfolgte visuell anhand der Reflexionskurven verschiedener Vegetationsbedeckungen.

**Tab. 4-7:** Regressionskoeffizienten ( $r^2$ ) der spektralen Kalibrierung der Luftbilder von Neetzow nach der Empirical Line Methode unter Verwendung absolut kalibrierter HyMap<sup>®</sup>-Daten als Referenzreflexion.

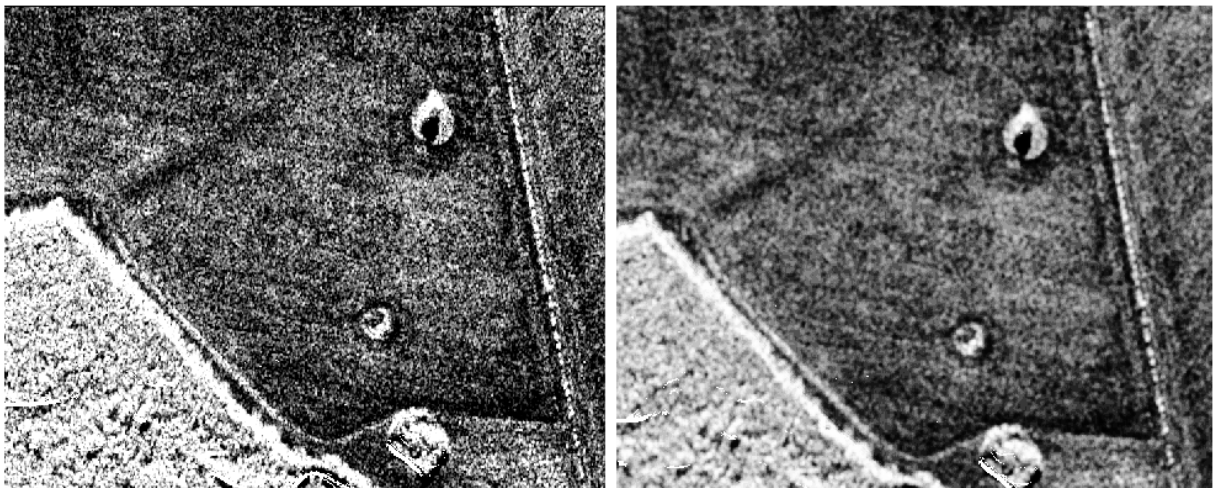
	08. Mai 2001	08. Mai 2002	05. Juni 2002
$n$	4	4	5
Rot	0,89	0,96	0,95
Grün	0,91	0,84	0,96
NIR	0,90	0,99	0,96

$n$ : Anzahl der Referenzflächen

#### 4.2.2 Qualität der vorprozessierten Radardaten

Die durchgeführte Vorverarbeitung bestand aus einer Speckle-Filterung mit dem Frost-Filter mit einer Filtermatrix von 5x5 Pixel und der absoluten Kalibrierung der Rückstreuwerte ( $\sigma^0$ ) unter Berücksichtigung der topografischen Normalisierung (Kap. 3.5.1).

In Abbildung 4-5 ist ein Ausschnitt des Flugstreifens dargestellt, der den Unterschied zwischen gefilterten und nicht gefilterten Daten zeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei Inkaufnahme einer größeren Unschärfe das Bildrauschen minimiert wurde. Homogene Flächen wurden geglättet, während Kanten und feine Strukturen erhalten blieben.

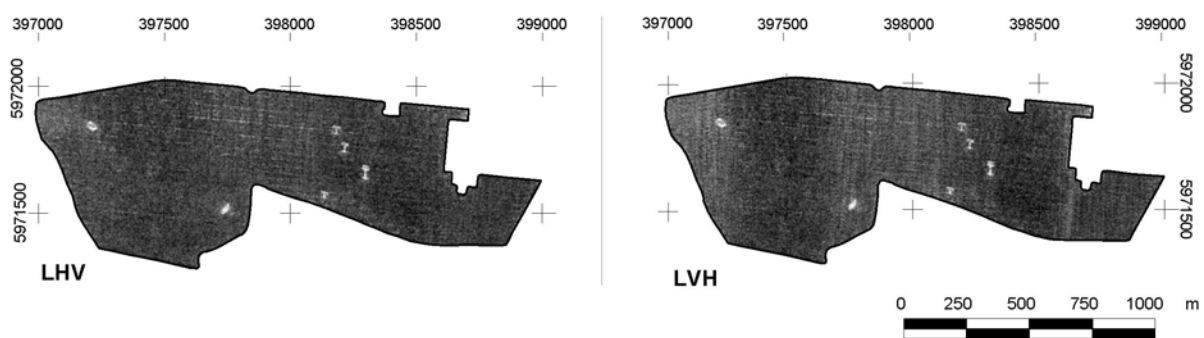


**Abb. 4-5:** Ergebnis der Speckle-Filterung (5x5 Frost-Filter). Links: Sigma-naught ( $\sigma^0$ ) kalibriertes Radarbild ohne vorherige Speckle-Filterung; Rechts: gefiltertes Sigma-naught ( $\sigma^0$ ) kalibriertes Radarbild (Ausschnitt des Aufnahmestreifens der X-VV Polarisation vom 09. Juni 2001, Teilbereich der Testfläche 10.3 in Neetzow).

Die absolute Kalibrierung der Radardaten in  $\sigma^0$ -Werte wurde mit einem dafür entwickelten Modell durchgeführt (Kap. 3.5.1). Hinsichtlich der Qualität der absoluten Kalibrierung wurden vom DLR  $\pm 1,5$  dB für das L-Band und  $\pm 1$  dB für das X-Band angegeben. Im Zuge der

Kalibrierung wurden Reliefeinflüsse weitestgehend korrigiert, und systembedingte *Near-Far-Range*-Effekte minimiert. Einzelne Bereiche des Radarbildes, die im Radarschatten bzw. *Layover*-Bereich lagen (Kap. 2.3.1), spielten für die Auswertung der Radardaten keine Rolle, da sie sich nicht innerhalb der Testflächen befanden.

Die Bilddaten der Kreuz-Polarisationen L-HV und L-VH beider Aufnahmetermine des Jahres 2001 wiesen eine systematische, vertikale Streifung auf, die zu fehlerhaften Grauwerten führte. In Abbildung 4-6 ist dieser Prozessierungsfehler exemplarisch am Beispiel der Aufnahme vom 09. Juni 2001 dargestellt. In welchem Ausmaß diese fehlerhafte Datenprozessierung die Analyseergebnisse beeinträchtigte, ließ sich jedoch nicht beurteilen.



**Abb. 4-6:** Prozessierungsfehler in den Radaraufnahmen von 2001 (hier: Testfläche 10.2 am 09. Juni) in den Kreuz-Polarisationen des L-Bandes, welcher als senkrechte Streifung erkennbar ist (WGS 84, UTM Zone 33).

### 4.3 Zeitliche Variabilität der Fernerkundungsdaten

In diesem Kapitel werden die schlagspezifischen Reflexionssignale der Luftbilder und der Radarbilddaten hinsichtlich ihrer Ausprägung statistisch analysiert, und die zeitliche Variabilität der spektralen Signatur untersucht. Zum einen werden die spektralen Signaturen beider Bestände zum gleichen Aufnahmezeitpunkt verglichen, und zum anderen wird die Veränderung der spektralen Signatur des Bestandes einer Testfläche über den Vegetationszeitraum hinweg untersucht.

#### 4.3.1 Analyse des NDVI zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten

Tabelle 4-8 gibt einen Überblick über Ausprägung und Variabilität der extrahierten NDVI-Werte an den korrespondierenden Probenahmestellen. Die Tabelle zeigt, dass der NDVI

innerhalb der Bestände zu allen Aufnahmezeitpunkten, mit Ausnahme von 10.3 am Aufnahmetag 08. Mai 2001, nur wenig variierte (zwischen  $v$  3,0 % und 7,3 %). Dagegen wies 10.3 an diesem Termin einen Variationskoeffizienten von  $v = 22,4$  % auf. Im Jahr 2002 nahm der mittlere NDVI auf 10.3 mit fortschreitender Vegetationsentwicklung zu, wohingegen er auf 3.2 abnahm. Der Vergleich der beiden Jahren zu einem bezüglich des Entwicklungsstadiums des Weizenbestandes vergleichbaren Aufnahmetag (08. Mai 2001 vs. 08. Mai 2002) zeigte für beide Testflächen voneinander abweichende Werte. Im Jahr 2002 lagen im Mittel höhere NDVI-Werte vor als im Jahr 2001 (Tab. 4-8).

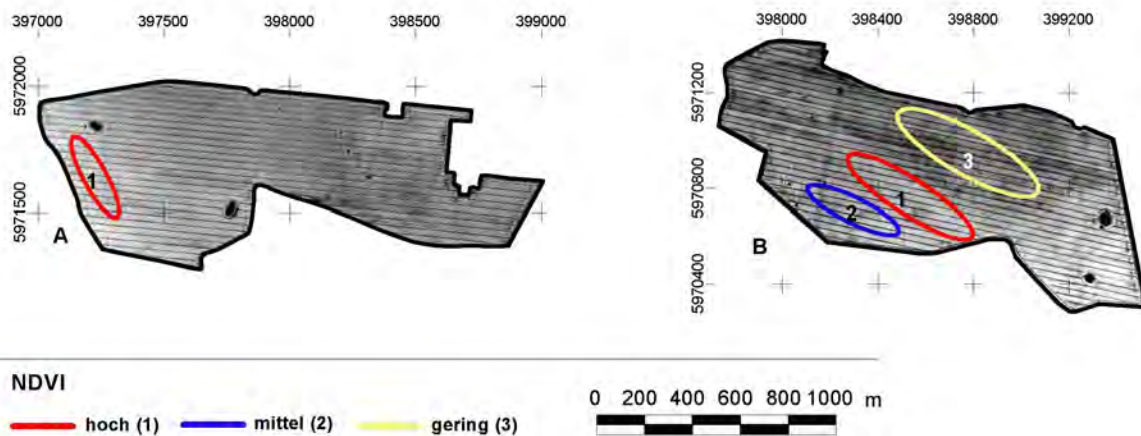
**Tab. 4-8:** Zusammenfassung der statistischen Maßzahlen des NDVI von Winterweizen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten auf den Testflächen in Neetzow.

Datum	Testfläche	$n$	Minimum	Maximum	Mittelwert	Range	$\sigma$	$v$ [%]
08. Mai 2001	10.2	12	0,393	0,504	0,440	0,111	0,031	6,951
	10.3	15	0,248	0,586	0,423	0,338	0,095	22,38
08. Mai 2002	10.3	26	0,391	0,527	0,472	0,136	0,034	7,087
	3.2	18	0,464	0,544	0,508	0,080	0,024	4,751
05. Juni 2002	10.3	24	0,429	0,569	0,503	0,140	0,037	7,324
	3.2	18	0,406	0,455	0,434	0,049	0,013	3,034

*n*: Stichprobenanzahl, Range: dynamischer Bereich,  $\sigma$ : Standardabweichung,  $v$  [%]: Variationskoeffizient

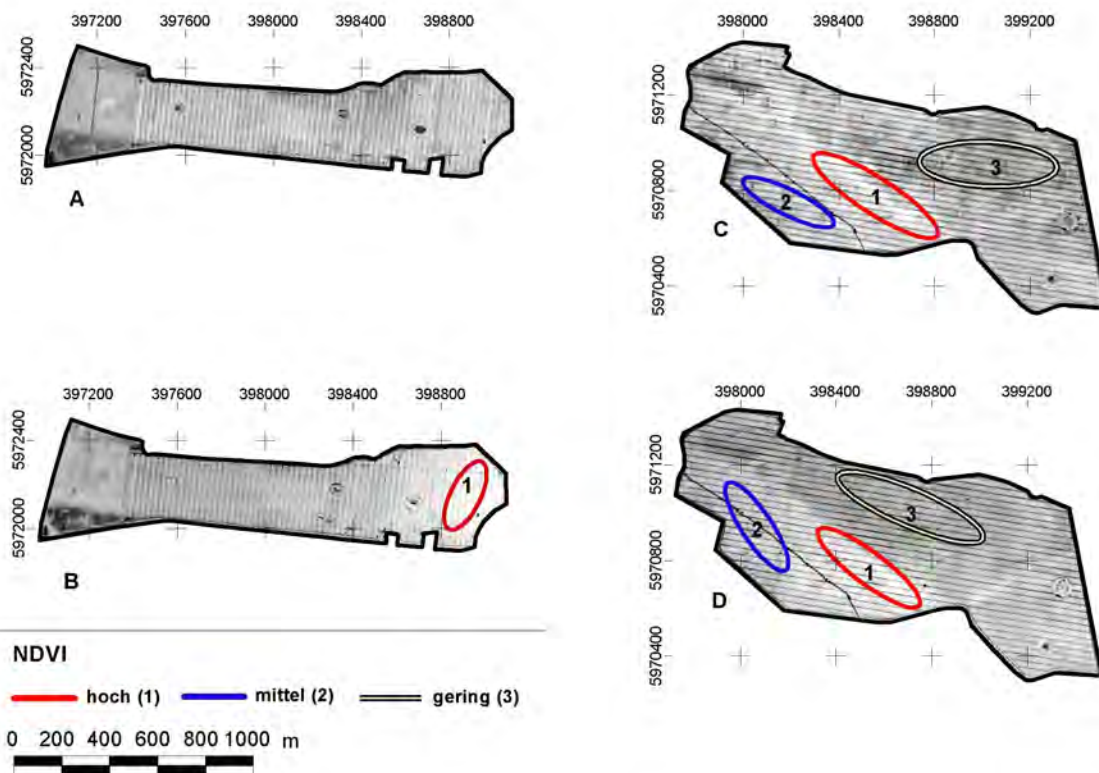
Die visuelle Analyse des NDVI vom 08. Mai 2001 in Abbildung 4-7 verdeutlicht die homogenere Signatur von 10.2 (A). Der linke Randbereich, der durch die Ellipse (1) markiert ist, wies einen erhöhten NDVI auf. Diese Region der Testfläche lag am äußeren Bildrand und war besonders stark durch den radialen Helligkeitsrandabfall beeinträchtigt. Möglicherweise beruhen diese hohen Werte daher auf einer unzureichenden radiometrischen Korrektur (Kap. 4.2.1).

10.3 zeigte dagegen eine deutlich ausgeprägtere Heterogenität bezüglich des NDVI (Abb. 4-7 (B)). Es ließen sich visuell drei Klassen unterschiedlicher NDVI-Werte abgrenzen. Diese Klassen sind in der Abbildung mit Ellipsen unterschiedlicher Farbgebung und Nummerierung gekennzeichnet, um die Ansprache im Text zu vereinfachen. Markant war der von NW nach SO verlaufende, helle Streifen (Ellipse 1), der sehr hohe NDVI-Werte aufwies.



**Abb. 4-7:** Darstellung des NDVI von Winterweizen am 08. Mai 2001 auf den Testflächen in Neetzow. **A:** 10.2 und **B:** 10.3. (Die eingezeichneten Ellipsen dienen der Kenntlichmachung und Ansprache der drei verschiedenen Zonen unterschiedlich hoher NDVI-Werte (hoch, mittel, gering im Text) (WGS 84, UTM Zone 33).

Der NDVI des Jahres 2002 erwies sich für 3.2 als relativ homogen (Abb. 4-8 (A, B)), wobei in der Aufnahme vom 05. Juni 2002 die in Kapitel 4.2.1 erwähnten Störungen erkennbar sind. Dieser Bereich mit hohen NDVI-Werten ist durch die Ellipse (1) markiert (Abb. 4-8 (B)).



**Abb. 4-8:** Darstellung des NDVI von Winterweizen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten im Jahr 2002 auf den Testflächen in Neetzow. **A:** 3.2 am 08. Mai, **B:** 3.2 am 05. Juni, **C:** 10.3 am 08. Mai und **D:** 10.3 am 05. Juni. (Die eingezeichneten Ellipsen dienen der Kenntlichmachung und der besseren Ansprache der drei verschiedenen Zonen unterschiedlich hoher NDVI-Werte (hoch, mittel, gering im Text) (WGS 84, UTM Zone 33).



10.3 zeigte dagegen einen heterogeneren Zustand. Wie im Jahr 2001 (Abb. 4-7 (B)) ließen sich auch in 2002 zu beiden Aufnahmezeitpunkten visuell drei NDVI-Klassen abgrenzen (Abb. 4-8 (C, D)), die in ihrer geografischen Lage im Feld mit denen des Vorjahres übereinstimmten. Der quer über die Testfläche verlaufende helle Streifen (von NW nach SO) trat zu beiden Aufnahmezeitpunkten deutlich hervor (Ellipse 1).

Aus Tabelle 4-9 ist ersichtlich, dass für den NDVI der Weizenbestände mit hoher Wahrscheinlichkeit von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann.

**Tab. 4-9:** Test auf Normalverteilung des NDVI von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow in den Jahren 2001/2002 (Asymptotische Signifikanz des Kolmogorov-Smirnov-Tests,  $\alpha=0,05$ ).

Testfläche	10.2		10.3		3.2	
Termin	08. Mai 2001	08. Mai 2001	08. Mai 2002	05. Juni 2002	08. Mai 2002	05. Juni 2002
Stichproben	$n=12$	$n=15$	$n=26$	$n=24$	$n=18$	$n=18$
NDVI	0,99	1,00	0,79	0,98	0,84	0,95

Allgemein gilt: Je höher der Signifikanzwert ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit der Normalverteilung der Daten

Die einzelnen Werte der Tabelle geben die jeweilige Irrtumswahrscheinlichkeit an, die mit dem Zurückweisen der getesteten Nullhypothese verbunden ist. Die Nullhypothese besagt, dass der NDVI in der Grundgesamtheit einer Normalverteilung folgt. Das Zurückweisen würde demnach mindestens mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 79 % erfolgen (Tab. 4-9).

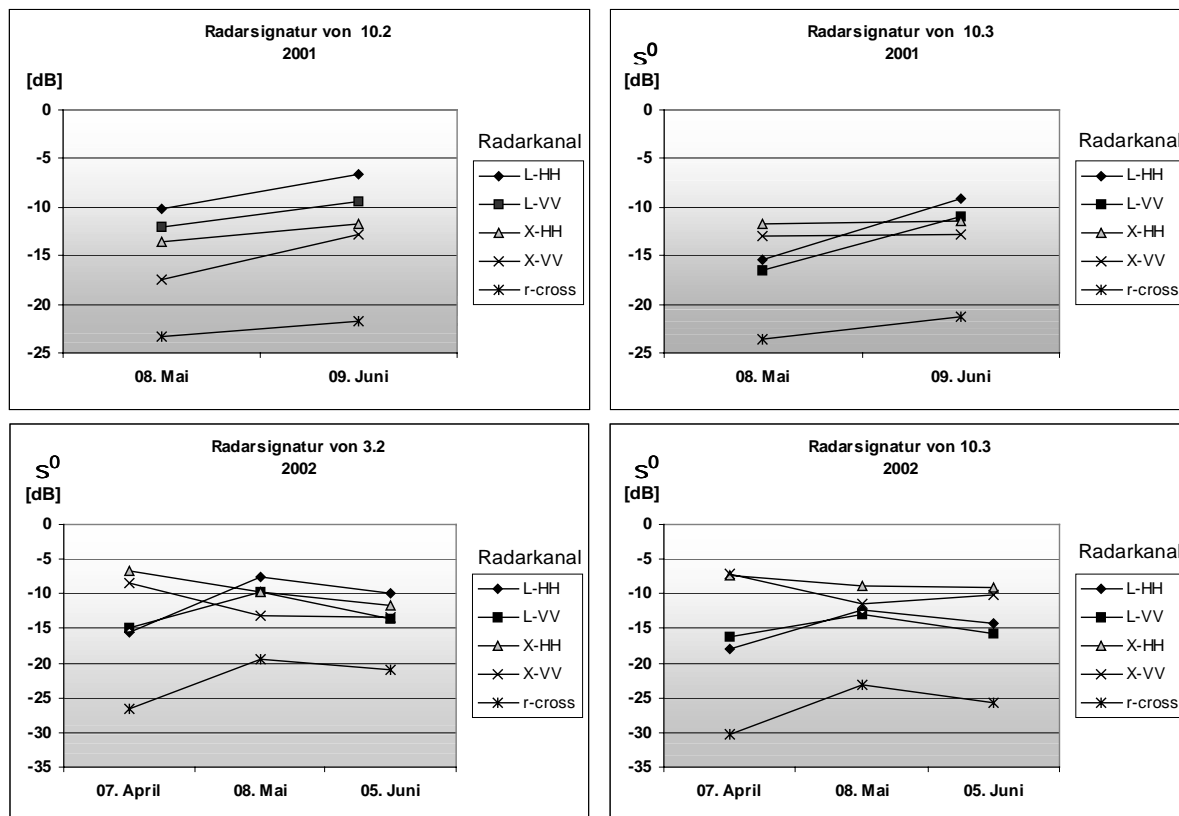
#### 4.3.2 Analyse der Radarsignatur zu verschiedenen Entwicklungsstadien von Winterweizen

Eine quantitative Beschreibung der Radarrückstreuung an den verschiedenen Aufnahmezeitpunkten sowie deren Veränderungen im Entwicklungsverlauf des Winterweizenbestandes erfolgte auf Basis der deskriptiven Parameter Minimum, Maximum, arithmetisches Mittel, Standardabweichung ( $\sigma$ ) sowie anhand der Variationskoeffizienten ( $v$ ). Zusätzlich wurde der dynamische Bereich ( $\sigma_{\max}^0 - \sigma_{\min}^0$ ) der Rückstreukoeffizienten (Range) ermittelt. Die Größenordnung des dynamischen Bereiches vermittelt einen Eindruck über das Potenzial der Radarkanäle<sup>18</sup> zur Erfassung von Unterschieden im Bestand (STEINGIEBER 1997).

<sup>18</sup> Im Rahmen der Arbeit wird von Radarkanal gesprochen, wenn es sich bei der Aussage um die Kombination aus Wellenlänge und Polarisation handelt. Bezieht sich die Aussage lediglich auf die Wellenlänge, so wird der in der Literatur übliche Begriff Radarband verwendet.

Einzelne Probepunkte wurden von der Analyse ausgeschlossen, sofern deren Rückstreuwerte durch Störeinflüsse, wie Fahrstreifen, Hochspannungsleitungen sowie *Radarschatten*, *Layover* oder *Cardinal-Effekt* (Kap. 2.3.1) beeinträchtigt wurden.

Die folgende Abbildung 4-9 zeigt die Veränderung der Radarsignatur (Mittelwert der Rückstreuung einer Testfläche) von Weizenbeständen im Verlauf der Vegetationsentwicklung.



**Abb. 4-9:** Radarsignatur ( $\sigma^0$ ) von Winterweizenbeständen im Entwicklungsverlauf auf den Testflächen in Neetzow in den Jahren 2001/2002. Für die bessere Lesbarkeit der Abbildung wurde anstelle der beiden Kreuz-Polarisationen nur das r-cross ( $(LHV+LVH) \cdot 2^{-1}$ ) als Mittelwert dargestellt.

Die Analyse der Radarsignatur des Jahres 2002 erstreckte sich über drei verschiedene Stadien der Vegetationsentwicklung (Bestockung, Schossen, Ährenschieben). Der generelle Verlauf der Signaturkurven (Abb. 4-9) beider Bestände war vergleichbar. Es lagen jedoch Unterschiede sowohl in der kanalspezifischen Rückstreuintensität als auch im relativen Verhältnis der Kanäle zueinander vor. Die Veränderung der Rückstreuung im L-Band zeigte für alle drei Kanäle einen Anstieg im Zeitraum von der Bestockung (07. April 2002) zum

Schossen (08. Mai 2002). Während des Ährenschiebens (05. Juni 2002) nahm die Rückstreuung hingegen wieder ab.

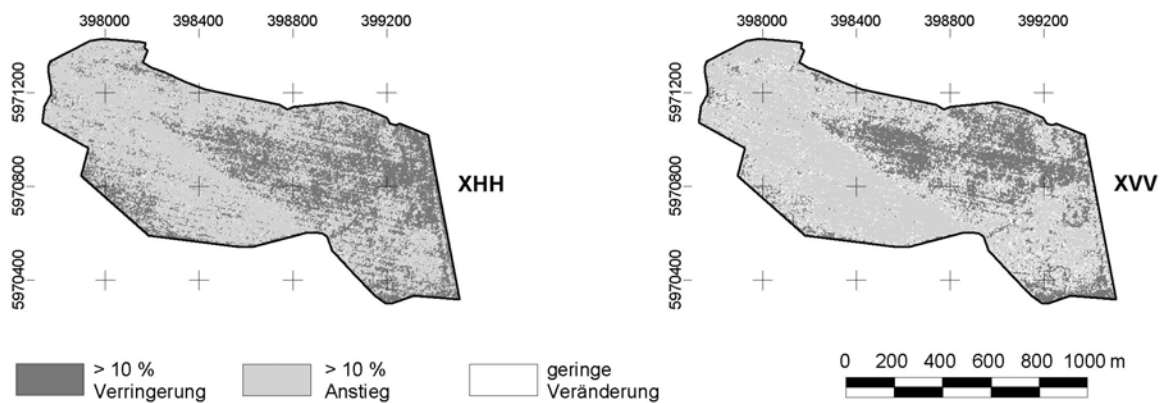
Im Hinblick auf die Rückstreusignatur des X-Bandes unterschieden sich beide Bestände voneinander. Sowohl auf 10.3 als auch auf 3.2 nahm die Rückstreuintensität des X-HH über den gesamten Untersuchungszeitraum 2002 ab. Die Rückstreuung im X-VV dagegen verringerte sich zwar auf beiden Testflächen von der Bestockung zum Schossen, zeigte aber während des Ährenschiebens einen abweichenden Verlauf. Während die Rückstreuintensität des Bestandes von 3.2 auf nahezu gleichem Niveau blieb, stieg sie auf 10.3 an.

Die Signaturkurven des Jahres 2001 unterschieden sich erheblich von denen des Jahres 2002 im entsprechenden Betrachtungszeitraum von Mai bis Juni (Abb. 4-9). Auffällig war hier der Anstieg aller Kanäle des L-Bandes auf beiden Testflächen. Außerdem stieg die Rückstreuung im X-Band auf 10.2 ebenfalls an, wohingegen sie auf 10.3 nahezu keiner Veränderung im Zuge der Bestandesentwicklung unterlag.

Das Verhältnis der Rückstreuintensitäten beider Wellenlängen zueinander war in Abhängigkeit von der Vegetationsentwicklung inkonsistent. Im Vergleich der verschiedenen Bestände konnte zu keinem Entwicklungsstadium des Winterweizens eine eindeutige Aussage über eine höhere Rückstreuintensität der einen oder anderen Wellenlänge getroffen werden (Abb. 4-9). Im Gegensatz dazu verhielten sich die verschiedenen Polarisierungen einer Wellenlänge hinsichtlich ihrer Rückstreuintensität konstant zueinander. Die Rückstreuung der horizontalen Polarisierungen beider Wellenlängen war mit Ausnahme der Bestockungsphase (07. April 2002) zu allen Aufnahmetermen höher als die der vertikalen Polarisierungen. Während der Bestandesentwicklung von der Bestockung zum Schossen kehrte sich die Relation im L-Band von  $\sigma_{L-VV}^0 > \sigma_{L-HH}^0$  zu  $\sigma_{L-HH}^0 > \sigma_{L-VV}^0$  um.

Die Betrachtung der mittleren Rückstreuintensität des Bestandes einer Testfläche ließ außer Acht, dass die Veränderungen im Verlaufe der Zeit auch teilweise einer räumlichen Variabilität und Inkonsistenz unterlagen. In Abbildung 4-10 ist die Veränderung der Rückstreuintensität des X-Bandes im Vergleich der beiden Aufnahmetermine 08. Mai und 09. Juni 2001 exemplarisch für 10.3 dargestellt. Die Abbildung zeigt eindeutig die räumliche Variabilität der Veränderung innerhalb der Testfläche. Obwohl der Vergleich der mittleren Rückstreuintensität an beiden Aufnahmetermen nahezu keine Veränderung erkennen ließ (Abb. 4-9), wurde

deutlich, dass ungeachtet dieser Tatsache Bereiche existierten, in denen die Rückstreuintensität zunahm bzw. abnahm. Im Anhang (Abb. A-2a-f) befinden sich die entsprechenden Abbildungen der anderen Testflächen, welche lediglich eine geringe räumliche Variabilität der Rückstreuintensitätsveränderung aufwiesen.



**Abb. 4-10:** Veränderung der Rückstreukoeffizienten  $\sigma^0_{X-HH}$  und  $\sigma^0_{X-VV}$  des Weizenbestandes auf 10.3 in Neetzow im Vergleich der Radaraufnahmen vom 08. Mai und 09. Juni 2001 (WGS 84, UTM Zone 33).

Der absolute Dynamikbereich des Rückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  über den gesamten Zeitraum von geringer (Bestockung - April 2002) bis hin zu fast vollständiger Bodenbedeckung (Ährenschieben - Juni 2002) war für die Kanäle beider Wellenlängen verschieden. Wie aus Tabelle 4-10 entnommen werden kann, war der Bereich zwischen absolutem Minimum und absolutem Maximum der Rückstreuung (Range) im X-Band auf beiden Testflächen geringer als im L-Band. Vergleicht man den dynamischen Bereich der einzelnen Polarisierungen des L-Bandes miteinander, so wird deutlich, dass er auf beiden Testflächen für den vertikalen Kanal L-VV am geringsten war. Außerdem wies 10.3 den geringeren Dynamikbereich hinsichtlich aller ko-polaren Kanäle auf.

**Tab. 4-10:** Dynamischer Bereich ( $\sigma^0_{\max} - \sigma^0_{\min}$ ) der Rückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  von Winterweizen auf den beiden Testflächen 10.3 und 3.2 in Neetzow.

2002 Radarkanal	10.3			3.2		
	absolutes Minimum	absolutes Maximum	Range	absolutes Minimum	absolutes Maximum	Range
$\sigma^0_{L-HH}$	-20,87	-9,97	10,90	-18,28	-5,54	12,74
$\sigma^0_{L-HV}$	-32,38	-21,17	11,21	-28,07	-17,90	10,17
$\sigma^0_{L-VV}$	-19,40	-10,89	8,51	-16,83	-7,27	9,56
$\sigma^0_{L-VH}$	-32,00	-21,10	10,90	-28,76	-18,00	10,76
$\sigma^0_{X-HH}$	-11,80	-5,54	6,26	-13,77	-5,10	8,67
$\sigma^0_{X-VV}$	-13,63	-5,89	7,74	-15,25	-6,87	8,38
$\sigma^0_{r-cross}$	-32,05	-21,13	10,92	-28,41	-18,18	10,23

Range: dynamischer Bereich, die Absolutwerte beziehen sich auf alle drei Aufnahmetermine des Jahres 2002, r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen

Die vorangegangene Analyse machte die hohe Variabilität der Radarrückstreuung von Winterweizen im Verlauf der Vegetationsperiode deutlich. Im Folgenden wird die Inkonsistenz der Radarrückstreuung an einem Aufnahmeterrain im Vergleich zweier Bestände untersucht. Diese detaillierte Analyse wird exemplarisch am Beispiel des Aufnahmeterrains 08. Mai 2002 während dem Schossen des Winterweizens vorgenommen. Die entsprechenden Daten der anderen Aufnahmezeitpunkte sind tabellarisch im Anhang zusammengestellt (Tab. A-5a-d).

Anhand der deskriptiven Maßzahlen in Tabelle 4-11 wird deutlich, dass sich beide Bestände sowohl in der Rückstreuintensität jedes einzelnen Radarkanals als auch in deren Variabilität unterscheiden.

**Tab. 4-11:** Deskriptive Statistik der Radarrückstreuung  $\sigma^0$  von Winterweizen der Testflächen in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2002.

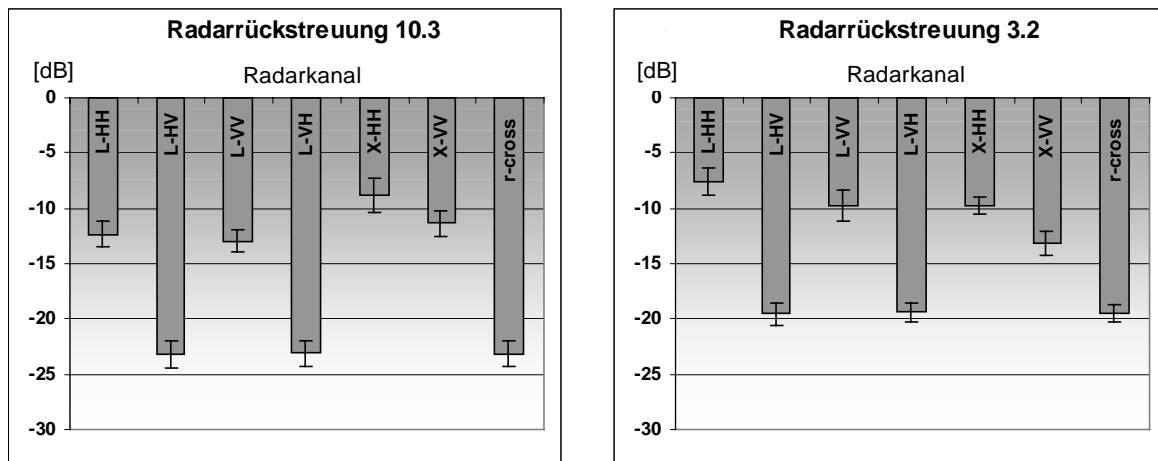
08. Mai 2002	Radarkanal						r-cross
	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	
	-----[dB]-----						
Testfläche 10.3							<i>n</i> = 26
Minimum	-14,6	-25,8	-15,1	-26,0	-11,8	-13,6	-25,9
Maximum	-10,0	-21,2	-10,9	-21,1	-5,7	-9,5	-21,1
Range	4,7	4,6	4,2	4,9	6,1	4,2	4,8
Mittelwert	-12,3	-23,2	-12,9	-23,1	-8,9	-11,4	-23,2
$\sigma$	1,2	1,3	1,0	1,1	1,5	1,1	1,1
<i>v</i> [%]	9,8	5,4	7,6	5,0	17,2	9,7	4,9
Testfläche 3.2							<i>n</i> = 17
Minimum	-10,5	-21,9	-12,5	-21,6	-11,3	-15,0	-21,1
Maximum	-5,5	-17,9	-7,3	-18,0	-8,5	-11,4	-18,2
Range	4,9	4,0	5,2	3,6	2,8	3,5	2,9
Mittelwert	-7,6	-19,6	-9,8	-19,4	-9,8	-13,1	-19,5
$\sigma$	1,2	1,0	1,4	0,9	0,8	1,0	0,9
<i>v</i> [%]	16,1	5,1	13,9	4,7	7,8	7,9	4,3

$\sigma$ : Standardabweichung, *v* [%]: Variationskoeffizient, r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, Range: dynamischer Bereich

Auf 10.3 wies die Rückstreuintensität im X-HH die weitaus größte Variabilität aller Radarkanäle auf ( $v = 17,2\%$ ), wohingegen auf 3.2 die beiden ko-polaren Kanäle des L-Bandes die höchsten Variationskoeffizienten zeigten (Tab. 4-11). Im Vergleich zum Vormonat April 2002 hatte sich die Variabilität des X-Bandes auf 3.2 um 4-6 % verringert, und die des ko-polaren L-Bandes erhöht (4-5 %). Dagegen veränderte sich die Variabilität der Rückstreuung auf 10.3 nur im X-HH und L-VV. Im X-HH lag ein deutlicher Anstieg des Variationskoeffizienten um  $> 6\%$  im Vergleich zum Vormonat vor, wohingegen im L-VV eine Verringerung von 3 % zu verzeichnen war (Tab. 4-11, Tab. A-5c).

Ferner zeigt Tabelle 4-11 für 10.3 höhere Dynamikbereiche für die horizontalen Polarisationen beider Bänder, als sie für die vertikalen Polarisationen ermittelt werden konnte. Im Gegensatz dazu galt für den Dynamikbereich beider Wellenlängen auf 3.2:  $\sigma_{VV}^0 > \sigma_{HH}^0$ . Der größte Dynamikbereich lag zu diesem Aufnahmeterrain mit 6,1 dB für das X-HH auf 10.3 vor.

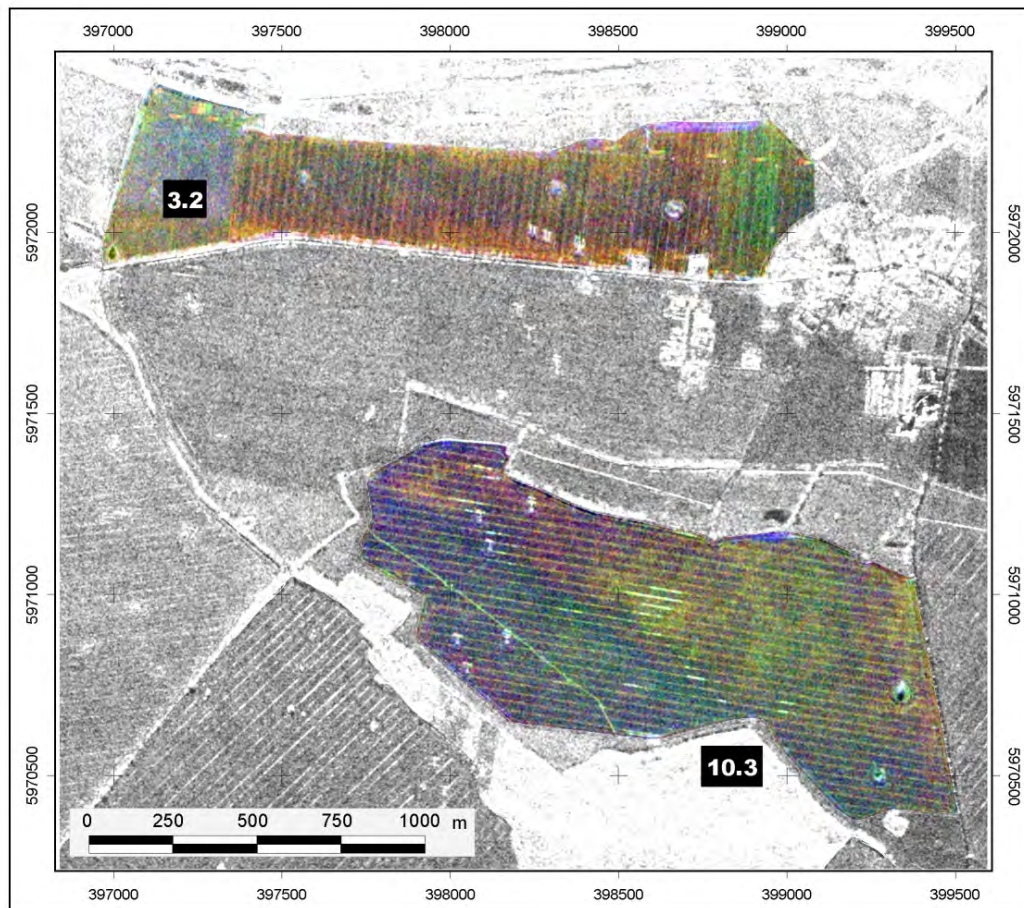
Nach Abbildung 4-11 liegen die geringsten Rückstreuintensitäten aller Kanäle für die Kreuz-Polarisationen des L-Bandes vor. Sie waren auf 3.2 um ca. 3,5 dB höher als auf 10.3 (Tab. 4-11). Auch für  $\sigma_{L-HH}^0$  und  $\sigma_{L-VV}^0$  wurden auf 3.2 höhere Werte gemessen. Im Gegensatz dazu übertrafen beide Polarisationen des X-Bandes auf 10.3 die jeweiligen Rückstreuintensitäten auf 3.2 (Abb. 4-11).



**Abb. 4-11:** Mittlerer Radarrückstreukoeffizient ( $\sigma^0$ ) von Winterweizen während des Schossens am 08. Mai 2002 auf den Testflächen in Neetzow inklusive der Standardabweichung.

Die Betrachtung der vertikalen und horizontalen Polarisationen beider Wellenlängen machte einen weiteren Unterschied zwischen beiden Beständen deutlich. Sowohl für das X-HH als auch für das X-VV waren die Rückstreuintensitäten auf 10.3 höher als für die jeweiligen Polarisationen im L-Band. Für die Testfläche 3.2 zeigte sich dagegen ein umgekehrtes Verhältnis der beiden gleichpolarisierten Kanäle beider Wellenlängen zueinander (Abb. 4-11). Hier waren höhere Rückstreuwerte im L-Band gegenüber den jeweiligen Polarisationen des X-Bandes zu registrieren. Auf beiden Testflächen galt jedoch sowohl für die Rückstreuung des X- als auch des L-Bandes:  $\sigma_{HH}^0 > \sigma_{VV}^0$ .

Abbildung 4-12 zeigt eine multi-dimensionale Farbdarstellung, welche die unterschiedliche Rückstreucharakteristik beider Bestände veranschaulicht. Da jede der drei Farben Rot (R), Grün (G) und Blau (B) die relative Rückstreuintensität eines Radarkanals repräsentiert, ist das unterschiedliche Rückstreuverhalten der Bestände beider Testflächen in den einzelnen Radarkanälen deutlich zu erkennen.



**Abb. 4-12:** Multi-dimensionale Farbdarstellung der Winterweizenbestände vom 08. Mai 2002. Die Farben repräsentieren die relative Radarrückstreuung jedes einzelnen der drei Radarkanäle, wobei R = X-HH, G = X-VV, B = L-VV (WGS 84, UTM Zone 33).

Die dargelegte Inkonsistenz in der Radarrückstreuung der verschiedenen Radarkanäle im Vergleich zweier Testflächen zu einem Aufnahmeterrain wurde durch die Radardaten der anderen Aufnahmeterraine verifiziert. Das umfangreiche Datenmaterial hierzu ist im Anhang in den Tabellen A-5a-d und den Abbildungen A-3a-d aufgeführt.

Nachdem die Variabilität der Rückstreuung des Winterweizenbestandes zweier Testflächen zu einem Aufnahmeterrain gezeigt wurde, war auch von Interesse, wie sich die Rückstreuung im Vergleich zweier Vegetationsperioden verhielt. Hierfür wurde die Rückstreuung des

Bestandes von 10.3 vom Aufnahmeterrain 08. Mai 2001 zur Gegenüberstellung hinzugezogen. Die beiden Mai-Termine der Untersuchungszeiträume boten nahezu identische Aufnahmebedingungen bezüglich Entwicklungszustand (Tab. 4-1, Tab. 4-3) und Reihenrichtung (Tab. 3-3) des Weizens. Die statistischen Parameter der Rückstreuung von 10.3 am 08. Mai 2001 sind in Tabelle 4-12 zusammengefasst.

**Tab. 4-12:** Deskriptive Statistik der Radarrückstreuung  $\sigma^0$  von Winterweizen der Testfläche 10.3 in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2001.

08. Mai 2001	Radarkanal							
	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	r-cross	
-----[dB]-----								
Testfläche 10.3								<i>n</i> = 16
Minimum	-18,1	-27,7	-18,5	-25,0	-13,8	-15,2	-25,3	
Maximum	-12,2	-21,6	-13,6	-20,3	-9,5	-10,2	-20,9	
Range	5,9	6,1	4,9	4,7	4,4	5,0	4,3	
Mittelwert	-15,4	-24,4	-16,5	-22,8	-11,7	-12,9	-23,6	
$\sigma$	1,6	1,8	1,3	1,4	1,5	1,8	1,4	
<i>v</i> [%]	10,3	7,2	7,9	6,0	12,7	14,2	5,7	

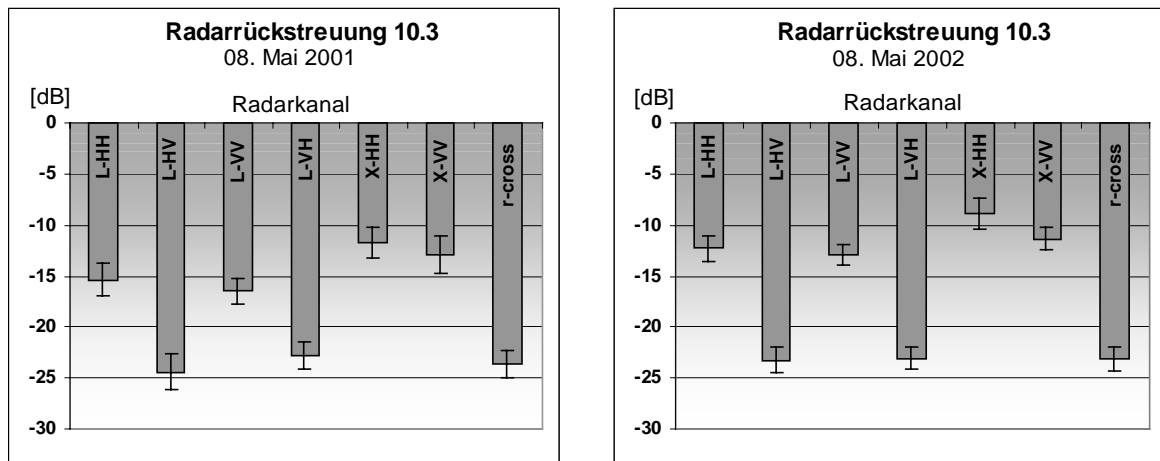
$\sigma$ : Standardabweichung, *v* [%]: Variationskoeffizient, r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, Range: dynamischer Bereich

Die größten Unterschiede hinsichtlich der Rückstreuvariabilität zeigten sich im X-Band. Hier bestanden für beide Polarisationen zwischen beiden Jahren Abweichungen von  $\Delta v = 4,5$  %, wobei die Variabilität des X-VV in 2001 und die des X-HH in 2002 größer war (Tab. 4-11, Tab. 4-12).

Der Vergleich der Rückstreucharakteristik beider Jahre zeigte für 10.3 deutliche Unterschiede in der Rückstreuintensität der einzelnen Radarkanäle (Abb. 4-13). Die Ko-Polarisationen beider Wellenlängen wiesen am 08. Mai 2002 eine höhere Rückstreuung auf als am 08. Mai 2001 (Tab. 4-12). Die maximale Abweichung lag mit 3,6 dB im L-VV vor. Nahezu identische Werte zeigten dagegen die Kreuz-Polarisationen des L-Bandes.

Keine Unterschiede waren dagegen im relativen Verhältnis der einzelnen Radarkanäle zueinander zu erkennen. Zu beiden Aufnahmeterrainen war die Rückstreuung im X-Band höher als im L-Band. Ebenso unterlag die vertikale Polarisation beider Wellenlängen einer höheren Dämpfung als die horizontale Polarisation (Abb. 4-13). Tendenziell war der Einfluss der Bestandesstruktur auf die Radarkanäle demnach vergleichbar, äußerte sich jedoch in unterschiedlichen Rückstreuintensitäten.





**Abb. 4-13:** Mittlerer Radarrückstreukoeffizient ( $\sigma^0$ ) von Winterweizen während des Schossens auf der Testfläche 10.3 in Neetzow inklusive der Standardabweichung.

Die dargelegten Ergebnisse zeigten einen unterschiedlichen Informationsgehalt der Radarkanäle, welcher auf deren unterschiedliche Sensitivität gegenüber strukturellen Eigenschaften des Winterweizenbestandes zurückzuführen ist. Die lediglich geringe Ähnlichkeit der Radarinformation verschiedener Radarkanäle wurde durch die Korrelationsanalyse der normalverteilten Rückstreuung (Tab. A-6) bestätigt. In Tabelle 4-13 sind exemplarisch die Korrelationsmatrizen der Einzelkanalrückstreuung von 10.3 und 3.2 für den Aufnahmeterrmin 08. Mai 2002 aufgeführt.

**Tab. 4-13:** Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse der Einzelkanalrückstreuung von Winterweizen (nach PEARSON) auf den Testflächen 10.3 und 3.2 in Neetzow am 08. Mai 2002.

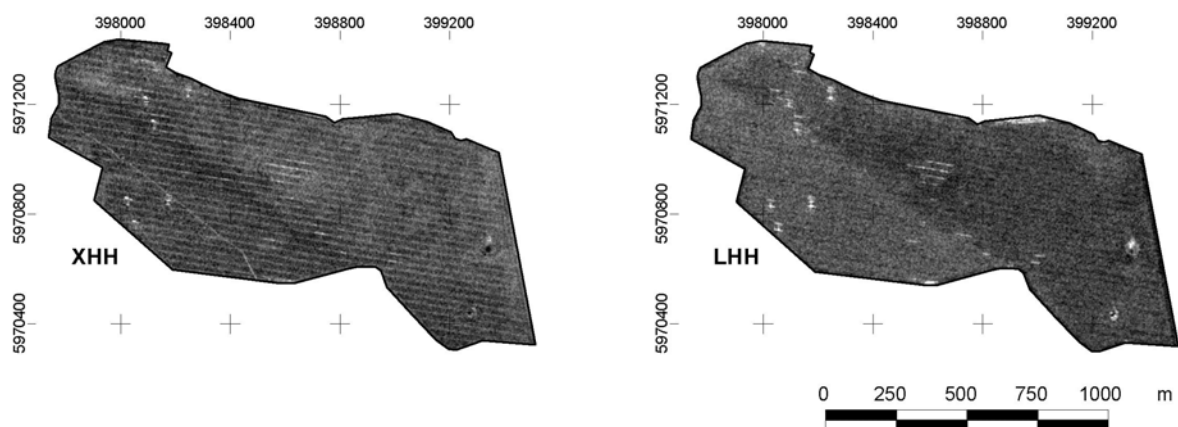
Radarkanal	Testfläche 10.3							Testfläche 3.2						
	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	$r_{cross}$	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	$r_{cross}$
L-HH														
L-HV	0,11							0,52*						
L-VV	0,37	0,11						-0,07	0,40					
L-VH	-0,15	0,75**	-0,26					0,32	0,55*	0,18				
X-HH	0,01	-0,09	-0,01	-0,14				-0,53*	-0,35	-0,18	-0,16			
X-VV	0,07	-0,22	0,07	-0,23	0,41*			-0,28	-0,22	0,09	-0,31	0,51*		
$r_{cross}$	-0,02	0,94**	-0,07	0,93**	-0,12	-0,24		0,49*	0,89**	0,34	0,87**	-0,29	-0,30	

$r_{cross}$ : Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, Signifikanzniveau \*:  $\alpha = 0,05$ , \*\*:  $\alpha = 0,01$

Während des Schossens im Jahr 2002 waren auf 10.3 keine Korrelationen zwischen L- und X-Band vorhanden, wohingegen auf 3.2 zwischen den horizontalen Polarisationen beider Wellenlängen ein mittelstarker Zusammenhang von  $r = -0,53$  vorlag. Zwischen den ko-polaren Kanälen einer Wellenlänge lagen bestenfalls vereinzelt mittlere Korrelationen vor.

Im Anhang sind die Ergebnisse der Korrelationsanalyse der anderen Aufnahmetermine aufgeführt. Sie zeigten, dass während der anderen Entwicklungsstadien vereinzelt signifikante Zusammenhänge auf mittlerem bis starkem Niveau vorlagen (Tab. A-7a-b). Dies war vor allem für die Kanäle des L-Bandes während der Bestockung und dem Ährenschieben bzw. der Blüte des Winterweizens der Fall. Insgesamt ließ sich jedoch kein Trend hinsichtlich der Zusammenhänge verschiedener Radarkanäle erkennen.

Die visuelle Analyse der Einzelkanaldarstellungen verdeutlichte das unterschiedliche Rückstreuverhalten der Bestände in den einzelnen Radarkanälen. Dies wird im Folgenden am Beispiel von 10.3 gezeigt (Abb. 4-14). Analog der visuellen Analyse des NDVI (Abb. 4-7, Abb. 4-8) ließ sich die Testfläche in Zonen unterschiedlicher Rückstreuintensitäten gliedern, die durch eine diagonale Linie von NW nach SO getrennt wurden. Dies galt insbesondere für die horizontal polarisierten Kanäle X-HH und L-HH, welche exemplarisch in Abbildung 4-14 dargestellt sind.



**Abb. 4-14:** Einzelkanaldarstellungen der Rückstreuintensität des Winterweizenbestandes der Testfläche 10.3 in Neetzow während des Schossens (08. Mai 2002) in den Kanälen X-HH und L-HH (WGS 84, UTM Zone 33).

Beide Kanäle verhielten sich eindeutig konträr zueinander, d.h. Bereiche, die im X-HH eine höhere Rückstreuung aufwiesen (hellere Grautöne), hatten geringere Rückstreuwerte im L-HH (dunkle Grautöne). Alle anderen Radarkanäle zeigten diesen Gegensatz schwächer ausgeprägt, wie aus den entsprechenden Einzelkanaldarstellungen im Anhang zu ersehen ist (Abb. A-4h). Die Testfläche 3.2 ließ sich ebenfalls in verschiedene Zonen untergliedern. Hier lag die eine Zone im Inneren der Testfläche, und die zweite Zone befand sich am oberen und unteren Randbereich (Abb. A-4g). Die konträren Auswirkungen des Weizenbestandes auf beide Wellenlängen waren auch hier offensichtlich.

### 4.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse zur zeitlichen Variabilität der Fernerkundungsdaten

Die schlagspezifische Betrachtung des NDVI zeigte dessen Sensibilität gegenüber schlaginternen Heterogenitäten. Auch wenn der Variationskoeffizient relativ niedrige Werte aufwies, war im Bild eine deutliche Variabilität zu erkennen und visuell drei Klassen differenzierbar (Abb. 4-7, Abb. 4-8). Die visuelle Betrachtung des NDVI ließ eine Variabilitätsabnahme über den Vegetationszeitraum hinweg vermuten, was statistisch jedoch nicht belegt werden konnte (Tab. 4-8).

Aus der statistischen Analyse der Radardaten ging zusammenfassend hervor, dass sich nur wenige Regelmäßigkeiten hinsichtlich der Rückstreucharakteristik ableiten ließen. Neben der stets niedrigsten Rückstreuintensität der kreuz-polaren Kanäle war die stärkere Dämpfung der Rückstreuung der vertikalen gegenüber der horizontalen Polarisation beider Wellenlängen als wesentliches Ergebnis zu nennen (Tab. 4-14). Diese Erkenntnis galt jedoch nicht für das L-Band während der Bestockung des Weizenbestandes (07. April 2002). Dieser Termin lag am Beginn der Vegetationsperiode, an dem der Bestand nur geringe Bodenbedeckung aufwies.

**Tab. 4-14:** Zusammenfassender Vergleich der Rückstreuintensitäten ( $\sigma^0$ ) verschiedener Radarkanäle während unterschiedlicher Entwicklungsstadien von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow.

Entwicklungsstadium		10.2	10.3	3.2
2001	Schossen	L-HH > L-VV > r-cross X-HH > X-VV	L-HH > L-VV > r-cross X-HH > X-VV	n.e.
	Beginn der Blüte	L-HH > L-VV > r-cross X-HH > X-VV	L-HH > L-VV > r-cross X-HH > X-VV	n.e.
2002	Bestockung	n.e.	L-VV > L-HH > r-cross X-HH ~ X-VV	L-VV > L-HH > r-cross X-HH > X-VV
	Schossen	n.e.	L-HH > L-VV > r-cross X-HH > X-VV	L-HH > L-VV > r-cross X-HH > X-VV
	Ährenschieben	n.e.	L-HH > L-VV > r-cross X-HH > X-VV	L-HH > L-VV > r-cross X-HH > X-VV

r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, n.e.: nicht ermittelt

Die Rückstreusignaturen der Winterweizenbestände verschiedener Testflächen erwiesen sich sowohl während des Entwicklungsverlaufes als auch zu einem spezifischen Aufnahmeterrain als inkonsistent. Der Vergleich der Rückstreuung zweier Vegetationsperioden offenbarte deutliche Unterschiede in der absoluten Rückstreuintensität der einzelnen Kanäle, zeigte aber Konstanz in der relativen Relation der Kanäle zueinander.

Die Variabilität und Rückstredynamik der  $\sigma^0$ -Werte der Radarkanäle ließen keinen einheitlichen Trend für die verschiedenen Bestände erkennen. Die Radarrückstreuung der kopolaren Kanäle des L-Bandes wiesen häufig höhere Dynamikbereiche als die des X-Bandes auf und zeigten sich grundsätzlich variabler.

Die Korrelationsanalyse der Radarkanäle machte lediglich wenige signifikante Zusammenhänge kenntlich. Dieses Ergebnis folgte somit der Annahme, dass verschiedene Radarkanäle von unterschiedlichen Streumechanismen beeinflusst werden (BROWN ET AL. 1992) und deshalb verschiedenartige Information bezüglich des Weizenbestandes liefern.

#### *4.4 Analyse der räumlichen Variabilität und Modellierung der Bestandesdichte*

In diesem Kapitel wird die Eignung der Fernerkundungsdaten zur Erfassung und Modellierung von Bestandesheterogenitäten untersucht. Die während der Messkampagnen ermittelten NDVI-Werte (Kap. 4.4.1) und Radarrückstreuoeffizienten  $\sigma^0$  (Kap. 4.4.2), sowie die berechneten Polarisationsindizes (Kap. 4.4.3) wurden mit den zeitgleich im Feld erhobenen Bestandesmerkmalen auf bestehende Zusammenhänge hin analysiert.

Die statistische Zusammenhangsanalyse gliederte sich in zwei verschiedene Herangehensweisen: Zum einen wurde die lineare Einfachkorrelation nach PEARSON verwendet, um Zusammenhänge auf Basis von Einzelwerten aufzudecken. Zum anderen wurde die Diskriminanzanalyse genutzt, um entsprechende Zusammenhänge unter Verwendung der zuvor vorgenommenen Gruppierung auf generalisierter Ebene zu untersuchen.

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse werden im Folgenden anhand der Bestandesmerkmale Bestandesdichte und frische Biomasse dargestellt. Im Vorfeld der Diskriminanzanalyse wurde die Variable Bestandesdichte mittels hierarchischer Clusteranalyse in drei Gruppen eingeteilt (Kap. 3.6). Die Gruppenzugehörigkeit der einzelnen Probepunkte ist im Anhang aufgeführt (Tab. A-1a-d, Tab. A-2a-f). Sie ging als abhängige Variable in die Analyse ein. Als unabhängige, diskriminierende Variable wurde die zugehörige Fernerkundungsinformation verwendet.

Anhand der Ergebnisse wurden Algorithmen für die Modellierung der Bestandesdichte entwickelt. Die Güte der Modellierungsansätze wurde analysiert, jeweils ein Modell

exemplarisch auf die Bilddaten angewendet und eine „Bestandesdichtekarte“ generiert. Als Beispiel wurde die Testfläche 10.3 zum Aufnahmeterrmin 05. Juni 2002 gewählt.

Da die Modellbildung auf den extrahierten Radarrückstreuwerten basierte, d.h. dem Mittelwert eines Kreises von 2,5 m Durchmesser (Kap. 3.5.2), war bei der Verrechnung der Pixelwerte (1 m) mit der Modellgleichung nicht mit aussagekräftigen Ergebnissen zu rechnen. Aus diesem Grund wurde die Pixelauflösung der Radarbilder vor der Modellierung auf 4 m degradiert. Dies entsprach einer Pixelauflösung (16 m<sup>2</sup>), welche der Extraktionsfläche (19,6 m<sup>2</sup>) am nächsten kam.

#### *4.4.1 Beziehungen zwischen NDVI und Bestandesmerkmalen*

In den Abbildungen 4-7 und 4-8 ist deutlich die schlaginterne Variabilität des NDVI zu erkennen. Die „Bestandesdichtekarten“, welche aus der Modellierung auf Grundlage des NDVI resultierten, verdeutlichten die Heterogenität des Bestandes. Sie stellten den Referenzzustand der schlaginternen Bestandesdichtevariabilität dar und wurden als Verifikationsgrundlage für die Modellierungsergebnisse auf Basis der Radardaten herangezogen.

#### *Korrelations- und Regressionsanalyse*

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse sind in Tabelle 4-15 dargestellt. Wie aus den Werten zu erkennen ist, wies die frische Biomasse im Allgemeinen einen höheren Zusammenhang mit dem NDVI auf als die Bestandesdichte. Der durchweg hohe Korrelationskoeffizient von  $0,75 \leq r \leq 0,88$  deutete auf einen starken bis sehr starken linearen Zusammenhang zwischen NDVI und frischer Biomasse hin. Für die Beziehung zwischen NDVI und Bestandesdichte wurden dagegen Korrelationskoeffizienten von  $0,55 \leq r \leq 0,81$  ermittelt.

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse (Tab. 4-15) zwischen NDVI und Bestandesmerkmalen stehen in direktem Zusammenhang mit dem Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ) der Regressionsanalyse, welches als Gütekriterium für die Modelle verwendet wurde (Tab. 4-16).

**Tab. 4-15:** Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelation (nach PEARSON) zwischen NDVI und ausgewählten Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow zu verschiedenen Aufnahmetermen (2001/2002).

Testfläche Termin	10.2	10.3			3.2	
	08. Mai 01 $n=12$	08. Mai 01 $n=15$	08. Mai 02 $n=26$	05. Juni 02 $n=24$	08. Mai 02 $n=18$	05. Juni 02 $n=18$
FMV [g m <sup>-2</sup> ]	0,88 **	0,82 **	0,75 **	0,76 **	0,84 **	0,75 **
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,55 *	0,79 **	0,63 **	0,81 **	0,74 **	0,57 *

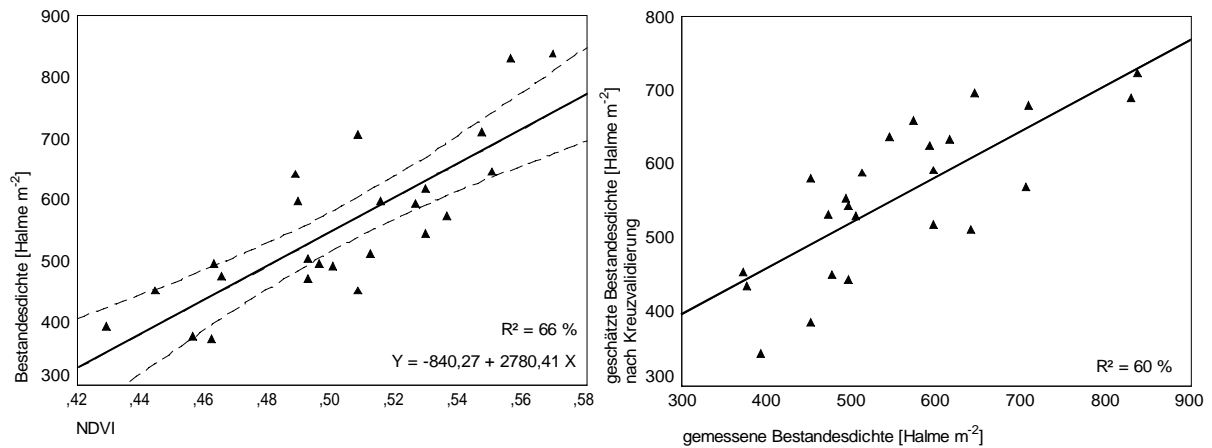
FMV: frische Biomasse, Halme: Bestandesdichte, \*\*: signifikant bei  $\alpha = 0,01$  (zweiseitig), \*: signifikant bei  $\alpha = 0,05$  (einseitig)

Die Eignung der Regressionsmodelle zur Vorhersage der Bestandesdichte auf Grundlage des NDVI variierte beträchtlich. Lediglich für 10.3 wurde an den Aufnahmetermen 08. Mai 2001 und 05. Juni 2002 über 60 % der vorhandenen Streuung durch das Modell erklärt. Für den Aufnahmeterm 08. Mai 2002 und die beiden Testflächen 10.2 und 3.2 war das Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ) zu gering, als dass eine zuverlässige Schätzung der Bestandesdichte möglich gewesen wäre (Tab. 4-16).

**Tab. 4-16:** Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ) der linearen Regression von NDVI und Bestandesdichte von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten (2001/ 2002).

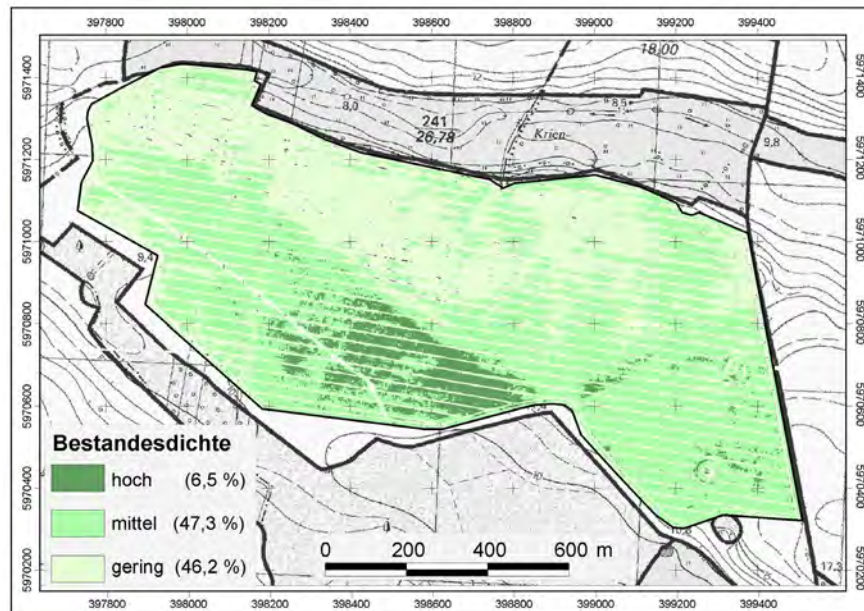
Testfläche Termin	10.2	10.3			3.2	
	08. Mai 01 $n=12$	08. Mai 01 $n=15$	08. Mai 02 $n=26$	05. Juni 02 $n=24$	08. Mai 02 $n=18$	05. Juni 02 $n=18$
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,30	0,62	0,40	0,66	0,55	0,32

Anhand des Regressionsmodells von 10.3 vom Aufnahmeterm 05. Juni 2002 wurde exemplarisch eine Bestandesdichtekarte basierend auf dem NDVI generiert. In Abbildung 4-15 (links) ist die ermittelte Regressionsgerade mit der dazugehörigen Modellgleichung zur Schätzung der Bestandesdichte dargestellt. Aufgrund des relativ geringen Stichprobenumfanges sind Regressionsmodelle notorisch instabil, so dass eine leicht veränderte Stichprobe zu einer deutlich abweichenden Regressionsgleichung führen kann. Das durch Kreuzvalidierung (Abb. 4-15, rechts) erzielte Bestimmtheitsmaß lag mit  $r^2 = 60\%$  lediglich etwas niedriger als das  $r^2$  des ermittelten Regressionsmodells (66 %) und deutete dementsprechend auf ein relativ stabiles Vorhersagemodell hin.



**Abb. 4-15:** Zusammenhang zwischen NDVI und Bestandesdichte von Winterweizen auf 10.3 in Neetzow (05. Juni 2002), links: Regressionsmodell mit dem 95 %-Konfidenzintervall. Rechts: Korrelation zwischen der kreuzvalidiert geschätzten Bestandesdichte und der im Feld gemessenen Bestandesdichte ( $n = 24$ ).

Die ermittelte Regressionsgleichung ( $y = -840,27 + 2780,41 x$ ) wurde im Folgenden direkt auf die Pixelwerte der Bilddaten angewendet, so dass sich die entsprechende Bestandesdichteverteilung für die Testfläche 10.3 während des Ährenschiebens (05. Juni 2002) modellieren ließ. Die modellierte Bestandesdichte wies schlaginterne Heterogenitäten auf, welche in drei Klassen eingeteilt dargestellt sind (Abb. 4-16). Aus Vergleichbarkeitsgründen wurde die Klasseneinteilung entsprechend den Ergebnissen der Clusteranalyse (Tab. A-2c) vorgenommen, welche der Diskriminanzanalyse zugrunde lagen.



**Abb. 4-16:** Bestandesdichteverteilung in drei Klassen zum Zeitpunkt des Ährenschiebens des Weizenbestandes (05. Juni 2002) auf 10.3 in Neetzow mit prozentualen Flächenanteil. Die Bestandesdichte wurde anhand des Regressionsmodells  $y = -840,27 + 2780,41 x$  aus dem NDVI prognostiziert (WGS 84, UTM Zone 33).

### Diskriminanzanalyse

Die Diskriminanzanalyse versucht mit Hilfe der ermittelten Klassifizierungsfunktionen die Zugehörigkeit einer Stichprobe (extrahierter NDVI) zu einer vordefinierten Gruppe zu prognostizieren. Die Parameter der Klassifikationsfunktionen sind für die verschiedenen Aufnahmetermine und Testflächen in Tabelle 4-17 dargestellt.

**Tab. 4-17:** Fisher's Klassifikationsfunktionen als Ergebnis der Diskriminanzanalyse unter Verwendung des NDVI als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte des Winterweizens als abhängige Variable. Analyseergebnisse der Testflächen in Neetzow (2001/2002).

Testfläche	Fisher's Klassifizierungsfunktion			
	1	2	3	
08. Mai 01				
10.3	b	72.43	84.56	110.39
	a	-14.06	-18.76	-31.20
10.2	b	584.86	615.76	631.26
	a	-124.70	-138.11	-145.09
08. Mai 02				
10.3	b	680.25	645.18	789.93
	a	-165.12	-148.65	-222.28
3.2	b	1204.45	1261.17	1260.66
	a	-301.16	-330.08	-329.81
05. Juni 02				
10.3	b	856.89	817.98	749.32
	a	-234.60	-213.88	-179.66
3.2	b	2619.75	2665.78	2571.71
	a	-572.64	-592.90	-551.87

a: Konstante, b: Diskriminanzkoeffizient

Die Klassifikationsgenauigkeit der ermittelten Klassifikationsfunktionen ist aus der Klassifikationsmatrix ersichtlich. In Abbildung 4-17 ist diese exemplarisch für 10.3 vom Aufnahmetermin 05. Juni 2002 dargestellt. In der Klassifikationsmatrix wird die vorgegebene Gruppenzugehörigkeit mit der diskriminanzanalytisch ermittelten Gruppenzugehörigkeit verglichen, und die Klassifizierungsgenauigkeit (Trefferquote) berechnet. Eine unverzerrte Schätzung der Trefferquote wurde durch die Kreuzvalidierung erzielt (Kap. 3.6). Je höher die unverzerrte Trefferquote ist, desto besser ist die Funktion zur Vorhersage der Gruppenzugehörigkeit auf Basis der diskriminierenden Variablen NDVI geeignet. Folglich ist auch der Zusammenhang zwischen NDVI und der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte größer.



NDVI		Gruppe	Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit			Gesamt
			1	2	3	
Original	Anzahl	1	3	1	0	4
		2	2	4	2	8
		3	0	3	9	12
	%	1	75,0	25,0	0,0	100,0
		2	25,0	50,0	25,0	100,0
		3	0,0	25,0	75,0	100,0
Kreuzvalidierung	Anzahl	1	3	1	0	4
		2	2	4	2	8
		3	0	3	9	12
	%	1	75,0	25,0	0,0	100,0
		2	25,0	50,0	25,0	100,0
		3	0,0	25,0	75,0	100,0

**Abb. 4-17:** Klassifikationsmatrix der Diskriminanzfunktion unter Verwendung des NDVI als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte des Winterweizens als abhängige Variable (Testfläche 10.3 am 05. Juni 2002 in Neetzow); es wurden 66,7 % der ursprünglich gruppierten Fälle und 66,7 % der kreuzvalidierten Fälle korrekt klassifiziert (Gruppen: 1: hoch, 2: mittel, 3: gering).

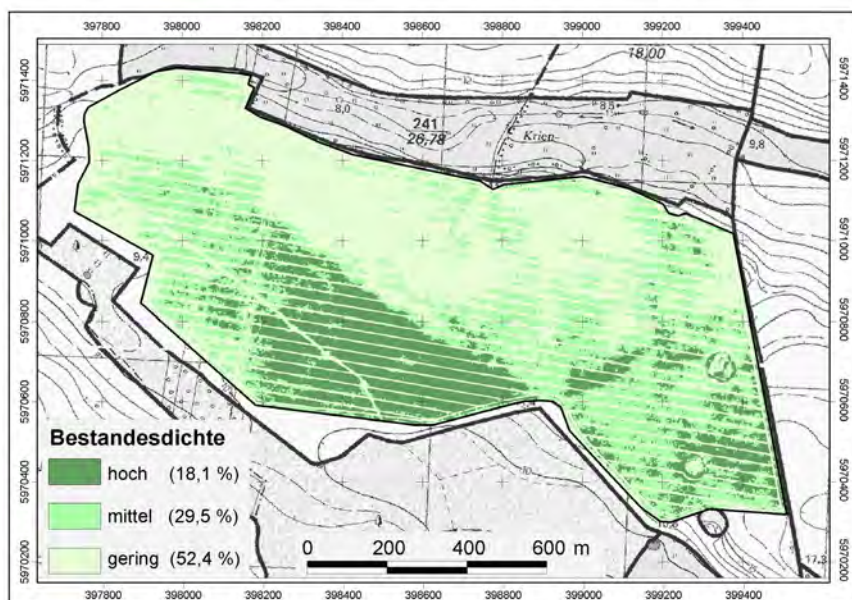
In Tabelle 4-18 ist sowohl die Trefferquote als auch die unverzerrte Trefferquote als Ergebnis der Klassifikation für alle Aufnahmetermine je Testfläche aufgeführt. Die Ergebnisse zeigten nach der Kreuzvalidierung zu allen Aufnahmetermenen weiterhin hohe Trefferquoten für 10.3. Mittels der Klassifikationsfunktionen konnten zwischen 66,7 % und 73,3 % der Fälle zur richtigen Gruppe zugeordnet werden. Folglich war die Klassifikationsfunktion geeignet, um die Gruppenzugehörigkeit anhand des NDVI zu prognostizieren. Da die vorgegebene Gruppierung auf Unterschieden in der Bestandesdichte basierte, war von einem Zusammenhang zwischen der Bestandesdichte und der Information des NDVI auszugehen. Der Vergleich der Ergebnisse mit denen der Regressionsanalyse (Tab. 4-16) verdeutlichte insbesondere für den Termin am 08. Mai 2002 (Schossen) eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit.

Sowohl für 10.2 als auch 3.2 lagen die Trefferquoten nach der Kreuzvalidierung mit 45,5 % bzw. 29,4 % und 33,0 % niedriger (Tab. 4-18). Für diese Testflächen war die Klassifikation auf Basis des NDVI mit einer hohen Unsicherheit behaftet. Diese Erkenntnis deckte sich mit den Ergebnissen der Regressionsanalyse, welche ebenfalls für beide Testflächen Modelle lieferte, die lediglich einen geringen Anteil der Variabilität erklärten (Tab. 4-16).

**Tab. 4-18:** Klassifizierungsgenauigkeit der Diskriminanzfunktion unter Verwendung des NDVI als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Untersuchungsgebiet: Neetzow in den Jahren 2001 und 2002).

	Trefferquote	
	Original [%]	Kreuzvalidierung [%]
08. Mai 01		
10.3	80,0	73,3
10.2	54,5	45,5
08. Mai 02		
10.3	73,1	69,2
3.2	58,8	29,4
05. Juni 02		
10.3	66,7	66,7
3.2	40,0	33,0

Die NDVI-Bilddaten wurden nachfolgend direkt mit den ermittelten Klassifikationsfunktionen (Tab. 4-17) der Diskriminanzanalyse verrechnet, um jedes Pixel einer der drei Klassen zuordnen zu können. Exemplarisch ist die modellierte Bestandesdichteverteilung für 10.3 zum Zeitpunkt des Ährenschiebens (05. Juni 2002) in Abbildung 4-18 dargestellt.



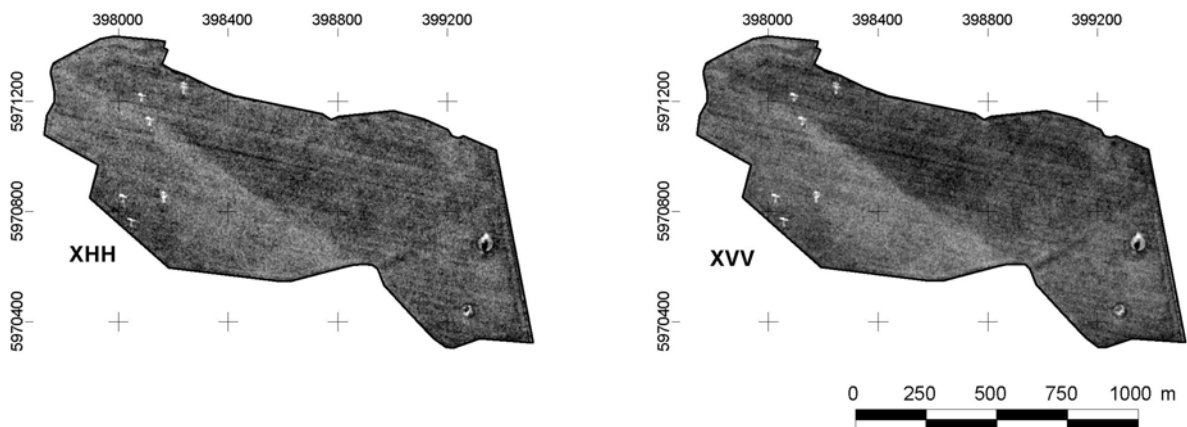
**Abb. 4-18:** Bestandesdichteverteilung in drei Klassen zum Zeitpunkt des Ährenschiebens des Winterweizens (05. Juni 2002) auf 10.3 in Neetzow mit prozentualem Flächenanteil. Die Bestandesdichte wurde anhand der ermittelten Klassifikationsfunktionen (Tab. 4-17) aus dem NDVI prognostiziert (WGS 84, UTM Zone 33).

Der Vergleich der Modellierungsergebnisse der Regressions- und Diskriminanzanalyse zeigte eine sehr ähnliche Verteilung räumlicher Strukturen innerhalb der Testfläche 10.3

(Abb. 4-16, Abb. 4-18). Der Unterschied zwischen beiden Bestandesdichtekarten lag vor allem im prozentualen Flächenanteil der „mittleren“ und „hohen“ Bestandesdichteklasse. Hier zeigte das Ergebnis der Diskriminanzanalyse einen größeren Anteil der „hohen Klasse“ und einen geringeren Anteil der „mittleren Klasse“ im Vergleich zur Regressionsanalyse.

#### 4.4.2 Beziehungen zwischen Radarsignaturen von Einzelkanälen und Bestandesmerkmalen

Die Einzelkanaldarstellungen der Radarbilddaten ließen weitreichende bestandesinterne Rückstreuvariabilität erkennen, die auf die Bestandesstruktur zurückzuführen war. In Abbildung 4-19 ist dies exemplarisch am Beispiel der Testfläche 10.3 und den beiden Ko-Polarisationen des X-Bandes dargestellt. Entsprechende Unterschiede in der Rückstreuung des Weizenbestandes zeigten sich auch in den Darstellungen der anderen Radarkanäle. Nur die Kreuz-Polarisationen des L-Bandes wiesen kaum schlaginterne Unterschiede auf (Abb. A4a-k).



**Abb. 4-19:** Einzelkanaldarstellungen der Radarrückstreuung von Winterweizen der Testfläche 10.3 in Neetzow während der Blüte am 09. Juni 2001 in den Radarkanälen X-HH und X-VV (WGS 84, UTM Zone 33).

Das Ziel der Analysen war es, diese visuell erkennbare Rückstreuvariabilität durch statistisch signifikante Beziehungen zwischen den Radarrückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  und den Bestandesmerkmalen zu belegen.

#### *Korrelations- und Regressionsanalyse zu verschiedenen Wachstumsphasen des Winterweizens*

In der folgenden Tabelle 4-19 sind die Korrelationskoeffizienten der Beziehungen zwischen der Radarrückstreuung der Einzelkanäle und den Bestandesmerkmalen frische Biomasse und Bestandesdichte von Winterweizen aufgeführt. Es konnten insgesamt relativ wenige

signifikante Korrelationen ermittelt werden. Die höchsten Korrelationskoeffizienten lagen während der Blüte des Winterweizens (09. Juni 2001) sowohl zwischen der frischen Biomasse ( $r = 0,81$ ) als auch der Bestandesdichte ( $r = 0,77$ ) und dem X-HH auf 10.2 vor. Weitere, wenn auch wesentlich schwächer ausgeprägte Zusammenhänge bestanden zu den anderen Aufnahmezeitpunkten ebenfalls mit beiden Polarisierungen des X-Bandes, aber auch mit dem L-HH und dem L-VV. Keine signifikanten Korrelationen lagen dagegen zwischen Bestandesmerkmalen und der kreuz-polaren Rückstreuung des L-Bandes vor.

Tabelle 4-19 macht deutlich, dass im Jahr 2001 bessere Zusammenhänge zwischen Bestandesmerkmalen und Radarrückstreuung bestanden, als es 2002 der Fall war. Weiterhin ließ die separate Betrachtung einzelner Aufnahmezeitpunkte erkennen, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen einem spezifischen Radarkanal und einem Bestandesmerkmal auf einer Testfläche nicht zwangsläufig auch auf der zweiten Testfläche vorhanden sein musste. Dies zeigten die Ergebnisse beider Untersuchungszeiträume.

**Tab. 4-19:** Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelation (nach PEARSON) zwischen  $\sigma^0$  der Einzelkanäle und den Bestandesmerkmalen frische Biomasse und Bestandesdichte von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow an den verschiedenen Aufnahmezeitpunkten (2001/2002).

		FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]									
		08. Mai 2001		09. Juni 2001		07. April 2002		08. Mai 2002		05. Juni 2002	
Testfläche /	Radarkanal	10.2 (n=11)	10.3 (n=16)	10.2 (n=13)	10.3 (n=18)	3.2 (n=12)	10.3 (n=26)	3.2 (n=17)	10.3 (n=26)	3.2 (n=15)	10.3 (n=24)
$\sigma^0$	L-HH	-0,12	0,55*	0,11	0,39	0,39	0,32	0,50*	-0,16	0,02	0,22
$\sigma^0$	L-HV	-0,09	0,36	0,08	0,05	0,24	0,50	0,13	-0,06	0,17	0,26
$\sigma^0$	L-VV	-0,36	0,21	0,19	0,52*	0,26	0,55**	-0,47	-0,31	0,25	0,15
$\sigma^0$	L-VH	0,19	0,21	0,04	0,16	-0,10	0,28	0,18	0,25	0,12	0,30
$\sigma^0$	X-HH	-0,20	-0,63**	0,81**	0,27	-0,28	0,27	-0,30	-0,40*	0,07	-0,38
$\sigma^0$	X-VV	0,36	-0,50*	0,51	0,56*	-0,37	0,42*	-0,56*	-0,17	-0,18	-0,17
$\sigma^0$	r-cross	0,07	0,34	0,06	0,10	0,06	0,44	0,17	0,10	0,15	0,28
		Bestandesdichte [Halme m <sup>-2</sup> ]									
$\sigma^0$	L-HH	-0,15	0,56*	0,07	0,37	0,25	-0,14	0,32	0,05	-0,06	0,12
$\sigma^0$	L-HV	0,44	0,46	0,00	0,07	0,31	0,15	-0,02	-0,02	0,23	0,20
$\sigma^0$	L-VV	-0,02	0,23	0,14	0,51*	0,34	0,05	-0,47	-0,37	0,25	0,14
$\sigma^0$	L-VH	0,27	0,23	0,02	0,18	0,12	0,38	-0,17	0,24	0,17	0,28
$\sigma^0$	X-HH	-0,05	-0,47	0,77**	0,37	-0,33	-0,12	-0,07	-0,40*	-0,10	-0,56**
$\sigma^0$	X-VV	0,38	-0,41	0,53	0,55*	-0,20	0,32	-0,41	-0,14	-0,06	-0,40
$\sigma^0$	r-cross	0,44	0,41	0,01	0,12	0,22	0,27	-0,10	0,11	0,20	0,24

r-cross: Mittelwert der Kreuz-Polarisationen, FM<sub>v</sub>: Biomasse Frischgewicht, Signifikanzniveau \*:  $\alpha = 0,05$ , \*\*:  $\alpha = 0,01$   
 grau unterlegt sind die jeweils höchsten, signifikanten Korrelationen  $> |0,5|$  zwischen Bestandesmerkmal und  $\sigma^0$

Die signifikanten Beziehungen zwischen Bestandesmerkmalen und Radarrückstreuung eines Weizenbestandes wiesen kaum Regelmäßigkeiten über verschiedene Entwicklungsstadien hinweg auf. Die Ergebnisse zeigten, dass die einzelnen Radarkanäle im Vegetationsverlauf unterschiedlich stark mit den Bestandesmerkmalen korrelierten und kein Trend hinsichtlich eines höheren Informationspotenzials eines Radarkanals vorlag. Lediglich 10.3 zeigte für die aufeinanderfolgenden Aufnahmetermine 08. Mai 2002 und 05. Juni 2002 jeweils die höchsten Korrelationskoeffizienten zwischen X-HH und der Bestandesdichte (Tab. 4-19).

Betrachtet man die Analyseergebnisse von 10.3 an nahezu identischen Aufnahmezeitpunkten (08. Mai) in beiden Jahren (Tab. 4-19), so waren kaum Gemeinsamkeiten hinsichtlich der Beziehungen zwischen frischer Biomasse bzw. Bestandesdichte und der Radarrückstreuung festzustellen, obwohl zu beiden Terminen nahezu gleiche Bedingungen bezüglich der Anbaurichtung (Tab. 3-3) und der Bestandesentwicklung (Tab. 4-1, Tab. 4-3) herrschten. Hervorzuheben sei hier das L-HH, welches am 08. Mai 2001 signifikante Korrelationen sowohl mit der Bestandesdichte ( $r = 0,56$ ) als auch mit der frischen Biomasse ( $r = 0,55$ ) zeigte, im Jahr 2002 jedoch keinen Zusammenhang erkennen ließ. Tendenziell stimmte lediglich die beste Beziehung zwischen Radarrückstreuung und frischer Biomasse in beiden Jahren überein. Sowohl am 08. Mai 2001 ( $r = -0,63$ ; bei  $\alpha = 0,01$ ) als auch am 08. Mai 2002 ( $r = -0,4$ ; bei  $\alpha = 0,05$ ) war der höchste Korrelationskoeffizient für die Beziehung zwischen frischer Biomasse und dem X-HH zu registrieren.

Aus den Ergebnissen der Korrelationsanalyse (Tab. 4-19) geht hervor, dass zwischen Bestandesdichte und Radarrückstreuung kaum signifikante Beziehungen bestanden, für die eine regressionsanalytische Modellierung aussagekräftige Ergebnisse liefern würde. Lediglich der Zusammenhang zwischen der Bestandesdichte und der Rückstreuung im X-HH auf 10.2 am 09. Juni 2001 hätte zu einem Modell geführt, welches 59 % der Variabilität erklären könnte. Aus mangelnden Vergleichbarkeitsgründen mit dem Modellierungsergebnis des NDVI (Abb. 4-16), auf dessen Grundlage lediglich die Bestandesdichte für 10.3 ausreichend gut modelliert werden konnte, wurde in dieser Arbeit auf die regressionsanalytische Modellierung der Bestandesdichte auf Basis der Einzelkanalrückstreuung verzichtet.

### Diskriminanzanalyse

Ein Gütemaß für die Trennkraft der Diskriminanzfunktionen ist das *Wilk's Lambda*. Es ist für alle Aufnahmetermine mit den dazugehörigen Irrtumswahrscheinlichkeiten im Anhang aufgeführt (Tab. A-10). Anhand der teilweise niedrigen *Wilk's Lambda* und den geringen Irrtumswahrscheinlichkeiten ( $0,6 \% \leq \alpha \leq 8,5 \%$ ) war zu erkennen, dass einzelne Radarkanäle durchaus diskriminatorisches Potenzial bezüglich der vorgegebenen Gruppierung der Bestandesdichte aufwiesen. Zur Überprüfung, inwieweit das Diskriminanzmodell geeignet war, um auf Basis der Radarrückstreuwerte auf die Gruppenzugehörigkeit zu schließen, wurde die Diskriminanzfunktion in ein Vorhersagemodell umgesetzt. In Tabelle 4-20 sind die Klassifizierungsgenauigkeiten der ermittelten Diskriminanzfunktionen dargestellt.

**Tab. 4-20:** Klassifizierungsgenauigkeit (%) der Diskriminanzfunktion unter Verwendung der mittleren Radarrückstreuung ( $\sigma^0$ ) der Einzelkanäle als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Untersuchungsgebiet: Neetzow).

Clustervariante		Radarkanal						r-cross
		Bestandesdichte	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	
<b>08. Mai 2001</b>								
10.3 n=16	Original	50,0	43,8	37,5	50,0	43,8	37,5	43,8
	Kreuzvalidierung	25,0	37,7	25,0	50,0	43,8	12,5	31,3
10.2 n=11	Original	27,3	45,5	36,4	45,5	36,4	45,5	45,5
	Kreuzvalidierung	0,0	18,2	9,1	36,4	9,1	27,3	45,5
<b>09. Juni 2001</b>								
10.3 n=16	Original	55,6	38,9	55,6	38,9	38,9	50,0	33,3
	Kreuzvalidierung	55,6	27,8	55,6	22,2	38,9	44,4	2,2
10.2 n=13	Original	46,2	23,1	76,9	53,8	69,2	53,8	46,2
	Kreuzvalidierung	30,8	7,7	69,2	53,8	61,5	46,2	30,8
<b>07. April 2002</b>								
10.3 n=26	Original	19,2	42,3	53,8	38,5	53,8	34,6	38,5
	Kreuzvalidierung	11,5	38,5	50,0	34,6	53,8	30,8	26,9
3.2 n=12	Original	58,3	50,0	58,3	58,3	33,3	58,3	58,3
	Kreuzvalidierung	58,3	50,0	50,0	50,0	16,7	41,7	58,3
<b>08. Mai 2002</b>								
10.3 n=26	Original	34,6	38,5	30,8	23,1	61,5	50,0	26,9
	Kreuzvalidierung	30,8	26,9	26,9	15,4	53,8	26,9	11,5
3.2 n=17	Original	29,4	41,2	52,9	70,6	58,8	52,9	70,6
	Kreuzvalidierung	23,5	35,3	47,1	64,7	41,2	52,9	58,8
<b>05. Juni 2002</b>								
10.3 n=24	Original	29,2	45,8	29,2	58,3	66,7	33,3	54,2
	Kreuzvalidierung	12,5	37,5	25,0	58,3	58,3	33,3	33,3
3.2 n=15	Original	60,0	40,0	46,7	46,7	40,0	46,7	46,7
	Kreuzvalidierung	40,0	40,0	26,7	46,7	33,3	33,3	46,7

r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, grau unterlegt sind alle Trefferquoten > 50 % (kreuzvalidiert)

Die Klassifizierungsgenauigkeiten (Trefferquoten) lagen teilweise bei über 50 %, was auf Zusammenhänge zwischen der Radarrückstreuung der Einzelkanäle und den generalisierten Bestandesdichtegruppen hindeutete (Tab. 4-20). Besonders hervorzuheben sind hier die hohen Klassifizierungsgenauigkeiten für das L-VV (69,2 %) auf 10.2 (09. Juni 2001) und das L-VH (64,7 %) auf 3.2 (08. Mai 2002). Betrachtet man sowohl die Trefferquoten beider Bestände an einem Termin als auch die Trefferquoten für einen Bestand an unterschiedlichen Terminen, so kristallisierte sich kein Einzelkanal heraus, der durchgängig eine gute Trennkraft hinsichtlich der vorgegebenen Gruppierung aufwies.

Im Folgenden wird die Verteilung der Bestandesdichteklassen auf 10.3 exemplarisch für den Aufnahmetermin 05. Juni 2002 (Ährenschieben) modelliert. Hierfür wurden die mittels der Rückstreuung des X-HH ermittelten Klassifikationsfunktionen mit den jeweiligen Pixelwerten im Radarbild verrechnet. Die einzelnen Parameter der Klassifikationsfunktionen sind aus Tabelle 4-21 zu entnehmen.

**Tab. 4-21:** Fisher's Klassifikationsfunktionen als Ergebnis der Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Radarinformation als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte des Winterweizens als abhängige Variable (Testfläche 10.3 in Neetzow am 05. Juni 2002).

Radarkanal		Fisher's Klassifikationsfunktion		
		1	2	3
X-HH	b	-19,40	-17,87	-17,07
	a	-98,05	-83,36	-76,23

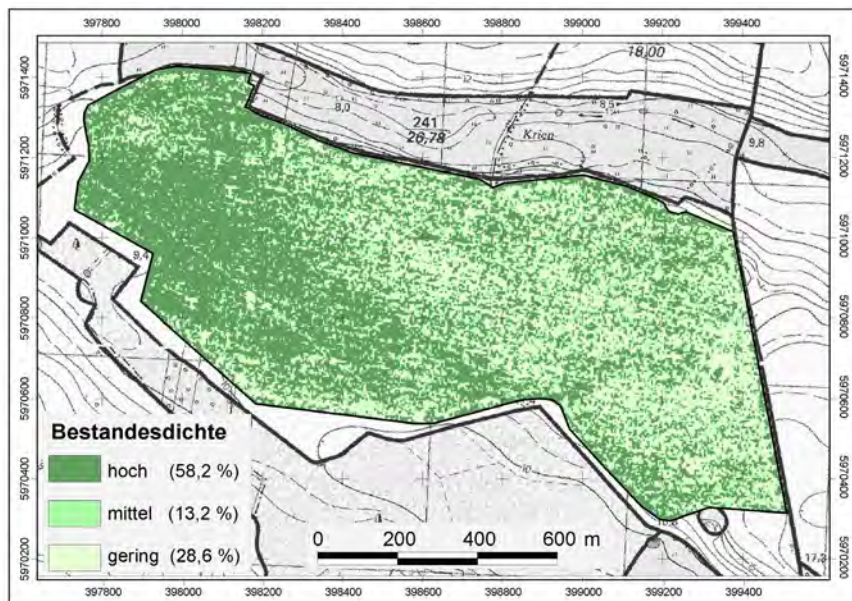
a: Konstante, b: Diskriminanzkoeffizient

Die detaillierten Klassifizierungsergebnisse der Klassifikationsfunktionen sind aus der Klassifikationsmatrix (Abb. 4-20) ersichtlich. Sie zeigen die Prognoseungenauigkeiten bezüglich der einzelnen Gruppen. Die Zuordnung zu „Gruppe 1“ war dabei mit nur 50 % korrekt zugeordneter Werte nach der Kreuzvalidierung am unsichersten.

Radarkanal: X-HH		Gruppe	Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit			Gesamt
			1	2	3	
Original	Anzahl	1	3	1	0	4
		2	1	5	2	8
		3	1	3	8	12
	%	1	75,0	25,0	0,0	100,0
		2	12,5	62,5	25,0	100,0
		3	8,3	25,0	66,7	100,0
Kreuzvalidierung	Anzahl	1	2	2	0	4
		2	1	5	2	8
		3	1	4	7	12
	%	1	50,0	50,0	0,0	100,0
		2	12,5	62,5	25,0	100,0
		3	8,3	33,3	58,3	100,0

**Abb. 4-20:** Klassifikationsmatrix der Diskriminanzfunktion unter Verwendung der Radarrückstreuung des X-HH als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte als abhängige Variable (10.3 in Neetzow am 05. Juni 2002); es wurden 66,7 % der ursprünglich gruppierten Fälle und 58,3 % der kreuzvalidierten Fälle korrekt klassifiziert (1: hoch, 2: mittel, 3: gering).

Die ermittelten Klassifikationsfunktionen wurden direkt als Rechenoperationen auf die Radarrückstreuwerte der Bildpixel angewendet, so dass sich die in Abbildung 4-21 dargestellte Bestandesdichteverteilung auf Klassenbasis ergab.



**Abb. 4-21:** Bestandesdichteverteilung in drei Klassen zum Zeitpunkt des Ährenschiebens des Winterweizens (05. Juni 2002) auf 10.3 in Neetzow mit dem prozentualen Flächenanteil. Die Bestandesdichte wurde anhand der ermittelten Klassifikationsfunktionen (Tab. 4-21) aus der Radarrückstreuung des X-HH prognostiziert (WGS 84, UTM Zone 33).

Im Vergleich zur Referenz der Bestandesdichteverteilung modelliert auf Basis des NDVI (Kap. 4.4.1) zeigte sich ein sehr geringer Flächenanteil der „mittleren Klasse“ bei



gleichzeitiger Dominanz der „hohen Klasse“. Diese Fehlklassifikation bezüglich der „hohen Klasse“ (Gruppe 1) wurde schon durch die Klassifikationsmatrix angedeutet (Abb. 4-20), ließ sich dort aber nicht in solchem Ausmaß erkennen.

4.4.3 Beziehungen zwischen Polarisationsindizes und Bestandesmerkmalen

Neben der Analyse der Radarkanäle wurde eine Vielzahl von linearen Kanalkombinationen (n=76) hinsichtlich ihrer Beziehungen zu den Bestandesmerkmalen untersucht, um einen möglichen Informationszugewinn durch die simultane Verwendung verschiedener Wellenlängen und Polarisationen aufzudecken. Ziel dieser Analyse war es zu prüfen, inwieweit die Beziehungen zwischen Bestandesmerkmalen und Radarinformation im Vergleich zu den Einzelkanälen verbessert wurden.

Korrelations- und Regressionsanalyse zu verschiedenen Wachstumsphasen des Winterweizens

In den beiden folgenden Tabellen 4-22 und 4-23 sind die Polarisationsindizes aufgeführt, welche die höchsten Korrelationen mit den Bestandesmerkmalen frische Biomasse und Bestandesdichte je Testfläche zeigten. Hierbei ist anzumerken, dass je Aufnahmetermin noch weitere Polarisationsindizes gleich hohe Korrelationskoeffizienten aufwiesen. Diese sind in der vollständigen Zusammenstellung der Ergebnisse in den Tabellen A-9a bis A-9e im Anhang aufgeführt.

Tab. 4-22: Höchste Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelation (nach PEARSON) zwischen Polarisationsindizes und Bestandesmerkmalen von Winterweizen der Testflächen in Neetzow (2001).

FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]				
Termin	08. Mai 2001		09. Juni 2001	
Testfläche	10.2 (n=11)	10.3 (n=16)	10.2 (n=13)	10.3 (n=18)
PI	XHH - XVV	r <sub>-cross</sub> / XHH	(XVV + XHH) <sup>-2</sup>	LHV / XVV
r	-0,74**	-0,67**	0,69**	0,66**
Bestandesdichte [Halme m <sup>-2</sup> ]				
PI	(LVV + XHH) / (LVV - XHH)	LHH - XHH	(XVV + XHH) <sup>-2</sup>	LHV / XVV
r	0,76**	0,57*	0,69**	0,61**

FM<sub>v</sub>: Biomasse Frischgewicht, PI: Polarisationsindex, r<sub>-cross</sub>: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, Signifikanzniveau \*: α = 0,05, \*\*: α = 0,01

Für die Korrelationsanalyse der Polarisationsindizes gilt, wie für die der Einzelkanäle (Kap. 4.4.2) auch, dass keinerlei Regelmäßigkeiten in den Beziehungen zu den Bestandesmerkmalen erkennbar waren. Die ermittelten Korrelationskoeffizienten deuteten

jedoch auf ein höheres Informationspotenzial der Polarisationsindizes zur Erfassung von Bestandesunterschieden im Vergleich zu den Einzelkanälen hin (Tab. 4-19, Tab. 4-22, Tab. 4-23). In der Mehrzahl der Aufnahmetermine wurde die Korrelation zwischen Radarinformation und frischer Biomasse sowie Bestandesdichte durch die Verwendung von zusätzlicher Radarinformation erhöht.

**Tab. 4-23:** Höchste Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelation (nach PEARSON) zwischen Polarisationsindizes und Bestandesmerkmalen von Winterweizen der Testflächen in Neetzow (2002).

FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]						
Termin	07. April 2002		08. Mai 2002		05. Juni 2002	
Testfläche	3.2 (n=12)	10.3 (n=26)	3.2 (n=17)	10.3 (n=26)	3.2 (n=15)	10.3 (n=24)
PI	LHH - XHH	LHH + LHV + LVV + LVH	LHH - XVV	(LVH + XHH) / (LVH - XHH)	(XHH + XVV) / (XHH - XVV)	(r <sub>-cross+</sub> + XHH) / (r <sub>-cross-</sub> - XHH)
r	0,53	0,54**	0,66**	0,46*	-0,36	0,50

Bestandesdichte [Halme m <sup>-2</sup> ]						
PI	(LVV - XHH) / (LVV + XHH)	XHH - XVV	(LHH + XVV) / (LHH - XVV)	(LVH + XHH) / (LVH - XHH)	LHV - XHH	(r <sub>-cross+</sub> + XHH) / (r <sub>-cross-</sub> - XHH)
r	-0,62*	-0,39*	0,55*	0,44*	0,30	0,65**

FM<sub>v</sub>: Biomasse Frischgewicht, PI: Polarisationsindex, r<sub>-cross-</sub>: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, Signifikanzniveau \*:  $\alpha = 0,05$ , \*\*:  $\alpha = 0,01$

So konnten beispielsweise auf 10.2 am 08. Mai 2001 die höchsten Korrelationen von  $r = -0,74$  (FM<sub>v</sub>) und  $r = 0,76$  (Bestandesdichte) ermittelt werden, wohingegen die Einzelkanäle am gleichen Aufnahmetermin keinerlei signifikante Zusammenhänge aufwiesen (Tab. 4-19). Dagegen blieben die Korrelationen auf 10.3 (Tab. 4-22) an selbigem Aufnahmetermin auf nahezu gleichem Niveau wie bei den Einzelkanälen (Tab. 4-19). Lediglich auf 10.2 am 09. Juni 2001 konnten die starken bis sehr starken Korrelationen, die für das X-HH vorlagen (Tab. 4-19), durch keinen Polarisationsindex erreicht werden, auch wenn die Kanalkombination  $(XVV + XHH)^{-2}$  einen ebenfalls stark ausgeprägten Zusammenhang ( $r = 0,69$ ; bei  $\alpha = 0,01$ ) mit der frischen Biomasse sowie der Bestandesdichte zeigte (Tab. 4-22). Im Jahr 2002 führte die Verwendung zusätzlicher Radarinformation durchweg zu einer Verbesserung der Zusammenhänge.

Betrachtet man die höchsten Korrelationskoeffizienten je Bestand, so wird deutlich, dass diese bei beiden Bestandesmerkmalen für ähnliche Kanalkombinationen vorlagen. Folglich unterschieden sich Bestandesdichte und frische Biomasse nur geringfügig hinsichtlich ihres Einflusses auf die Radarrückstreuung. Diese Aussage wird durch die Betrachtung der vollständigen Auflistung der Korrelationskoeffizienten aller Polarisationsindizes im Anhang unterstrichen (Tab. A-9a-e).

Aus den Tabellen 4-22 und 4-23 wird zudem deutlich, dass die informativsten Kanalkombinationen meistens aus Kanälen beider Wellenlängen bestanden. Die Kombinationen aus den ko-polaren Kanälen beider Wellenlängen bestanden hauptsächlich aus horizontaler und vertikaler Polarisation, wobei diese nicht an eine Wellenlänge gebunden waren. Vor allem die Kombination eines Kanals des X-Bandes mit einer Kreuz-Polarisation des L-Bandes zeigte häufig gute Korrelationen.

Die Betrachtung der signifikanten Beziehungen zwischen Bestandesmerkmalen und Polarisationsindizes über den Zeitraum verschiedener Entwicklungsstadien des Winterweizens hinweg machte auch hier die Inkonsistenz der Daten deutlich. Es waren kaum Regelmäßigkeiten bezüglich der Kanalkombinationen zu erkennen. Die wenigen erkennbaren Trends werden im Folgenden beschrieben. Im Jahr 2001 war auf 10.2 an beiden aufeinanderfolgenden Aufnahmetermen eine Kanalkombination aus beiden Kanälen des X-Bandes am besten geeignet, die Variabilität frischer Biomasse zu erfassen. Im Jahr 2002 lagen die stärksten Korrelationen zwischen Bestandesmerkmalen und Radarinformation an den aufeinanderfolgenden Aufnahmetermen 08. Mai und 05. Juni für einen Polarisationsindex aus dem X-HH und einem kreuz-polaren Kanal des L-Bandes vor (Tab. 4-22, Tab. 4-23).

Die Inkonsistenz der Radardaten zeigte sich ebenfalls bei der Betrachtung nahezu identischer Aufnahmetermine während des Schossens des Winterweizens. Die Analyseergebnisse vom 08. Mai 2001 (Tab. 4-22) und vom 08. Mai 2002 (Tab. 4-23) unterschieden sich erheblich voneinander. Die Zusammenhänge zwischen der frischen Biomasse als auch der Bestandesdichte und den Polarisationsindizes waren am 08. Mai 2001 stärker ausgeprägt als am 08. Mai 2002. Die besten Korrelationen bestanden mit verschiedenen Indizes die sich in den verwendeten Kanalkombinationen unterschieden. Lediglich die Polarisationsindizes, welche an beiden Terminen die besten Korrelationen mit der frischen Biomasse aufwiesen setzten sich jeweils aus der Rückstreuintensität des X-HH und eines kreuz-polarisierten Kanals des L-Bandes zusammen (Tab. 4-22, Tab. 4-23).

Obwohl die Polarisationsindizes zwar tendenziell bessere Zusammenhänge mit der Bestandesdichte zeigten als die Einzelkanäle, wiesen die Ergebnisse der Regressionsanalyse nur einen geringen Anteil erklärter Variabilität auf (Tab. 4-24). Lediglich für 10.2 am 08. Mai 2001 konnte das Regressionsmodell 58 % der Gesamtvarianz der Bestandesdichte erklären. Die

anderen Modelle wiesen geringe Bestimmtheitsmaße zwischen  $0,09 < r^2 < 0,47$  auf, so dass eine Schätzung der Bestandesdichte auf Grundlage der Polarisationsindizes nur mit sehr großer Unsicherheit erfolgen konnte.

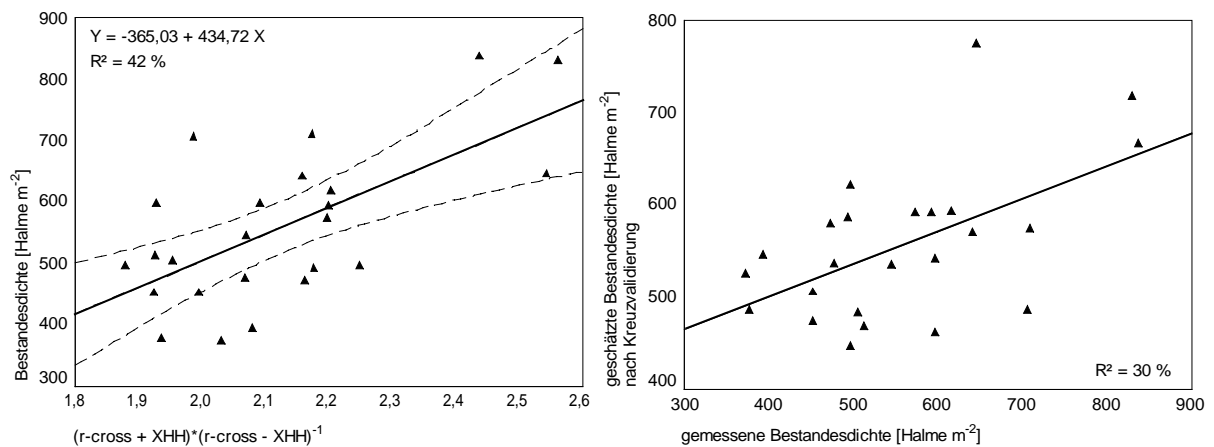
Um einen Vergleich mit der aus dem NDVI generierten Referenz der Bestandesdichte (Kap. 4.4.1) zu ermöglichen, wurde die Bestandesdichtemodellierung exemplarisch für 10.3 am 05. Juni 2002 auf Basis des Polarisationsindizes  $(r\text{-cross} + XHH) * (r\text{-cross} - XHH)^{-1}$  durchgeführt. Das verwendete Regressionsmodell konnte 42 % der Varianz erklären (Tab. 4-24).

**Tab. 4-24:** Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ) und Standardschätzfehler ( $\hat{\sigma}$ ) der linearen Regression von Polarisationsindex und Bestandesdichte von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow zu verschiedenen Aufnahmetermen.

Testfläche		08. Mai 2001	09. Juni 2001	07. April 2002	08. Mai 2002	05. Juni 2002
10.2	Index	$(LVV + XHH) / (LVV - XHH)$	$(XVV + XHH)^{-2}$	n.e	n.e	n.e
	$r^2$	0,58	0,47	n.e	n.e	n.e
	$\hat{\sigma}(y   x)$	81,86	92,79	n.e	n.e	n.e
10.3	Index	LHH - XHH	LHV / XVV	XHH - XVV	$(LVH + XHH) / (LVH - XHH)$	$(r\text{-cross} + XHH) / (r\text{-cross} - XHH)$
	$r^2$	0,33	0,37	0,16	0,19	0,42
	$\hat{\sigma}(y   x)$	110,81	68,94	14,25	178,27	98,35
3.2	Index	n.e	n.e	$(LVV - XHH) / (LVV + XHH)$	$(LHH + XVV) / (LHH - XVV)$	LHV - XHH
	$r^2$	n.e	n.e	0,39	0,30	0,09
	$\hat{\sigma}(y   x)$	n.e	n.e	17,78	82,98	57,52

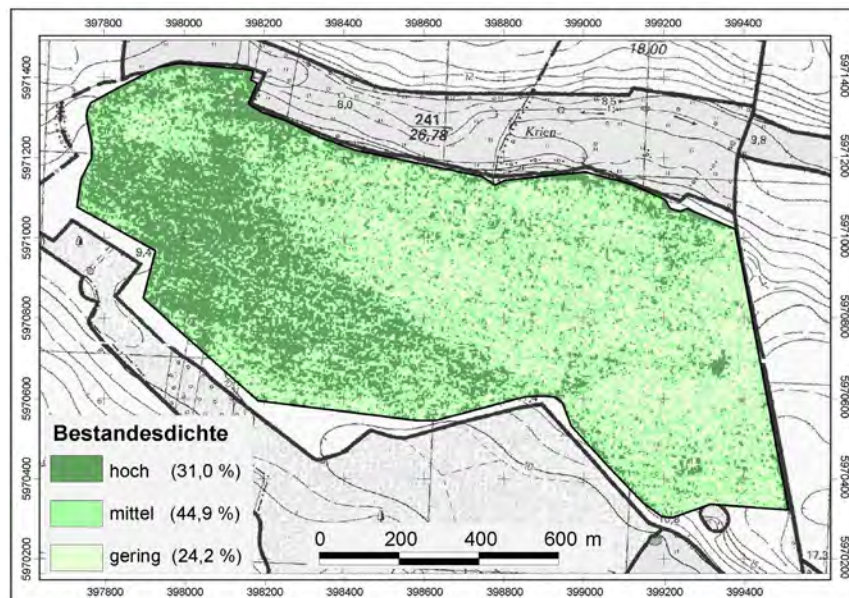
$r\text{-cross}$ : Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen,  $\hat{\sigma}(y | x)$ : Standardschätzfehler, n.e.: nicht ermittelt

In Abbildung 4-22 ist die ermittelte Regressionsgerade mit der dazugehörigen Modellgleichung zur Schätzung der Bestandesdichte dargestellt. Die Gegenüberstellung der durch die *Leave-one-out* Kreuzvalidierung ermittelten Werte mit den im Feld gemessenen Bestandesdichten führte zu einem Bestimmtheitsmaß von  $r^2 = 30\%$  (Abb. 4-22, rechts). Die beträchtliche Abweichung zum ursprünglich aus allen Stichproben ermittelten Regressionsmodell zeigte dessen große Instabilität (Abb. 4-22).



**Abb. 4-22:** Zusammenhang zwischen Bestandesdichte des Winterweizens und dem Polarisationsindex  $(r\text{-cross} + X\text{-HH}) * (r\text{-cross} - X\text{-HH})^{-1}$  auf 10.3 (05. Juni 2002) in Neetzow, links: Regressionsmodell mit dem 95 %-Konfidenzintervall. Rechts: Korrelation zwischen kreuzvalidiert geschätzter Bestandesdichte und im Feld gemessener Bestandesdichte ( $n = 24$ ).

Die Verrechnung der Pixelwerte der Bilddaten mit der ermittelten Regressionsgleichung ( $y = -365,03 + 434,72 x$ ) ergab für den Bestand von 10.3 zum Zeitpunkt des Ährenschiebens (05. Juni 2002) die in Abbildung 4-23 dargestellte Bestandesdichteverteilung. Aus Vergleichbarkeitsgründen wurde die Klasseneinteilung so gewählt, dass sie den Ergebnissen der Clusteranalyse folgte, die der Diskriminanzanalyse zugrunde lagen (Tab. A-2c).



**Abb. 4-23:** Bestandesdichteverteilung in drei Klassen zum Zeitpunkt des Ährenschiebens des Winterweizens (05. Juni 2002) auf 10.3 in Neetzow mit prozentalem Flächenanteil. Die Bestandesdichte wurde anhand des Regressionsmodells  $y = -365,03 + 434,72 x$  aus dem Polarisationsindex  $(r\text{-cross} + XHH) * (r\text{-cross} - XHH)^{-1}$  prognostiziert (WGS 84, UTM Zone 33).

Die Verifikation der modellierten Bestandesdichteverteilung anhand der „Referenz-Bestandesdichte“ (Abb. 4-16) zeigte deutliche Unterschiede. Auffällig waren insbesondere die Abweichungen im prozentualen Flächenanteil der Klassen „hohe“ und „geringe“ Bestandesdichte (Abb. 4-16, Abb. 4-23).

#### *Diskriminanzanalyse der Polarisationsindizes*

Die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse zeigen verschiedene Polarisationsindizes, die aufgrund ihrer niedrigen *Wilk's Lambda-Werte* und geringen Irrtumswahrscheinlichkeiten ( $\alpha < 10\%$ ) darauf hindeuten, dass die jeweiligen Diskriminanzfunktionen geeignet sind, um die Gruppenzugehörigkeit ausreichend zu erklären (Tab. A-10).

In Tabelle 4-25 sind die Polarisationsindizes, deren Diskriminanzmodelle die höchsten Klassifizierungsgenauigkeiten aufwiesen, für die einzelnen Testflächen je Aufnahmetermin aufgeführt. Zur Beurteilung der Klassifikationsgenauigkeit wurden die Trefferquote sowie die fehlerbereinigte Trefferquote der ermittelten Klassifikationsfunktionen herangezogen. Es existierten häufig mehrere Polarisationsindizes, die eine gleich hohe fehlerbereinigte Trefferquote erzielten. In diesen Fällen wurde nur ein Index in die Tabelle aufgenommen. Die Trefferquoten der anderen Indizes sind in Tabelle A-11 im Anhang aufgeführt.

Die Ergebnisse zeigten mit Ausnahme für 3.2 am 08. Mai 2002 eine Verbesserung der fehlerbereinigten Klassifizierungsgenauigkeit, wenn anstelle der ausschließlichen Information eines Radarkanals eine Kombination aus zwei Kanalinformationen verwendet wurde (Tab. 4-20, Tab. 4-25). Die Verbesserung der Trefferquote variierte im Bereich von  $\Delta = 3,9\%$  -  $12,5\%$ . Die relativ guten Trefferquoten lassen das durchaus vorhandene Potenzial zur Unterscheidung der Bestandesdichtegruppen auf Basis von Polarisationsindizes erkennen. Es konnte demnach von Zusammenhängen zwischen einzelnen Polarisationsindizes und der Bestandesdichte ausgegangen werden. Die Ergebnisse variierten jedoch hinsichtlich der besten Kanalkombinationen für jede Testfläche und jeden Aufnahmetermin, so dass sich kein Polarisationsindex herauskristallisierte, der generell oder zumindest an einem bestimmten Aufnahmetermin für eine Klassifizierung in drei verschiedene Bestandesdichteklassen geeignet war. Vielmehr hatten die Ergebnisse immer nur schlag- und terminspezifische Gültigkeit.

**Tab. 4-25:** Klassifizierungsgenauigkeit der Diskriminanzfunktion unter Verwendung eines Polarisationsindizes als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Untersuchungsgebiet: Neetzow).

Testfläche	Polarisations-index	Trefferquote	
		Original [%]	Kreuzvalidierung [%]
08. Mai 2001			
10.3 (n=16)	(LVV + LHH) / (LVV - LHH)	62,5	62,5
10.2 (n=11)	LHH + LVV + LHV + LVH	54,5	54,5
09. Juni 2001			
10.3 (n=18)	(LVV - LHH) / ((LVV + LHH) (a)	66,7	61,1
10.2 (n=13)	(LHV - LVV) / (LHV + LVV) (a)	84,6	76,9
07. April 2002			
10.3 (n=26)	(LVV + LHH) <sup>2</sup> (a)	61,5	57,7
3.2 (n=12)	(LVV + XHH) / (LVV - XHH) (a)	75,0	66,7
08. Mai 2002			
10.3 (n=26)	(LHH - XHH) / (LHH + XHH) (a)	61,5	57,7
3.2 (n=17)	LHH - r-cross (a)	58,8	58,8
05. Juni 2002			
10.3 (n=24)	XHH / LHV (a)	66,7	66,7
3.2 (n=15)	LHH + LVV + LHV + LVH (a)	60,0	53,3
r-cross: Mittelwert der beide Kreuzpolarisationen, (a): es existieren mehrere Polarisationsindizes mit gleich hoher fehlerbereinigter Trefferquote			

Die Verteilung der Bestandesdichte wurde exemplarisch für 10.3 am 05. Juni 2002 (Ährenschieben) mittels des Polarisationsindizes  $X-HH * L-HV^{-1}$  modelliert. Hierfür wurden die Pixelwerte der Bilddaten mit den ermittelten Klassifikationsfunktionen (Tab. 4-26) verrechnet.

**Tab. 4-26:** Fisher's Klassifikationsfunktionen als Ergebnis der Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Radarinformation als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (10.3 in Neetzow am 05. Juni 2002).

Polarisations-index		Fisher's Klassifikationsfunktion		
		1	2	3
X-HH * L-HV <sup>-1</sup>	b	376,72	357,76	330,23
	a	-73,92	-66,77	-57,06
a: Konstante, b: Diskriminanzkoeffizient				

Die detaillierten Klassifizierungsergebnisse und die Prognoseungenauigkeiten bezüglich der einzelnen Gruppen sind in der Klassifikationsmatrix zusammengefasst (Abb. 4-24). Wie auch schon in Kap. 4.4.2 für das X-HH dargestellt wurde (Abb. 4-20), war die Zuordnung der „Gruppe 1“ (hohe Bestandesdichte) mit nur 50 % korrekt zugeordneter Werte nach der Kreuzvalidierung mit der höchsten Unsicherheit behaftet.

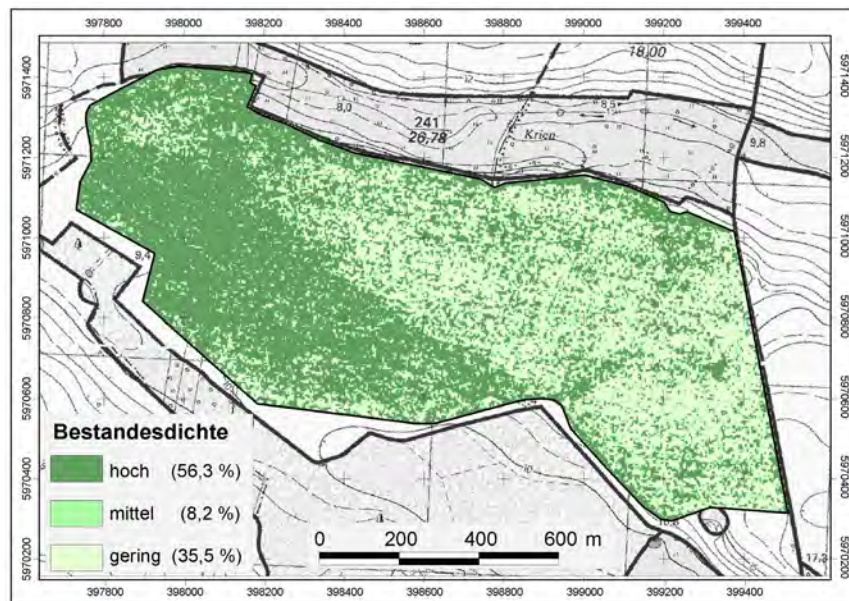
Der Vergleich des Modellierungsergebnisses (Abb. 4-25) mit der Bestandesdichteverteilung, die basierend auf dem X-HH modelliert wurde (Abb. 4-21), zeigte eine nahezu identische räumliche Verteilungsstruktur der drei Bestandesdichteklassen. Dies deutete auf einen ähnlichen Informationsgehalt der zugrundeliegenden Radarinformation hin. Dieses Ergebnis wurde durch die gleich hohe Klassifizierungsgenauigkeit (66,7 %) bei lediglich geringfügiger Abweichung in der bereinigten Trefferquote (58,3 % vs. 66,7 %) erhärtet (Tab. 4-20, Tab. 4-25). Die zusätzliche Verwendung der Radarinformation des L-HV in Verbindung mit dem X-HH führte demnach zu keiner Verbesserung der Klassifikation.

X-HH * L-HV <sup>-1</sup>		Vorhergesagte Gruppenzugehörigkeit				Gesamt
		Gruppe	1	2	3	
Original	Anzahl	1	2	1	1	4
		2	1	5	2	8
		3	1	2	9	12
	%	1	50,0	25,0	25,0	100,0
		2	12,5	62,5	25,0	100,0
		3	8,3	16,7	75,0	100,0
Kreuzvalidierung	Anzahl	1	2	1	1	4
		2	1	5	2	8
		3	1	2	9	12
	%	1	50,0	25,0	25,0	100,0
		2	12,5	62,5	25,0	100,0
		3	8,3	16,7	75,0	100,0

**Abb. 4-24:** Klassifikationsmatrix der Diskriminanzfunktion unter Verwendung des Polarisationsindizes X-HH \* L-HV<sup>-1</sup> als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (10.3 in Neetzow am 05. Juni 2002); es wurden 66,7 % der ursprünglich gruppierten Fälle und 66,7 % der kreuzvalidierten Fälle korrekt klassifiziert (1: hoch, 2: mittel, 3: gering).

Auffällig war zudem der sehr geringe Flächenanteil der „mittleren“ Bestandesdichte bei gleichzeitiger Dominanz der „hohen“ Bestandesdichte (Abb. 4-25).





**Abb. 4-25:** Bestandesdichteverteilung in drei Klassen zum Zeitpunkt des Ährenschiebens (05. Juni 2002) auf 10.3 in Neetow mit prozentuellem Flächenanteil. Die Bestandesdichte wurde anhand der ermittelten Klassifikationsfunktionen (Tab. 4-26) aus dem Polarisationsindex  $X-HH * L-HV^1$  prognostiziert (WGS 84, UTM Zone 33).

#### 4.4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse zur räumlichen Variabilität und Modellierung der Bestandesmerkmale

Die Untersuchungen waren darauf ausgerichtet, die Eignung von Radarbilddaten und optischen Bilddaten zur Erfassung und Modellierung der Variabilität von Bestandesmerkmalen in Winterweizen zu analysieren. Die in Kapitel 4.4 erarbeiteten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Aussagen über die Eignung der Radarinformation zur Erfassung von Bestandesunterschieden, die für die gesamte Vegetationsperiode Gültigkeit haben, ließen sich aufgrund der ermittelten Zusammenhänge nicht ableiten. Es bestanden zwar signifikante Korrelationen, doch waren keine regelmäßigen oder wiederkehrenden Zusammenhänge vorhanden. Vielmehr zeigte sich ein sehr heterogenes Bild, in dem kein Trend und keine Konstanz in den vorhandenen Beziehungen erkennbar waren. Es bestanden zu jedem Aufnahmeterrain Korrelationen zwischen Bestandesmerkmalen und jeweils anderen Radarkanälen oder Polarisationsindizes. Ferner zeigten sich die Radardaten inkonsistent im Vergleich zweier Vegetationsperioden. Es existierten keinerlei Gemeinsamkeiten hinsichtlich

der Beziehungen zwischen Radarinformation und Bestandesmerkmalen bei nahezu identischen Aufnahmebedingungen.

Die linearen Zusammenhänge zwischen Radarkanälen und Bestandesmerkmalen während verschiedener Entwicklungsstadien von Winterweizen waren insgesamt relativ gering. Folglich war auch die Eignung der Einzelkanäle zur Erfassung der Bestandesvariabilität stark eingeschränkt. Tendenziell lagen im X-Band bessere Beziehungen zur frischen Biomasse und Bestandesdichte vor als im L-Band, was für ein größeres Potenzial der kurzen Wellenlänge zur Erfassung schlaginterner Heterogenitäten sprach. Keinerlei signifikante Korrelationen mit den Bestandesmerkmalen zeigten dagegen die Kreuz-Polarisationen des L-Bandes.

Die Verwendung multi-dimensionaler Radarinformation in Form von Polarisationsindizes führte in der Mehrzahl der Fälle zu einem Anstieg der Korrelationen mit den Bestandesmerkmalen. Die Polarisationsindizes wiesen somit ein höheres Informationspotenzial zur Erfassung von Bestandesunterschieden im Vergleich zu den einzelnen Radarkanälen auf. Insbesondere eine Kanalkombination aus beiden Wellenlängen führte oftmals zu guten Ergebnissen. Hier schien vor allem die Kombination aus einem Kanal des X-Bandes und einer Kreuz-Polarisation des L-Bandes ein hohes Informationspotenzial bereitzustellen.

Die Korrelationsanalyse zwischen NDVI und Bestandesmerkmalen deutete auf starke Zusammenhänge hin. Die Beziehungen waren stärker ausgeprägt, als für die Radardaten nachgewiesen werden konnte.

Die Modellierung der Bestandesdichte wurde zum einen auf Punktbasis (Regressionsmodell) und zum anderen auf einer generalisierten Klassenebene (Diskriminanzmodell) durchgeführt. Der Erklärungswert der verschiedenen Modellansätze variierte sowohl zwischen den Aufnahmetermen als auch zwischen den einzelnen Testflächen erheblich. Dies galt sowohl für den NDVI als auch für die Radarinformation. Die Regressionsmodelle der Einzelkanäle und Polarisationsindizes zeigten nur einen geringen Anteil an erklärter Variabilität des Bestandes.

Die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse der Radardaten kann dahingehend zusammengefasst werden, dass der Erklärungswert der Modelle im Zuge der Generalisierung tendenziell verbessert wurde. Sowohl die Radarkanäle als auch die Polarisationsindizes wiesen

zu allen Aufnahmetermen ein diskriminatorisches Potenzial bezüglich der vorgegebenen Gruppierung der Bestandesdichte auf. Die Umsetzung der Modellgleichungen auf die Pixelwerte bereitete jedoch erhebliche Schwierigkeiten, die in systemspezifischen Abbildungseigenschaften des Radars begründet zu sein schienen. Zum einen zeigte das Modellierungsergebnis eine radartypische, körnige Struktur, und zum anderen bestanden in der Klassenverteilung und -größe deutliche Unterschiede im Vergleich zur Referenz-Bestandesdichte, die anhand des NDVI modelliert wurde. Sowohl das Modell auf Basis eines Einzelkanals als auch auf Basis eines Polarisationsindizes zeigte eine Klasseneinteilung, bei der die Klasse der „mittleren“ Bestandesdichte verschwindend gering, und die der „hohen“ Bestandesdichte überrepräsentiert war.

Die Modellierungsergebnisse (Kap. 4.4.1) des NDVI zeigten für das Regressions- und das Diskriminanzmodell eine nahezu identische Verteilung der Bestandesdichte. Beide Modelle unterschieden sich nur geringfügig in der Klassenzuordnung einzelner Pixel. Dies führte im Diskriminanzmodell zu verstärktem Auftreten der Klasse „hohe“ Bestandesdichte und damit einhergehend einer Verringerung der „mittleren“ Bestandesdichte im Vergleich zum Regressionsmodell.

Die Modellierungsergebnisse auf der generalisierten Klassenebene deuteten für den NDVI als auch für die Radardaten auf ein vorhandenes Potenzial zur Erfassung der räumlichen Variabilität der Bestandesdichte hin. Es fehlte jedoch sowohl über den Vegetationszeitraum hinweg als auch zu vergleichbaren Entwicklungsstadien des Winterweizens in verschiedenen Jahren an einer Generalisierbarkeit und Konstanz der Ergebnisse. Vielmehr besaßen die Resultate nur zeitpunktspezifische und schlagspezifische Gültigkeit. In beiden Fällen tendierte das Diskriminanzmodell zu verstärkter Ausweisung der Extreme. Den Ergebnissen zufolge ist jedoch der NDVI besser geeignet als die Radarrückstreuung, um sowohl die Variabilität des Bestandes auf Punktbasis als auch auf einer generalisierten Klassenebene zu erklären.

## 5 Diskussion

Die Realisierung des Konzeptes „Precision Agriculture“ (PA) erfordert neben verschiedenen technologischen Komponenten, wie GPS, GIS und variablen Applikationstechniken, die effiziente Bereitstellung geo-codierter, teilflächenspezifischer Standortinformationen. Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit war es zu prüfen, inwiefern die Radarfernerkundung hierzu geeignet ist. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass die Radarrückstreuung von Weizenbeständen sowohl lokal als auch temporal sehr variabel sein kann. Die Abhängigkeit der Radarrückstreumechanismen von einem komplexen Wirkungsgefüge unterschiedlicher Einflussfaktoren führt zu hoher Inkonsistenz der Rückstreusignaturen und zu fehlender Übertragbarkeit vorhandener Zusammenhänge zwischen Radarrückstreuung und Bestandesmerkmalen, wodurch die getroffenen Aussagen nur für die untersuchte Fläche Gültigkeit besitzen. Die Radarsignaturen lassen sich nicht mit bestimmten Entwicklungsstadien des Weizens in Verbindung bringen, so dass die Interpretation der Radardaten nur mit zusätzlicher Information über den Entwicklungszustand des Bestandes möglich ist.

In Kapitel 5.1 wird das verwendete Datenmaterial, die Plausibilität der Probenahme und die Qualität der Radardaten beurteilt, sowie die verwendeten statistischen Analysemethoden diskutiert. Kapitel 5.2 erörtert die Inkonsistenz der Radarrückstreuung während verschiedener Entwicklungsstadien von Winterweizen und erläutert deren Ursachen, bevor in Kapitel 5.3 die ermittelten Zusammenhänge zwischen Radarrückstreuung und Bestandesmerkmalen bewertet werden und auf den Informationszugewinn durch die Multi-Dimensionalität der Radardaten eingegangen wird. Die Anwendbarkeit der resultierenden Modellierungsalgorithmen ist Gegenstand des Kapitels 5.4. Zum Abschluss wird in Kapitel 5.5 eine umfassende Beurteilung des Informationspotenzials der Radarfernerkundung für die teilschlagspezifische Landwirtschaft verglichen mit der optischen Fernerkundung vorgenommen und in Kapitel 5.6 ein Ausblick in die Zukunft der Radarfernerkundung in der Landwirtschaft gegeben.

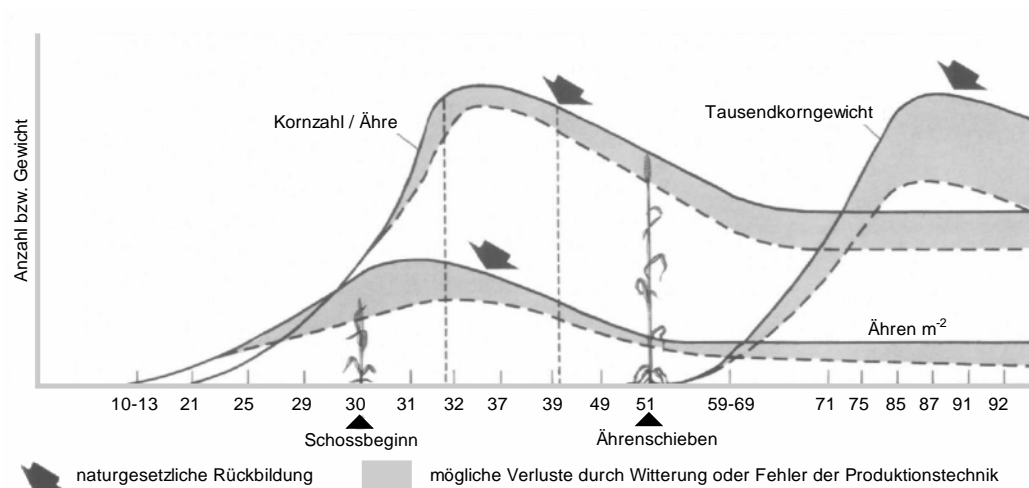
## 5.1 Beurteilung der verwendeten Daten und Methoden

### 5.1.1 Ground-Truth

Die Untersuchungen wurden in einem Zeitraum von Anfang April bis Anfang Juni durchgeführt, der nach HAAS (1995) am besten für die Erfassung von Bestandesheterogenitäten in Winterweizen geeignet ist. Die Probenahme sollte möglichst den gesamten Umfang der Bestandesvariabilität erfassen. Die verwendeten Methoden gewährleisteten die notwendige Zufälligkeit und Repräsentativität der Stichprobenahme. Folglich war diesbezüglich nicht von methodisch bedingten, statistischen Verzerrungen auszugehen. Der Stichprobenumfang lag mit  $n = 12$  bis  $n = 26$  in einer Größenordnung, die von KLANK ET AL. (1990) für Winterweizen ermittelt wurde, um die Pflanzenmerkmale Triebzahl \*  $m^{-2}$  bzw. ährentragende Halme \*  $m^{-2}$  in einem anzustrebenden Vertrauensbereich von 10 – 15 % zu bestimmen.

Die ermittelten Variationskoeffizienten der Bestandesdichte (Halme \*  $m^{-2}$ ) lagen nach Abschluss der Bestockungsphase zwischen 8 % und 27 % (Kap. 4.1). Der Bestand auf 3.2 fiel diesbezüglich mit 8 % während des Ährenschiebens aus dem Rahmen (Tab.4-4). Lässt man diesen Wert außer Acht, so entspricht die erfasste Heterogenität den Ergebnissen anderer Studien, die Variationskoeffizienten von 10 – 28,5 % für Winterweizen lieferten (KÖRSCHENS 1972, MISSELWITZ 1975, KLANK ET AL 1990). Der Anstieg der Bestandesdichte bis zum 2ten-Knotenstadium (BBCH 32) und die darauffolgende Abnahme (Abb. 4-1) entspricht dem typischen zeitlichen Verlauf der Bestandesdichteentwicklung (Abb. 5-1).

Aufgrund des zeitlichen Versatzes zwischen Radarmessung und Stichprobenahme sind Mängel in der Datenkonsistenz möglich. So erfolgte die Radaraufnahme für beide Testflächen innerhalb eines Zeitintervalls von ca. 2,5 h (Tab. 3-6), wohingegen die Durchführung der Beprobungskampagne aus logistischen Gründen über den gesamten Tag verteilt war. Eine Diskrepanz bezüglich des Pflanzen- und Bodenwassergehaltes zwischen der Radarmessung und der Ground-Truth-Erhebung kann daher nicht ausgeschlossen werden.



**Abb. 5-1:** Entwicklung der Bestandesdichte (Ähren  $\text{m}^{-2}$ ) von Getreidebeständen während des Wachstums (nach ZIMMERMANN 1998).

Die Probenahmeflächen waren mit  $0,5 \times 0,5 \text{ m}$  relativ klein im Vergleich zur Mittelwertfläche der extrahierten Rückstreuwerte (ca.  $19 \text{ m}^2$ ). Die Lage wurde jedoch so gewählt, dass die Stichprobe repräsentativ für die umliegende Fläche war. Die Einmessung der Punkte erfolgte mit einem DGPS mit einer Lagegenauigkeit von  $\pm 2,5 \text{ m}$ , wodurch gewährleistet war, dass der jeweilige Probepunkt innerhalb der Mittelwertfläche lag. Die Ground-Truth-Daten und die extrahierten Rückstreuwerte waren somit geografisch deckungsgleich, und die statistische Zusammenhangsanalyse auf Grundlage dieser Wertepaare möglich.

Die multispektrale Auswertung der Luftbilder liefert als indirekte Methode Informationen über Pflanzenentwicklung sowie Biomassevariabilität. Die Nutzung des NDVI als Referenz für die räumliche Variabilität der Biomasse ist eine häufig praktizierte Herangehensweise (HELLEBRAND 1997).

### 5.1.2 Fernerkundungsdaten

Die Radarrückstreuung von Weizenbeständen wird durch verschiedene objekt- und sensorspezifische Parameter bestimmt. Die verwendeten Radardaten orientierten sich an den in der Literatur an sie gestellten Anforderungen, um Aussagen über landwirtschaftliche Bestände zu ermöglichen. Nachfolgend werden die sensorspezifischen Parameter im einzelnen bewertet.

*Räumliche Auflösung und geografische Genauigkeit:* Sowohl die verwendeten Radardaten als auch die Luftbilder hatten eine räumliche Auflösung von 1 m und wurden damit den Anforderungen gerecht. So setzt MORAN (2000) bei einer Bearbeitungsbreite von 10 - 20 m eine räumliche Auflösung der Fernerkundungsdaten von 2 - 5 m als notwendig voraus. Nach KÜHBAUCH (2002) ist eine räumliche Auflösung von 5 - 6 m in den meisten Anwendungsfällen ausreichend. Von ATKINSON (1997) wird für die räumliche Auflösung ein Richtwert von 0,5 bis 3 m vorgeschlagen, wenn Luftbilder für die Erfassung von Heterogenitäten innerhalb eines Bestandes eingesetzt werden sollen. Ebenso war die geografische Lagegenauigkeit mit 1 m für die Radarbilddaten (PROSMART 2002) und 0,5 m für die Luftbilder (Tab. 4-6) für landwirtschaftliche Fragestellungen hinreichend (MORAN 2000).

*Wellenlänge und Polarisation:* Im Rahmen der vorliegenden Arbeit standen Radaraufnahmen des ko-polaren X- und L-Bandes zur Verfügung. Die zusätzliche Kreuz-Polarisation war nur im L-Band vorhanden.

Für die Radaranwendung in der Landwirtschaft werden in der Literatur unterschiedliche Wellenlängen diskutiert. SCHMULLIUS & EVANS (1997) sehen im L-Band als Einzelkanal den größten Wert für landwirtschaftliche Fragestellungen, wohingegen BRISCO & BROWN (1998) und auch BROWN ET AL. (2001) kürzere Wellenlängen, wie das X-Band, für Analysen von Getreidebeständen favorisieren. Insbesondere der Kreuz-Polarisation wird ein hohes Informationspotenzial in Bezug auf das Pflanzenwachstum zugeschrieben (BARONTI ET AL. 1995, PAMPALONI ET AL. 1997, STEINGIEBER ET AL. 1999).

Einigkeit besteht weitestgehend darin, dass eine Kombination aus L-Band und X- bzw. C-Band am besten für landwirtschaftliche Vegetationsbeobachtungen geeignet ist (BOUMAN ET AL. 1991, BOUMAN & UENK 1992, SCHMULLIUS & EVANS 1997, VAN DER SANDEN ET AL. 2000). Insgesamt ist das Informationspotenzial multi-dimensionaler Radardaten höher zu bewerten als das eines Einzelkanal-Radars (SCHMULLIUS & EVANS 1997), da die verschiedenen Radarkanäle unterschiedlichen Streuprozessen unterliegen (BROWN ET AL. 1992) und somit verschiedene Information über die Erdoberfläche beinhalten. Die Ergebnisse in Kapitel 4.3.2 bestätigen den unterschiedlichen Informationsgehalt der einzelnen Radarkanäle (Tab. 4-13, Tab. A-7, Tab. A-7b).

*Einfallswinkel:* Der Einfallswinkel hat in zweierlei Hinsicht entscheidende Bedeutung. Zum einen variiert er aufnahmesystembedingt innerhalb des Aufnahmestreifens, und zum anderen bestimmt er die dominierende Rückstreukomponente der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Grundsätzlich ist der Weizenbestand als anisotropisch anzusehen (ULABY & WILSON 1985), d.h. seine Rückstreuung variiert in Abhängigkeit vom Einfallswinkel. Sowohl für das X- als auch für das L-Band nimmt die Rückstreuung eines Weizenbestandes mit zunehmendem Einfallswinkel ab (BARONTI ET AL. 1995, BROWN ET AL. 2000, BNSC 2001).

Innerhalb des Aufnahmestreifens variierte der Einfallswinkel zwischen  $25^\circ$  im *near range* und  $44^\circ$  im *far range* (Tab. 3-7) und erschwerte somit die Vergleichbarkeit verschiedener Schläge innerhalb eines Aufnahmestreifens. Auch innerhalb einer Testfläche wurden Bereiche mit verschiedenen Einfallswinkeln aufgenommen. Im Extremfall variierte der Einfallswinkel innerhalb der Testfläche  $10.3$  um bis zu  $6^\circ$ , was den Ergebnissen des BNSC (2001) zufolge ausreicht, um Unterschiede in der Rückstreuintensität hervorzurufen. Im Zuge der Kalibrierung wurden die E-SAR-Aufnahmen auf einen Einfallswinkel von  $35^\circ$  normalisiert, um dessen schlaginterne Variabilität zu eliminieren. Inwiefern die vom Einfallswinkel abhängigen Rückstreunterschiede (Abb. 3-15) tatsächlich durch das Kalibrierungsmodell ausgeglichen wurden, lässt sich nicht beurteilen. Aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge erscheint eine vollständige Eliminierung jedoch nicht möglich.

Im Hinblick auf die Fragestellung dieser Arbeit ist es von Interesse, dass das Rückstreusignal möglichst viel Information über den Weizenbestand aufweist und wenig durch den Boden beeinflusst wird. Ein Einfallswinkel von  $35^\circ$  entspricht dabei der in der Literatur vorgeschlagenen Größenordnung. Der Informationsgehalt über den Vegetationsbestand ist bei Einfallswinkeln  $> 30^\circ$  am höchsten. (GNOSA 1997, BROWN ET AL. 2000a, MC NAIRN ET AL. 2002). BARONTI ET AL. (1995) fanden bei einem Einfallswinkel von  $35^\circ$  nahezu keinen Einfluss der Bodenfeuchte auf die Rückstreuung im L-Band, wohingegen MACELLONI ET AL. (2001) darauf hinweisen, dass auch bei einem vollständig entwickelten Vegetationsbestand die Bodenkomponente nicht außer Acht gelassen werden darf. BUSH & ULABY (1975) konnten für steile Einfallswinkel ( $< 20^\circ$ ) nachweisen, dass das kurzweilig X-Band den Boden unter einem entwickelten Getreidebestand nicht erreicht. Auch TACONET ET AL. (1994) sehen bei einem Einfallswinkel von bis zu  $40^\circ$  keine Abhängigkeit der Rückstreuung im X-Band von der Bodenkomponente.



*Prozessierungsfehler:* Die vorprozessierten Radardaten des Untersuchungszeitraums 2001 wiesen in den kreuz-polarisierten Kanälen des L-Bandes systematische Fehler auf. Diese äußerten sich in periodisch wiederkehrenden vertikalen Streifen und waren bei visueller Betrachtung eindeutig zu erkennen (Abb. 4-6 und Abb. A-4a-d). Da dies offensichtlich durch einen Fehler im Prozessierungsverfahren verursacht wurde, war es nicht möglich, die Störung im Rahmen der Arbeit zu beheben. Sämtliche Ergebnisse, die auf der kreuz-polarisierten Radarinformation des Jahres 2001 beruhen, sind daher kritisch zu beurteilen. Über weitere aufnahmebedingte, bildinterne Störungen, die visuell nicht erkennbar waren, kann keine Aussage getroffen werden.

*Vorverarbeitung:* Die Vorverarbeitungsschritte Kalibrierung und Speckle-Filterung (Kap. 3.5.1) wurden mit Standardverfahren durchgeführt. Die vom DLR angegebene Kalibrierungsgenauigkeit (Tab. 3-7) stellte einen Unsicherheitsbereich von 3 dB (L-Band) bzw. 2 dB (X-Band) innerhalb der Aufzeichnungen dar. Diese Ungenauigkeit lässt sich nur im Zusammenhang mit den dynamischen Bereichen der Rückstreuung der Winterweizenbestände einordnen und bewerten. Die extrahierten Rückstreuwerte der einzelnen Radarkanäle zeigten an den verschiedenen Aufnahmezeitpunkten vereinzelt geringe dynamische Bereiche von lediglich 3–4 dB im Minimum (Kap. 4.3.2, Tab. A-5a-d). Folglich können die Kalibrierungsungenauigkeiten theoretisch die gesamte Variabilität der Rückstreuwerte überlagern. Dies ist insbesondere für das X-Band aufgrund dessen geringer Dynamik problematisch. Die für den multitemporalen Vergleich der Daten notwendige radiometrische Stabilität des Sensors über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg war gegeben (PRO SMART 2002).

Bezüglich des Informationsgehaltes von Radarbildern spielt der systembedingte Speckle-Effekt eine übergeordnete Rolle. Die durchgeführte Filterung führte zwar zu einer Reduzierung der Störung, jedoch war eine vollständige Eliminierung nicht möglich (Abb. 4-5). Es war daher weiterhin von einer Beeinträchtigung des Informationsgehaltes auszugehen, auch wenn das gewählte Extraktionsverfahren, basierend auf einer kreisförmigen Fläche von ca. 19 m<sup>2</sup>, zu einer weiteren Reduzierung des Speckle-Effektes führte.

*Aufnahmемängel und externe Störfaktoren:* Ein weiteres Problem der Radaraufnahmen bestand in der teilweise zeitversetzten Aufnahme der einzelnen Radarkanäle. Aus technischen Gründen

war es nicht möglich, alle Kanäle simultan aufzuzeichnen. Daher erfolgte die Aufzeichnung der beiden Polarisationen des X-Bandes jeweils einzeln im Anschluss an die synchrone Aufzeichnung aller Kanäle des L-Bandes. Hieraus kann eine eingeschränkte Kompatibilität der Datensätze resultieren. Durch Abweichungen in der Flugbahn des Sensors oder durch Windeinflüsse auf die Struktur des Weizenbestandes war eine Veränderung der Aufnahmesituation möglich. Die Wahrscheinlichkeit größerer Störungen ist allerdings als gering einzustufen. Lediglich die Aufnahme vom 05. Juni 2002 unterlag möglicherweise dem Einfluss von Windeffekten. Eine Inkonsistenz der Rückstreuung verschiedener Kanäle kann durch tageszeitliche Schwankungen der Rückstreuintensität hervorgerufen werden (BRISCO ET AL. 1990).

Die Radaraufzeichnungen im Jahr 2001 erfolgten ohne witterungsbedingte Störeinflüsse. Im Untersuchungszeitraum 2002 könnten die Radarrückstreuwerte jedoch durch Tau und Wind verfälscht worden sein. Die Aufnahme vom 08. Mai 2002 wurde möglicherweise durch Taubildung in den Morgenstunden beeinträchtigt, und während der Aufnahme vom 05. Juni 2002 herrschte ein leichter Wind, der geringfügige Strukturänderungen im Weizenbestand hervorgerufen haben könnte. Die Auswirkungen dieser Störeinflüsse auf das Rückstreusignal werden u.a. von HOBBS ET AL. (1998) und BRISCO ET AL. (1993) zusammengefasst.

### 5.1.3 Analysemethoden

Die verwendeten empirischen Modellansätze berücksichtigen nur einen Einflussfaktor und vernachlässigen die Komplexität des Ursachengefüges. Die vorliegende Arbeit stand vor dem Hintergrund, dem Landwirt teilschlagspezifische Informationen bezüglich der Biomasse- bzw. Bestandesdichteveriabilität zu liefern. Im Hinblick auf die Zielsetzung der Arbeit war es somit nicht praktikabel, verschiedene Bestandesmerkmale in multivariate Analysen einzubeziehen. Vielmehr sollte analysiert werden, ob einzelne Bestandesmerkmale mittels Radarrückstreuung modelliert werden und dem Landwirt in Form einer Karte bereitgestellt werden können.

Die statistischen Methoden sind geeignet, um Zusammenhänge zwischen verschiedenen Parametern aufzudecken und basierend auf den resultierenden Zusammenhangsfunktionen fehlende Werte vorherzusagen. Die Korrelations- und Regressionsanalyse sind im Bereich der Fernerkundung gängige Verfahren, um im Feld gemessene Parameter mit am Sensor

aufgezeichneten Reflexions- oder Rückstreuwerten in Beziehung zu setzen. Die Diskriminanzanalyse findet im Bereich der Fernerkundung bisher nur vereinzelt Anwendung, auch wenn durchaus gute Ergebnisse erzielt wurden (DEMPSEY ET AL. 1997, PALACIOS-ORUETA & USTIN 1996). Ursprünglich stellt die Diskriminanzanalyse ein multivariates Verfahren dar, bei dem mehrere unabhängige Variablen verwendet werden. Sie liefert aber auch mit nur einer unabhängigen Variablen brauchbare Ergebnisse (DEMPSEY ET AL. 1997).

Die Diskriminanzanalyse ist relativ robust gegenüber der Verletzung einzelner an sie gestellter Anforderungen (ERB 1990). Die Voraussetzung einer homogenen Verteilung innerhalb der einzelnen Gruppen ist durch die in der Arbeit vorgenommenen Gruppeneinteilung nicht immer gegeben. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn durch die Clusteranalyse Gruppen mit nur einer oder sehr wenigen Stichprobe(n) gebildet wurden. Solche Gruppen lagen vor allem dann vor, wenn z.B. einzelne extrem hohe Bestandesdichtewerte existierten. Das Weglassen dieser Stichprobe(n) hätte jedoch dazu geführt, dass Bereiche hoher Bestandesdichte nicht durch die Modellierung differenziert worden wären. Die ermittelten Klassifizierungsfunktionen sind aus diesem Grund nur eingeschränkt auf die Merkmalswerte anwendbar (BACKHAUS ET AL. 2000).

Die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse sind in hohem Maße von der vorgegebenen Gruppierung der Stichproben abhängig. Es gibt verschiedene Clusterverfahren mit unterschiedlichen Distanzkriterien, die zu abweichenden Gruppenbildungen führen (BACKHAUS ET AL. 2000). Je nach verwendeter Methodik (Tab. A-1, Tab. A-2) kann folglich das Ergebnis der Diskriminanzanalyse anders ausfallen.

## *5.2 Beurteilung der temporalen Variabilität der Radarsignatur von Winterweizen*

Im Rahmen der Arbeit wurde u.a. der Frage nachgegangen, inwieweit sich das Radarrückstreusignal in Abhängigkeit von der Bestandesentwicklung verändert, und ob diese Veränderungen eine gewisse Allgemeingültigkeit besitzen und somit auf andere Flächen übertragbar sind.

Die Radarrückstreuung wird von der geometrischen Struktur und dem Wassergehalt des Weizenbestandes beeinflusst (ULABY & BUSH 1976, BRISCO & BROWN 1998). In Folge phänologischer Veränderungen während der Entwicklung des Bestandes findet somit auch eine

Veränderung der Radarrückstreuung statt. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit machen eine hohe Variabilität der Rückstreuung im Zuge der Bestandesentwicklung von Winterweizen deutlich, aus denen sich kaum Regelmäßigkeiten ableiten lassen. Die Änderung der Radarrückstreuung verläuft nicht immer konsistent im Vergleich der verschiedenen Radarkanäle und Testflächen, weshalb sich kaum verlässliche Aussagen treffen lassen. Die variable Rückstreuintensität der einzelnen Kanäle macht eine Interpretation der Rückstreuwerte ohne zusätzliche Ground-Truth-Kenntnisse unmöglich.

In den folgenden Kapiteln werden die verschiedenen Ergebnisse vor dem Hintergrund in der Literatur beschriebener Erkenntnisse diskutiert. Zu Beginn wird in Kapitel 5.2.1 der generelle Signaturverlauf in Abhängigkeit von der Bestandesentwicklung erörtert. In den Kapiteln 5.2.2 und 5.2.3 wird die fehlende Konsistenz der Radarsignaturen von Winterweizenbeständen an einem Aufnahmeterrain und zwischen unterschiedlichen Vegetationsperioden diskutiert, sowie deren mögliche Ursachen herausgearbeitet.

Hierbei ist bereits vorab klarzustellen, dass die Diskussion der Ergebnisse mit anderen Studien nur beschränkt möglich ist, da sich die Untersuchungen häufig in der Aufnahmekonfiguration (z.B. Einfallswinkel und Blickrichtung) und dem Aufnahmezeitpunkt (Entwicklungsstadium) unterscheiden.

### *5.2.1 Veränderung der Radarsignatur eines Weizenbestandes in Abhängigkeit vom Entwicklungsstand*

Die Geometrie eines Getreidebestandes verändert sich im Verlauf seines Wachstums. Zu Beginn der Vegetationsperiode liegt eine geringe Bodenbedeckung mit dominierenden horizontalen Strukturen vor. Mit Einsetzen des Längenwachstums verändert sich die Geometrie des Bestandes zu Gunsten vertikaler Strukturen (Halme). Weitere strukturelle Veränderungen treten durch die Ausbildung der einzelnen Blattetagen, insbesondere der Fahnenblätter und der Ausformung der Ähren, auf.

Wie die Radarsignaturen in Abbildung 4-9 zeigen, reagieren alle Radarkanäle auf die Bestandesentwicklung mit Änderung der Rückstreuintensität. Die veränderte Interaktion zwischen Radarstrahlung und Bestand wird insbesondere im Vergleich der unterschiedlichen Wellenlängen des L- ( $\lambda = 23$  cm) und X-Bandes ( $\lambda = 3$  cm) deutlich, da hier unterschiedliche

Streumechanismen wirken. Nach allgemeiner Auffassung nimmt die Rückstreuintensität bei gleichen Aufnahmebedingungen grundsätzlich von langwelliger zu kurzwelliger Strahlung zu (BRISCO ET AL. 1990, BOUMAN ET AL. 1991, BARONTI ET AL. 1995, STEINGIEßER 1997). Die Ergebnisse dieser Arbeit sind jedoch dahingehend nicht eindeutig.

Zu Beginn des Wachstums im Frühjahr (Schossen - 07. April 2002) zeigte der Winterweizen eine Rückstreucharakteristik, die sich eindeutig von allen anderen Entwicklungsstadien unterschied. Die Rückstreuintensität im ko-polaren L-Band war zu diesem Zeitpunkt geringer als im ko-polaren X-Band, wohingegen während der anderen Entwicklungsstadien keine allgemeingültige Aussage diesbezüglich möglich war (Abb. 4-9). Ferner war die Rückstreuung im L-VV höher als im L-HH, was zu keinem anderen Aufnahmetag der Fall war.

Die höhere Rückstreuung in der vertikalen Polarisation deutet auf eine dominierende Oberflächenstreuung des Bodens hin (BARONTI ET AL. 1993, DE MATTHAEIS ET AL. 1994). In der Literatur werden Schwellwerte von  $0,5 \text{ kg m}^{-2}$  Biomasse (DOBSON & ULABY 1998) bzw. 10-15 cm Bestandeshöhe (ULABY ET AL. 1996) genannt, bis zu denen der Rückstreubeitrag des Vegetationsbestandes im ko-polaren L-Band vernachlässigt werden kann. Diese Schwellwerte wurden in den untersuchten Beständen eindeutig unterschritten (Tab. 4-3, Tab. 4-4). Aufgrund der dominierenden Oberflächenstreuung am Boden und der damit einhergehenden stark spiegelnden Reflexion ist die Rückstreuintensität im L-Band relativ gering (WEIMANN 1996). Die sehr geringe Rückstreuung der Kreuz-Polarisation unterstreicht die Annahme, dass der Einfluss der Vegetation vernachlässigt werden kann (ULABY & ELACHI 1990).

Für das kurzwellige X-Band erscheint die Bodenoberfläche dagegen rauer und führt demzufolge zu einer vermehrten Rückstreuung (LEWIS ET AL. 1998). Inwiefern die Vegetation in diesem frühen Entwicklungsstadium des Weizens einen Einfluss auf die Rückstreuung im X-Band ausübt, ist schwer zu beurteilen. Da die Rückstreuintensität der vertikalen Polarisation nicht höher als die der horizontalen Polarisation war, ist durchaus ein Einfluss anzunehmen, welcher im Resultat ebenfalls zu einer erhöhten Rückstreuung führte.

Im weiteren Entwicklungsverlauf des Weizenbestandes fiel auf, dass beide Wellenlängen stets die höchste Rückstreuung in der horizontalen Polarisation aufwiesen (Abb. 4-9). Dies deutet auf eine dominierende Volumenstreuung innerhalb des Weizenbestandes hin

(DE MATTHAEIS ET AL. 1994). Die geringere Rückstreuung vertikal polarisierter Mikrowellen entspricht den Erkenntnissen u.a. von ALLEN & ULABY (1984), LE TOAN ET AL. (1984), ULABY & WILSON (1985) und SCHMULLIUS (1992) und wird auf die erhöhte Absorptions-Dämpfung an vertikalen Strukturen im Getreidebestand (z.B. Halme) zurückgeführt (Kap. 2.2.5).

Im Zuge der Vegetationsentwicklung nimmt die Volumenstreuung innerhalb des Bestandes zu, und üblicherweise steigt damit auch die Rückstreuintensität der Kreuz-Polarisation an (ULABY & ELACHI 1990, BARONTI ET AL. 1993, BRISCO & BROWN 1998). Dies wird mit einer Ausnahme auch durch die Radarsignaturen in Abbildung 4-9 bestätigt. Die Ursache für die Verringerung der Rückstreuung des kreuz-polaren, aber auch des ko-polaren L-Bandes im Vergleich der beiden Aufnahmetermine 08. Mai 2002 und 05. Juni 2002 ist in dem geringeren Bodenwassergehalt am 05. Juni 2002 zu sehen (Tab. 4-3, Tab. 4-4). Da das L-Band den Weizenbestand weitestgehend bis zum Boden durchdringt (MACELLONI ET AL. 2001), wird aufgrund dessen verringerter Dielektrizitätskonstante ein geringerer Anteil der Strahlung an der Bodenoberfläche gestreut (ULABY ET AL. 1996, LEWIS ET AL. 1998). Somit ist weniger Strahlung vorhanden, die innerhalb des Bestandes über *multiple-scattering* bzw. *double-bounce-scattering* zum Sensor zurückgestreut werden kann (BARONTI ET AL. 1993, BRISCO & BROWN 1998).

Ansonsten zeigte sich zu allen anderen Aufnahmetermine ein Anstieg der Rückstreuung in den ko-polaren Kanälen des L-Bandes mit Zunahme der Biomasse (Abb. 4-9). BOUMAN & UENK (1992) fanden in ihren Untersuchungen einen kontinuierlichen Anstieg der Rückstreuung im L-HH von der Bestockung bis zum Beginn der Abreife von Winterweizen, und auch BROWN ET AL. (1992) nennen einen dichteren Pflanzenbestand als Grund für die Zunahme der Radarrückstreuung im L-VV. Dagegen fanden MACELLONI ET AL. (2001) in ihren experimentellen Messungen eine abnehmende Rückstreuung in allen Polarisationen des L-Bandes, wohingegen ULABY & WILSON (1985) keine Veränderungen in der Rückstreuung mit zunehmender Biomasse erkennen konnten.

Die Rückstreucharakteristik des X-Bandes zeigte sich dagegen variabler und wies keine Regelmäßigkeit im Vergleich der verschiedenen Entwicklungsstadien der Weizenbestände auf. Lediglich die Abnahme der Rückstreuung von der Bestockung (07. April 2002) zum Schossen (08. Mai 2002) erwies sich als konstant (Abb. 4-9). Diese Abnahme der Rückstreuintensität ist

konform zu den Laborergebnissen von BROWN ET AL. (2000a). Auch wenn BOUMAN & VAN KASTEREN (1990) in ihrer Arbeit eine starke Schwankung der Radarsignatur von Weizen über die Jahre hinweg ermittelten, stimmen ihre Ergebnisse jedoch mit der in dieser Arbeit ermittelten Abnahme der Rückstreuintensität im X-Band für den Zeitraum von der Bestockung bis zum Schossen überein. Sie sahen die zufällig orientierten Blätter als bestimmenden Faktor für die Dämpfung der Rückstreuung an. ERNST-CORDARY (1984) und auch BROWN ET AL. (1992) vermuten als Ursache für die Verringerung der Rückstreuung des X-HH eine verstärkt auftretende diffuse Oberflächenstreuung an den planophil ausgerichteten Blattoberflächen.

In Folge einer weiteren Strukturveränderung durch die Ausbildung der Fahnenblätter und Ähren unterliegt die Rückstreuung im X-Band einer weiteren Veränderung (BOUMAN 1995). Wie die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, war der Einfluss dieser Vegetationskomponenten auf die Radarrückstreuung sehr variabel, führte aber tendenziell zu einer höheren Rückstreuung im X-VV. Die Reaktion des X-HH war dagegen für die verschiedenen Bestände inkonsistent (Abb. 4-9). Weder detaillierte noch pauschale Aussagen bezüglich der Rückstreubeiträge einzelner Pflanzenkomponenten sind aufgrund der komplexen Abhängigkeiten der Streumechanismen von den verschiedenen Einflussfaktoren nur schwer möglich (BRISCO & BROWN 1998). So sind die Erkenntnisse und Erklärungsversuche in der Literatur über den Einfluss von Ähren und Fahnenblättern auf die Rückstreuung im X-Band sehr kontrovers. WU ET AL. (1985) wiesen in ihren Untersuchungen den größten Beitrag zur Rückstreuung im X-Band in der Ährenregion nach, wohingegen BOUMAN & VAN KASTEREN (1990) kaum einen Einfluss der Ähren auf die Rückstreuung im X-VV feststellen konnten. SCHMULLIUS & NITHAK (1992) sowie ALLEN & ULABY (1984) gehen dagegen von einer Dämpfung der Rückstreuung kurzer Wellenlängen durch die Ähren aus. BROWN ET AL. (2001) und ERNST-CORDARY (1984) machten die Fahnenblattregion als dominierende Streukomponente im X-Band verantwortlich.

In Abbildung 4-10 ist zu erkennen, dass die Veränderung der Rückstreuintensität in Abhängigkeit von der fortschreitenden Vegetationsentwicklung nicht homogen innerhalb eines Weizenbestandes erfolgen muss. Die vielfältigen strukturellen Einflussfaktoren, wie beispielsweise die Stellung des Fahnenblattes und die Neigung der Ähre der Einzelpflanze sowie die gesamte Bestandesentwicklung, sind nicht über die gesamte Fläche identisch. Die Interpretation der Rückstreuwerte kann nur anhand von Informationen über die strukturellen

Einflussparameter erfolgen, deren Erfassung durch eine Stichprobenahme jedoch kaum zu realisieren ist (SINOQUET & ANDRIEU 1993).

### 5.2.2 Beurteilung der Variabilität der Radarsignatur verschiedener Weizenbestände bei gleichem Entwicklungsstand

Die Nutzbarkeit von Radardaten zur Informationsgewinnung über die Bestandesentwicklung ist nur praktikabel, wenn die Rückstreucharakteristika eine gewisse Generalisierbarkeit aufweisen und damit übertragbar auf andere Flächen sind. Die in Kapitel 4.3.2 dargestellten Ergebnisse weisen diesbezüglich auf ein inkonsistentes Rückstreuverhalten von Winterweizenbeständen zu identischen Entwicklungsstadien hin. Die Ursache dafür ist in dem Zusammenspiel der komplexen Wirkungsmechanismen verschiedener Einflussfaktoren zu sehen. Dementsprechend ist es nicht möglich, die Veränderung der Rückstreuintensität auf nur einen speziellen Faktor zurückzuführen.

Die Rückstreuung zweier Winterweizenbestände wurde in Kapitel 4.3.2 am Beispiel der Rückstreuwerte des Jahres 2002 während des Schossens analysiert. Die Rückstreuintensität beider Bestände war in allen Radarkanälen unterschiedlich, wobei das relative Verhältnis der jeweiligen Polarisationen annähernd gleich blieb (Abb. 4-11). Für beide Radarbänder galt für die Rückstreuung:  $\sigma_{HH}^0 > \sigma_{VV}^0$ .

Der Weizenbestand auf 3.2 zeigte im Vergleich zu dem auf 10.3 eine höhere Rückstreuung im ko-polaren L-Band als im X-Band. Die erhöhte Rückstreuung im L-Band ist vermutlich auf die höhere Biomasse auf 3.2 zurückzuführen (Tab. 4-3, Tab. 4-4), welche verstärkte Volumenstreuung verursachte (BARONTI ET AL. 1993, BRISCO & BROWN 1998). Eine weitere Ursache könnte die unterschiedliche Bodenfeuchte gewesen sein, welche auf 3.2 um 1,4 % höher als auf 10.3 war (Tab. 4-3, Tab. 4-4). Sie führt üblicherweise zu einer verstärkten Rückstreuung von der Bodenoberfläche (ULABY ET AL. 1996), die sodann über *double-bounce-scattering* oder *multiple-scattering* zum Sensor gelangt (BARONTI ET AL. 1993, BRISCO & BROWN 1998). Für das X-Band kann die geringere Rückstreuintensität mit den verstärkt im Bestand auftretenden Absorptionsdämpfungs- und diffusen Oberflächenstreuprozessen erklärt werden (BOUMAN & VAN KASTEREN 1990, BROWN ET AL. 1992).



Zusätzlich könnten sich die Bestände der verschiedenen Weizensorten hinsichtlich ihres Absorptions- und Streuverhaltens unterscheiden. Die auf 3.2 angebaute Weizensorte „Drifter“ zeichnet sich durch einen mittellangen Wuchs aus, wohingegen die Sorte „Ritmo“ auf 10.3 eher kurzwüchsig ist (BSA 2001). Eine möglicherweise sortentypisch abweichende Blattstellung der Einzelpflanzen (erectophil oder planophil) würde zu unterschiedlichem Rückstreuverhalten führen (LE TOAN ET AL. 1984).

Die untersuchten Bestände unterschieden sich in ihrer Reihenrichtung (Tab. 3-3), deren Ausrichtung zur Radarblickrichtung entscheidenden Einfluss auf die Rückstreuintensität haben kann (DOBSON & ULABY 1998). Bei Wellenlängen von mehr als 7,5 cm (4 GHz) führt eine senkrecht zur Radarblickrichtung ausgerichtete Reihenrichtung zu höheren Rückstreuwerten, wohingegen kürzere Wellenlängen unbeeinflusst bleiben (ULABY & BARE 1979). Diesen Einfluss spiegelten die ermittelten Ergebnisse von 2002 nicht wider (Abb. 4-11). Vielmehr wies der parallel ausgerichtete Weizenbestand auf 3.2 weitaus höhere Rückstreuwerte im L-Band auf. Die Reihenrichtung kann in diesem Fall nicht die Ursache für den Unterschied im Rückstreuverhalten der beiden Bestände gewesen sein.

Dass die Reihenrichtung in anderen Fällen eine Rolle spielt, ist eindeutig an dem Rückstreuverhalten der beiden Bestände des Jahres 2001 zu erkennen. Der fast exakt senkrecht zur Radarblickrichtung ausgerichtete Weizenbestand auf 10.2 (Tab. 3-3) wies im ko-polaren L-Band durchweg höhere Rückstreuwerte auf als der Bestand auf 10.3 (Abb. A-3a-b). In diesem Fall konnte die erhöhte Rückstreuung im L-Band durch den sogenannten *Cardinal-Effekt* (Kap. 2.3.1) verstärkt worden sein, der insbesondere bei senkrechter Reihenrichtung auftritt und unerwartet hohe Rückstreuwerte verursacht (LEWIS ET AL. 1998). Dieser Effekt wurde von ULABY & BARE (1979) für Kulturpflanzenbestände mit ausgeprägtem Reihencharakter, wie Mais und Sonnenblumen, beschrieben. ERNST-CORDARY (1984) und BOUMAN (1991) fanden entsprechende Ergebnisse auch bei Kartoffelbeständen. Auch wenn ULABY & BARE (1979) diesen Effekt bei Getreidebeständen im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium nicht nachweisen konnten, sind in den Bilddaten von 10.2 (Abb. A-4a, Abb. A-4c) deutlich überstrahlte Pixel zu erkennen. Diese liegen zwar überwiegend im Bereich der Fahrgassen, wo der Reihencharakter den Dämmen der Kartoffelbestände gleicht, jedoch kann ein Effekt innerhalb des Bestandes nicht eindeutig ausgeschlossen werden.

Ein weiterer Einflussfaktor, der nicht vernachlässigt werden darf, ist Wind. Die differenzierte Rückstreucharakteristik (Abb. A-3d) beider Bestände am Aufnahmetermin 05. Juni 2002 lässt sich zwar durch unterschiedliche Merkmalsausprägungen (Tab. 4-3, Tab. 4-4) erklären, doch kann in diesem Fall ein Einfluss des Windes nicht ausgeschlossen werden. Der zeitweise stark böige Wind während der Radarmessungen könnte zu räumlich differenzierten Strukturveränderungen im Bestand geführt haben. Wind beeinflusst die Bestandesstruktur durch Veränderung der Orientierung von Blättern und Ähren der Einzelpflanzen, was insbesondere Auswirkungen auf die Rückstreuung kurzer Mikrowellen hat (BOUMAN & VAN KASTEREN 1990, BRISCO ET AL. 1993). BOUMAN & VAN KASTEREN (1990) weisen in ihrer Studie auf einen starken Einfluss des Windes auf die Rückstreuintensität von Weizenbeständen hin und führen die Rückstreuvvariabilität über verschiedene Jahre u.a. auf diesen Effekt zurück.

Der Einfluss des Pflanzenwassergehaltes auf das unterschiedliche Rückstreuverhalten der Bestände kann dagegen ausgeschlossen werden, da dieser im Mittel für beide Weizenbestände identisch war (Tab. 4-3, Tab. 4-4). Seine Bedeutung für die Rückstreuvvariabilität des Weizens ist demnach geringer als der Einfluss struktureller Bestandekomponenten. Entsprechende Schlussfolgerungen ziehen auch ERNST & FISCHBECK (1984), BOUMAN & VAN KASTEREN (1990) sowie SCHMULLIUS & NITHAK (1992) aus ihren Untersuchungen über die Rückstreuung landwirtschaftlicher Bestände im X-Band.

Auch die im Ergebnisteil nicht näher erörterten Rückstreusignaturen zu anderen Aufnahmeterminen wiesen Unterschiede auf. Sie verdeutlichen die Inkonsistenz der Radarrückstreuung während gleicher Entwicklungsstadien der Weizenbestände und lassen eine Übertragbarkeit der Ergebnisse schwierig erscheinen. Weiterhin wurde ebenfalls deutlich, dass die differenzierte Rückstreusignatur der Bestände durchaus von geringen Unterschieden in der Bestandesentwicklung herrühren, aber immer auch von anderen Einflussfaktoren, wie z.B. Bodenfeuchte, Wind und Reihenrichtung, überlagert sein kann.

HOEKMAN & BOUMAN (1992) sehen in der unterschiedlichen Struktur und räumlichen Orientierung jeder einzelnen Pflanzenkomponente im Hinblick auf die Radarblickrichtung die Ursache für das sehr variable Rückstreuverhalten verschiedener Bestände in den einzelnen Radarkanälen. Die differenzierte Orientierung verschiedener Pflanzenkomponenten eines

Weizenbestandes ist aufgrund der Komplexität kaum erfassbar (SINOQUET & ANDRIEU 1993). Hierin ist daher die grundlegende Schwierigkeit der Analyse von Radarsignaturen vegetationsbestandener Flächen zu sehen.

### 5.2.3 Vergleich der Radarsignatur von Weizenbeständen verschiedener Vegetationsperioden

Für die praktische Anwendung der Radarfernerkundung in der Landwirtschaft ist eine gewisse Konstanz der Rückstreucharakteristik von Weizenbeständen während gleicher Entwicklungsstadien in verschiedenen Jahren eine grundlegende Voraussetzung.

Ein Vergleich der Rückstreusignatur von Weizenbeständen während des Schossens in verschiedenen Vegetationsperioden wurde in Kapitel 4.3.2 durchgeführt. Die ermittelten Ergebnisse machten Unterschiede des Bestandes von 10.3 zwischen den Jahren deutlich (Abb. 4-13). Am 08. Mai 2002 wurden im Gegensatz zum 08. Mai 2001 eindeutig höhere Rückstreuwerte in den ko-polaren Kanälen (HH und VV) beider Wellenlängen gemessen. Die Intensitätsdifferenz bewegte sich in einem Bereich zwischen 1,5 dB im X-VV und 3,5 dB im L-VV (Tab. 4-11, Tab. 4-12).

BOUMAN & VAN KASTEREN (1990) berichten in ihrer Arbeit ebenfalls von großen Schwankungen der Radarsignatur von Weizenbeständen im Vergleich mehrerer Jahre. Sie ermittelten für das X-VV eine Variation von 5 – 6 dB zwischen den Jahren, was in etwa der gesamten Rückstreuvianz eines Bestandes innerhalb einer Vegetationsperiode entsprach. Sie begründen diese hohe Variabilität mit dem Einfluss verschiedener Sorten, Pflanzenzustände und Bearbeitungspraktiken sowie mit äußeren Einflüssen, wie beispielsweise Wind, Regen und Taubildung. Im Vergleich dazu ist die in der vorliegenden Arbeit ermittelte Schwankung von 1,5 dB im X-VV jedoch als relativ gering zu bewerten (Tab. 4-11, Tab. 4-12).

Da sich die untersuchten Weizenbestände nur geringfügig in den erfassten Bestandesmerkmalen (Tab. 4-1, Tab. 4-3) und der Reihenrichtung (Tab. 3-3) unterschieden, muss die abweichende Rückstreuung durch andere Einflussfaktoren verursacht worden sein. Je nach Wellenlänge bewirken die unterschiedliche Bodenfeuchte (Tab. 4-1, Tab. 4-3) und die verschiedenen Weizensorten (Tab. 3-1) der Testflächen eine Veränderung in der Rückstreuintensität des Weizenbestandes (Kap. 5.2.1, Kap. 5.2.2). In diesem Fall ist der dominierende Einfluss allerdings in der Taubildung im Blätterdach der Weizenbestände am

08. Mai 2002 zu sehen, welche üblicherweise zu einer Erhöhung der Rückstreuintensität von Vegetation führt (GILLESPIE ET AL. 1990, DAMPNEY ET AL. 2001).

Letztendlich zeigt das Ergebnis deutlich die Schwierigkeiten der operationellen Anwendung der Radarfernerkundung in der Landwirtschaft. Die Radarrückstreuung von Weizenbeständen wird neben der Bestandesstruktur von vielen, sich zeitlich verändernden Einflussfaktoren bestimmt. Ohne Kenntnis über deren Ausprägung ist eine Interpretation der Rückstreuwerte hinsichtlich möglicher Bestandesunterschiede daher stark eingeschränkt.

### *5.3 Eignung der Radarinformation zur Erfassung der räumlichen Variabilität von Bestandesmerkmalen*

Damit die Radarfernerkundung als wirksames Instrument in der teilschlagspezifischen Landbewirtschaftung eingesetzt werden kann, müssen quantitative Beziehungen zwischen den aufgezeichneten Rückstreuwerten und landwirtschaftlich relevanten Bestandesmerkmalen als Basis für robuste Vorhersage-Algorithmen identifiziert werden. Aus den Einzelkanaldarstellungen der Testflächen wird deutlich (Abb. 4-19, Abb. A-4a-k), dass die Radarrückstreuung durchaus großräumige Heterogenitäten innerhalb eines Weizenbestandes aufweist und somit potentiell für die Erfassung von Bestandesunterschieden geeignet ist.

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist die Analyse der Zusammenhänge zwischen der Radarrückstreuung und den Bestandesmerkmalen frische Biomasse und Bestandesdichte innerhalb eines Ackerschlags. Dabei wurde vor allem untersucht, ob die schlaginterne und zeitliche Variabilität der Bestandesmerkmale durch Radarsignaturen erfasst werden kann (Kap. 5.3.1), und inwiefern das Informationspotenzial der Radardaten durch deren Multi-Dimensionalität verbessert wird (Kap. 5.3.2).

In der bisherigen Forschung auf dem Gebiet der Radarfernerkundung dominieren Untersuchungen hinsichtlich der Fruchtartenunterscheidung (u.a. BRISCO ET AL. 1984, BROWN ET AL. 1992, WEGMÜLLER 1993, SCHMULLIUS & NITHAK 1996, MC NAIRN ET AL. 2000). Im Gegensatz dazu ist die Erfassung oberirdischer Biomasse landwirtschaftlicher Kulturpflanzen in geringerem Umfang erforscht. In verschiedenen Arbeiten wurden aber durchaus Beziehungen zwischen der Biomasse von Getreidebeständen und der Radarrückstreuung

dokumentiert (u.a. BRAKKE ET AL. 1981, BOUMAN & VAN KASTEREN 1990, BOUMAN 1991, STEINGIEBER 1997, PAMPALONI ET AL. 1997, MACELLONI ET AL. 2001).

Einige Autoren haben in ihren Arbeiten den Begriff „Biomasse“ - üblicherweise definiert als frische oder trockene Pflanzenmasse in Gramm pro Flächeneinheit - durch Begriffe wie Blattflächenindex oder Pflanzenwassergehalt ersetzt. Die Verwendung dieser verschiedenen Parameter ist wenig hilfreich, um Ergebnisse zu vergleichen, auch wenn Beziehungen zwischen der Biomasse und dem Blattflächenindex bzw. dem Pflanzenwassergehalt bestehen (MAJOR ET AL. 1986, MACELLONI ET AL. 2001). Zur Beurteilung der publizierten Ergebnisse muss klargestellt werden, dass Zusammenhänge zwischen Vegetationsmerkmalen und Radarrückstreuung häufig nur vorhanden waren, wenn die Daten verschiedener Entwicklungsphasen einer Kulturpflanzenart (u.a. STEINGIEBER 1997, HAMACHER 2000, MACELLONI ET AL. 2001) oder verschiedener Pflanzenarten an einem Termin in den Analysen zusammengefasst wurden (PAMPALONI ET AL. 1997).

### *5.3.1 Beurteilung der Zusammenhänge zwischen Einzelkanalrückstreuung und ausgewählten Bestandesmerkmalen*

Der dynamische Bereich der Radarrückstreuung ist zu den einzelnen Aufnahmeterminen (Tab. 4-11, Tab. A-5a-d), aber auch über die gesamte Vegetationsperiode hinweg (Tab. 4-10), im ko-polaren L-Band am höchsten. Dies entspricht den Ergebnissen von STEINGIEBER (1997), der davon ausgeht, dass der dynamische Bereich eines Radarkanals auf dessen Potenzial zur Erfassung von Unterschieden in einem Getreidebestand hindeutet.

Die Ergebnisse der linearen Korrelationsanalyse zwischen den Rückstreuwerten der Radarkanäle und den Bestandesmerkmalen (Kap. 4.4.2) wiesen in der vorliegenden Arbeit nur auf wenige signifikante Zusammenhänge hin (Tab. 4-19). Auch zeigte kein Radarkanal über die gesamte Vegetationsperiode Zusammenhänge mit den Bestandesmerkmalen. Die Resultate belegten aber eindeutig das größere Potenzial kurzer Wellenlängen (X-Band) zur Erfassung von Bestandesunterschieden. Insbesondere für das X-HH konnten die höchsten Korrelationen ermittelt werden. Dieses Ergebnis widerspricht jedoch den Vermutungen von BOUMAN (1991) und BROWN ET AL. (2001), wonach die Rückstreuung des X-Bandes vorwiegend durch Oberflächenstreuungsprozesse geprägt ist, und nur wenige Aussagen über die Biomasse getroffen werden können.

Das von STEINGIEßER (1997) zur Erfassung der Biomasse von Gerstebeständen favorisierte L-Band zeigte sowohl hinsichtlich der Biomasse als auch der Bestandesdichte kaum signifikante Korrelationen (Tab. 4-19). Auffällig ist in diesem Zusammenhang auch, dass keinerlei Korrelationen zwischen dem kreuz-polarisierten L-Band und Bestandesmerkmalen vorhanden waren, obwohl gerade dieser Polarisation ein großes Potenzial hinsichtlich der Erfassung des Biomassezuwachses zugesprochen wird (ULABY & ELACHI 1990, BARONTI ET AL. 1993, PAMPALONI ET AL. 1997, PALOSCIA 1998, MACELLONI ET AL. 2001).

Weiterhin machten die Ergebnisse der Korrelationsanalyse deutlich, dass alle signifikanten ( $\alpha \geq 0,05$ ) Korrelationen mit den Rückstreuwerten des L-Bandes positiv waren, d.h. ein Anstieg der Biomasse bzw. der Bestandesdichte führte zu einem Anstieg des Rückstreukoeffizienten im L-Band. Dagegen waren die signifikanten Korrelationen im X-Band in der Mehrzahl negativ, was entsprechend bedeutet, dass eine Zunahme der Bestandesmerkmale eine Abnahme der Rückstreuung verursachte. Entsprechende Zusammenhänge wurden in der Arbeit von BOUMAN (1991) gefunden.

Im Blütestadium des Weizenbestandes am 09. Juni 2001 (Tab. 4-19) zeigten sich dagegen abweichende Ergebnisse. Zu diesem Zeitpunkt lagen zum einen positive Korrelationen zwischen beiden Bestandesmerkmalen und dem X-Band vor, und zum anderen waren diese am besten ausgeprägt. Die Veränderung der Art des Zusammenhanges muss durch signifikante Strukturänderungen im Weizenbestand in Folge der Ährenausbildung hervorgerufen worden sein, was dazu führte, dass der Einfluss der Biomasse auf das Rückstreusignal überlagert wurde.

Die Korrelationen auf Punktbasis bewegten sich mit einer Ausnahme (Testfläche 10.2 am 09. Juni 2001; Tab. 4-19) durchweg auf mittlerem Niveau und waren zu schwach ausgeprägt, um auf deren Grundlage eine realistische, räumliche Schätzung der Bestandesmerkmale zu erlauben. Entsprechend sieht auch BOUMAN (1991) die Stärke der Zusammenhänge zwischen Bestandesmerkmalen und Radarrückstreuung als zu gering für landwirtschaftliche Anwendungen an. Als eine Ursache für die mäßigen Korrelationen sind die vielfältigen Einflussfaktoren auf das Radarrückstreusignal und der Speckle-Effekt anzuführen, welche eine hohe Variabilität in der Rückstreuung des Bestandes hervorrufen, die nicht im Zusammenhang mit den Bestandesmerkmalen steht. Ein weiterer Grund liegt möglicherweise in einer zu

geringen Variabilität innerhalb des Weizenbestandes, da die Untersuchung zu einem bestimmten Entwicklungsstadium nur einen Bruchteil des Gesamtspektrums an Biomassevariabilität der gesamten Vegetationsperiode abdecken kann. Ergebnisse von STEINGIEBER (1997) zeigen gute Zusammenhänge, wenn Biomasse von Gerste verschiedener Entwicklungsstadien gemeinsam analysiert wird.

Die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse (Tab. 4-20) deuteten auf eine relativ gute Trennbarkeit der drei Bestandesdichteklassen auf Basis der Radardaten hin. Da jede Klasse einen größeren Bereich an Bestandesdichte abdeckte, mussten die Rückstreuwerte nicht mehr mit den Absolutwerten der Bestandesdichte korrelieren, sondern lediglich mit einem größeren Wertebereich. Somit kann davon ausgegangen werden, dass auf generalisierter Klassenebene durchaus Zusammenhänge zwischen der Bestandesdichte und der Radarrückstreuung einzelner Kanäle nachgewiesen werden können (DEMPSEY ET AL. 1997). Der generalisierte Ansatz zur Vorhersage der quantitativen Bestandesdichte scheint daher aufgrund der ermittelten Ergebnisse besser geeignet zu sein als die Regressionsanalyse auf Punktbasis (Tab. 4-19, Tab. 4-20), auch wenn damit ein genereller Informationsverlust einhergeht.

### 5.3.2 *Beurteilung der Zusammenhänge zwischen Polarisationsindizes und ausgewählten Bestandesmerkmalen*

Im Allgemeinen wird von einem Informationszugewinn durch die Verwendung verschiedener Radarkanäle ausgegangen (SCHMULLIUS & EVANS 1997). Multi-dimensionale Datensätze ermöglichen die Berechnung von Polarisationsindizes aus den Rückstreuwerten der Polarisierungen HH, VV, HV, VH einer Wellenlänge oder aus einer Kombination von Kanälen verschiedener Wellenlänge. Eine Interpretation der zugrundeliegenden Beziehungen bleibt jedoch schwierig. Dennoch wurden derartige Indizes verwendet, um verschiedenste Pflanzenbestände anhand ihrer polarisationsabhängigen Streueigenschaften zu unterscheiden (FERRAZOLLI & GUERRIERO 1994, POPE ET AL. 1994, DUBOIS ET AL 1995, RAO & RAO 1996, STEINGIEBER 1997, PALOSCIA 1998). STEINGIEBER (1997) konnte mit einer Kanalkombination aus  $L\text{-HH} * L\text{-VV}^{-1}$  anstelle der Verwendung eines Einzelkanals die Beziehung zur Biomasse deutlich verbessern.

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und Bestandesmerkmalen können dahingehend zusammengefasst werden, dass im Vergleich zur

ausschließlichen Verwendung einzelner Radarkanäle (Tab. 4-19) ein höheres Informationspotenzial zur Erfassung von Bestandesunterschieden vorhanden ist (Tab. 4-22, Tab. 4-23). In der Mehrzahl der Fälle wurde in dieser Arbeit die Stärke der Korrelationen erhöht. Insbesondere eine Kanalkombination aus beiden Wellenlängen verspricht bessere Ergebnisse. Die Kombination aus einem Kanal des X-Bandes und einer Kreuz-Polarisation des L-Bandes sowie die Kombination aus den beiden ko-polaren Kanälen des X-Bandes (X-HH und X-VV) verbessern den vorgestellten Ergebnissen zufolge die Beziehungen zu Bestandesmerkmalen und damit die Eignung zur Erfassung bestandesinterner Variabilitäten. Auch die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse zeigen vorhandene Zusammenhänge zwischen den Polarisationsindizes und den Bestandesdichteklassen (Tab. 4-25).

#### *5.4 Beurteilung der Modellierungsalgorithmen und der Bestandesdichteverteilungskarte*

Es gibt verschiedene Ansätze, Pflanzenparameter auf Grundlage von Radardaten zu modellieren. Zum einen kann dies durch die Inversion einfacher physikalischer Modelle (ATTEMA & ULABY 1978, EOM & FUNG 1988, TOURÉ ET AL. 1994, COOKMARTIN ET AL. 2000) und zum anderen mittels empirischer Regressionsmodelle (BOUMAN 1991, STEINGIEBER 1997) geschehen. Die Verwendung physikalischer Rückstreumodelle ist derzeit noch ungenau, weil es noch nicht gelungen ist, notwendige physikalische Vegetationseigenschaften als Inputvariablen zu parametrisieren (ULABY 1998), und die Inversion solcher Modelle kompliziert ist (BOUMAN ET AL. 1999).

Der empirische Modellansatz dieser Arbeit berücksichtigt nur einen Einflussfaktor und vernachlässigt damit die Komplexität des Ursachengefüges. Ferner wird eine Linearität der Beziehungen angenommen, die in der Realität aber kaum besteht. Aufgrund der empirischen Zusammenhänge sind die Modellierungsalgorithmen daher nur für die Fläche gültig, für die sie ermittelt wurden. Die mangelnde Übertragbarkeit wird bedingt durch die vielfältigen Einflussfaktoren auf die Radarrückstreuung (Kap. 2.2, Kap. 5.2). Auch HOEKMAN & BOUMAN (1992) sehen in den vielfältigen Ursachen der Rückstreuvariabilität von Weizenbeständen den Grund für die fehlende Generalisierbarkeit ihrer Ergebnisse.

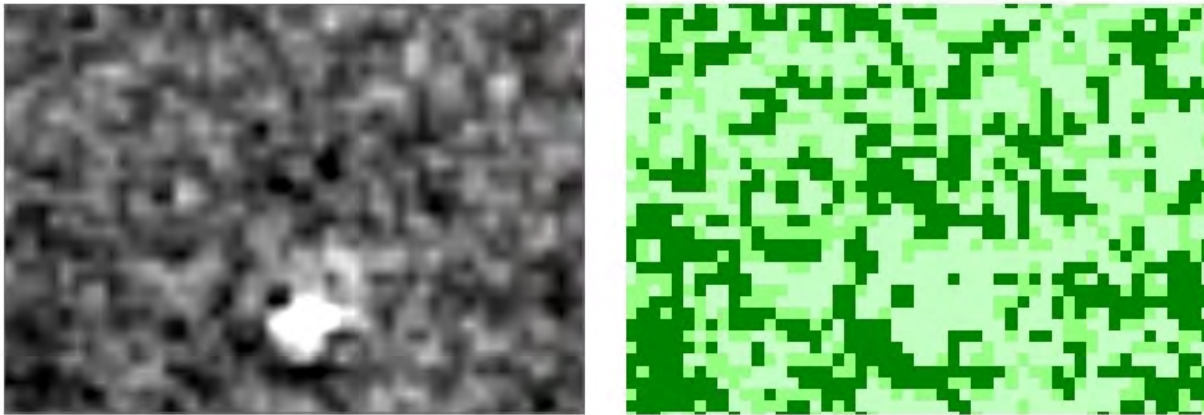
Als Referenz für die Beurteilung der Modellierung wurde die Bestandesdichte auf Grundlage einer empirischen Beziehung zum NDVI, auf Punktbasis (Abb. 4-16) sowie Klassenbasis (Abb. 4-18) genommen. Beide „Referenzkarten“ vom 05. Juni 2002 wiesen eine



ähnliche Struktur auf. Auch wenn beide Modelle 66 % der Variabilität erklärten (Tab. 4-16, Tab. 4-18), scheint doch das Diskriminanzmodell die Extremklassen „hohe“ und „geringe Bestandesdichte“ in geringem Maße überzurepräsentieren, wenn es auf die Pixelwerte der Bilddaten angewendet wird (Abb. 4-18).

Die beiden Modellergebnisse der Radardaten auf Basis der Diskriminanzanalyse wiesen ebenfalls sehr ähnliche Klassenverteilungen auf, auch wenn sie in ihrer Klassifizierungsgenauigkeit etwas voneinander abwichen. Die kreuzvalidierte Trefferquote mittels des Polarisationsindizes  $X-HH * L-HV^I$  betrug 66,7 % (Tab. 4-25) und die mittels des Einzelkanals X-HH 58,3 % (Tab. 4-20). Auch hier wird in beiden Fällen die Überrepräsentation der Extremklassen deutlich (Abb. 4-21, Abb. 4-25). Die kreuzvalidierte Vorhersagegenauigkeit des Regressionsmodells auf Basis des Polarisationsindex  $(r-cross + XHH) * (r-cross - XHH)^I$  als unabhängige Variable war mit einem Anteil von 30 % erklärter Variabilität dagegen sehr gering (Abb. 4-22).

Vergleicht man die Modellierungsergebnisse auf Grundlage der Radardaten (Abb. 4-21, Abb. 4-23, Abb. 4-25) mit den „Referenzkarten“ (Abb. 4-16, Abb. 4-18), so wird ein deutlicher Unterschied in der räumlichen Klassenverteilung erkennbar. Dieser Unterschied ist durch die starke Überrepräsentation der „hohen“ und „niedrigen“ Bestandesdichteklassen auf Kosten der „mittleren“ Bestandesdichte bedingt. Diese große Abweichung in der Klasseneinteilung war aufgrund der gleichen Trefferquote von 66,7 % der jeweiligen Diskriminanzmodelle (Tab. 4-18, Tab. 4-20, Tab. 4-25) nicht zu erwarten gewesen. Die Ursache für die schlechte Modellierbarkeit der Bestandesdichte auf Grundlage der Radarinformation liegt in der aufnahmesystembedingten Struktur der Radardaten. Wie in Abbildung 5-2 zu sehen, wiesen die aufgezeichneten Radardaten eine „flimmernde“ Struktur auf (links), die annähernd auch in dem Modellierungsergebnis aufzufinden war (rechts).



**Abb. 5-2:** Vergleich der Bildstruktur der Radarrückstreuung eines Winterweizenbestandes mit dem Ergebnis der Bestandesdichtemodellierung. Links: Ausschnitt aus dem gefilterten Radarbild des X-HH, rechts: Ausschnitt aus dem Modellierungsergebnis auf Basis der Klassifikationsfunktionen der Diskriminanzanalyse, die anhand des X-HH ermittelt wurden (Aufnahmeterrain 05. Juni 2002, Testfläche 10.3 in Neetzow).

Diese radartypische Struktur zeigt eine hohe Variabilität auf kleinem Raum. Sie resultiert aus dem Speckle-Effekt und der hohen Auflösung der Bilddaten. In der pixelbasierten Anwendung der Modelle findet sich diese Struktur wieder. Da der Speckle-Effekt zu besonders hohen und niedrigen Rückstreuwerten im Radarbild führt (Kap. 2.3.1), lässt sich durch ihn auch die Überrepräsentation der „hohen“ und „niedrigen“ Bestandesdichteklasse im Modellierungsergebnis erklären.

### 5.5 Vergleich des Informationsgehaltes von Luftbildern und Radardaten als Datenquelle für teilschlagspezifische Landwirtschaft

Auf dem Gebiet der optischen Fernerkundung wird die räumliche Diskriminierung unterschiedlichen Pflanzenwachstums oder unterschiedlicher Bestandesvitalität im Allgemeinen über die Berechnung von sogenannten Vegetationsindizes (VI) vorgenommen (MORAN ET AL. 1997a). Der gebräuchlichste unter ihnen ist der von ROUSE ET AL. (1974) entwickelte *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), eine normalisierte Version der linearen Kombination aus roter und infraroter Reflexion (Kap. 3.4.2).

Beide Aufnahmesysteme liefern Informationen über biophysikalische Eigenschaften der Vegetation, sind aber dennoch hinsichtlich ihres Informationsgehaltes verschieden. Die elektromagnetische Strahlung im Spektralbereich von Mikrowellen reagiert sensitiv auf Oberflächenstrukturen und dielektrische Eigenschaften des Zielobjektes. Dagegen ist die Reflexion im sichtbaren und infraroten Spektralbereich hauptsächlich vom Chlorophyll- und

Wassergehalt bzw. der Zellstruktur abhängig (ROSENTHAL ET AL. 1985). Aufgrund der unterschiedlichen Information beider Aufnahmesysteme sehen MORAN ET AL. (1997a) in der Kombination von Optik und Radar einen vielversprechenden Ansatz für eine verbesserte Informationsgewinnung. Der eigentliche Vorteil der Radarfernerkundung, die Witterungsunabhängigkeit, wird hierdurch jedoch stark eingeschränkt.

Die Interpretation optischer Daten liefert ohne weitreichende zusätzliche Informationen über den Vegetationsbestand verwertbare Ergebnisse. Die Ursachen für die Reflexionseigenschaften von Vegetationsbeständen im optischen Spektralbereich sind weitestgehend bekannt und können mit relativ guter Genauigkeit parametrisiert werden. Einschränkungen in der Interpretierbarkeit werden durch den Sättigungseffekt hervorgerufen, d.h. mit zunehmendem Biomassezuwachs unterliegt der NDVI einer Sättigung (Abb. 4-7, Abb. 4-8), wodurch Unterschiede im Bestand nicht mehr aufgezeigt werden können (SELLERS 1985, HATFIELD ET AL. 1985).

Im Vergleich dazu ist die Lesbarkeit von Radardaten ungleich schwieriger, da die aufgenommenen Informationen für die menschliche Seherfahrung unbekannt sind (STEINGIEBER ET AL. 1999). Die Interpretation der Radarrückstreuung landwirtschaftlicher Bestände ist derzeit noch stark problembehaftet. Wie bereits ausgiebig diskutiert, sind die komplexen Streumechanismen der Radarstrahlung und deren Beeinflussung durch Strukturveränderungen und variable Wassergehalte im Bestand bei weitem noch nicht vollständig bekannt und verstanden (MORAN ET AL. 1999).

Auch wenn unter Versuchsbedingungen durchaus Beziehungen zwischen Radarrückstreuung und Biomasse (BROWN ET AL. 2001) sowie Bestandesdichte (MORAN ET AL. 1999) erkannt wurden, so unterliegt die Anwendbarkeit unter Feldbedingungen erheblichen Einschränkungen. Die operationelle Bereitstellung von praktisch verwertbarer Bestandesinformation auf Basis multi-dimensionaler SAR-Bilddaten bleibt daher vorerst eine Vision. Derzeitiger Nutzen der Radarfernerkundung ist allenfalls in der Lokalisierung schlaginterner Heterogenitäten zu sehen, ohne dass kausale Zusammenhänge abgeleitet werden können.

## 5.6 Ausblick

Wie die Ergebnisse der Arbeit zeigen, kann die Radarfernerkundung die in sie gesetzten Erwartungen derzeit bei weitem noch nicht erfüllen. Die grundsätzliche Überlegenheit gegenüber der optischen Fernerkundung hinsichtlich einer witterungsunabhängigen Datenbereitstellung wird durch die äußerst variable Beeinflussung der Radarrückstreumechanismen und deren bisher unzureichendes Verständnis stark relativiert.

In der Zukunft bedarf es bezüglich der Analyse von multi-dimensionalen Radardaten weiterer Forschung. Es muss geklärt werden, inwiefern das vorhandene Potenzial besser ausgeschöpft und nutzbar gemacht werden kann. Insbesondere in der Vorverarbeitung, aber auch in der Analyse der Daten sind verschiedene Ansätze zu erkennen, die zu einer möglichen Verbesserung der Ergebnisse führen könnten. Hierzu zählt u.a. eine verbesserte Speckle-Filterung der Radardaten (CLOUTIS ET AL 1996, LEE ET AL. 1997).

Voll-polarimetrische Radardaten enthalten Informationen über die relativen Phasenbeziehungen und die komplexen Korrelationen der einzelnen Elemente in der Streumatrix (*coherence parameters*). Diese könnten zu einem besseren Verständnis der Streumechanismen führen (EVANS ET AL. 1988, BOERNER ET AL. 1998). Verschiedene Arbeiten haben bereits ein verbessertes Informationspotenzial der polarimetrischen Parameter bezüglich landwirtschaftlicher Bestandesmerkmale nachgewiesen (ULABY ET AL. 1987, BARONTI ET AL. 1995, SKRIVER ET AL. 1999).

Ein weiterer vielversprechender Ansatz ist in der objektorientierten Segmentierung zu sehen. Dies ist ein neuartiges Klassifizierungsverfahren, welches zu homogeneren Strukturen im Ergebnisbild führt und somit die durch den Speckle-Effekt verursachte, radartypische Struktur eliminiert. Dieses Verfahren erlaubt bereits verbesserte Fruchtartenklassifikationen (PATHE ET AL. 2001).

## 6 Zusammenfassung / Summary

Die Radarfernerkundung ermöglicht aufgrund ihrer Witterungsunabhängigkeit die großräumige und kontinuierliche Beobachtung landwirtschaftlicher Böden und Bestände. Damit bietet sie potenziell die Erfassung dynamischer Veränderungen. Für die Nutzbarkeit der Information in der teilschlagspezifischen Landbewirtschaftung (Precision Agriculture) sind quantitative Beziehungen zwischen der Radarrückstreuintensität und produktionstechnisch relevanten Bestandesmerkmalen eine unabdingbare Voraussetzung.

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, in welchem Umfang die Radarsignatur multi-dimensionaler SAR-Daten (*Synthetic Aperture Radar*) Informationen über die Bestandesvariabilität von Winterweizen liefern kann.

Die Untersuchungen wurden in 2001 und 2002 auf insgesamt drei Testflächen der Neetzower Agrarhof Peenetal GmbH in Mecklenburg-Vorpommern durchgeführt. Dabei wurden insgesamt vier unterschiedliche Entwicklungsstufen von Winterweizenbeständen untersucht. Schwerpunkt war die Erfassung der räumlichen Variabilität von Bestandesmerkmalen. Die Radarrückstreuwerte wurden mit dem flugzeuggetragenen E-SAR Sensor des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR-Oberpfaffenhofen) in zwei verschiedenen Wellenlängen (X- und L-Band) und in bis zu vier verschiedenen Polarisationen (HH, VV, HV und VH) aufgenommen. Dabei erfolgten zeitgleich zu den Radarmessungen Felderhebungen an den Pflanzenbeständen.

Die Arbeit erbrachte die folgenden Ergebnisse:

- ▶ Während der Bestockung des Winterweizens war die Rückstreuung des X-Bandes stets höher als die Rückstreuung des L-Bandes. Zu anderen Entwicklungsstadien waren die Ergebnisse diesbezüglich jedoch nicht konsistent, da zunehmend objektspezifische und witterungsbedingte Faktoren das Rückstreusignal beeinflussten.
- ▶ Die Rückstreuintensität aller Radarkanäle variierte in Abhängigkeit vielfältiger Einflussfaktoren über den Vegetationszeitraum hinweg, wobei die Strukturveränderung des Bestandes eindeutig den Pflanzenwassergehalt dominierte.

- ▶ Die Rückstreuung der vertikalen Polarisationen von X- und L-Band war aufgrund von Absorptionsprozessen an der dominierenden vertikalen Struktur der Bestände meist niedriger als die Rückstreuung der horizontalen Polarisationen. Eine Ausnahme bestand während der Bestockungsphase des Weizens, in der die Bodenkomponente die Rückstreuung dominierte.
- ▶ Bei vergleichbarer Bodenfeuchte nahm die Kreuz-Polarisation des L-Bandes kontinuierlich mit der Bestandesentwicklung zu.
- ▶ Veränderungen der Rückstreuintensität während der Bestandesentwicklung waren nicht homogen über die gesamte Testfläche.
- ▶ Die Veränderung der Rückstreuintensität der verschiedenen Radarkanäle zwischen den Entwicklungsstadien verhielt sich im Vergleich verschiedener Bestände nahezu identisch.
- ▶ Die absolute Rückstreuintensität des Winterweizenbestandes zu gleichen Entwicklungsstadien verschiedener Vegetationsperioden war aufgrund äußerer Einflüsse, wie Taubildung und Bodenfeuchtigkeit, nicht vergleichbar. Das relative Verhältnis der einzelnen Radarkanäle zueinander erwies sich dagegen als weitgehend konstant.
- ▶ Es konnten nur wenige signifikante Beziehungen zwischen der Rückstreuung der Radarkanäle und den Bestandesmerkmalen Biomasse und Bestandesdichte ermittelt werden. Die Zunahme der beiden Bestandesmerkmale verursachte im Allgemeinen eine Zunahme der Rückstreuung im L-Band und eine Abnahme im X-Band. Der Einfluss der Ähren auf die Rückstreuung kehrte diesen Zusammenhang im X-Band jedoch um.
- ▶ Zur Erfassung der räumlichen Bestandesvariabilität mittels pixelbasierter Auswertung war das X-Band, und hier insbesondere der horizontal polarisierte Kanal X-HH, am besten geeignet.
- ▶ Die Zusammenhänge zwischen Radarrückstreuung und Bestandesmerkmalen wurden durch die Verwendung von Polarisationsindizes verbessert. Vorteilhaft waren hier insbesondere eine Kombination aus einer Polarisation des X-Bandes und der Kreuz-Polarisation des L-Bandes oder aber eine Kombination aus den beiden ko-polaren Kanälen des X-Bandes.

- ▶ Der Vergleich verschiedener Entwicklungsstadien des Weizens ließ keinen Zeitpunkt erkennen, an dem die Radarrückstreuung besonders gut zur Erfassung der Bestandesvariabilität geeignet war.
- ▶ Die Erfassung der räumlichen Variabilität der Weizenbestände mittels Radarfernerkundung konnte durch einen generalisierten, diskriminanzanalytischen Ansatz auf der Ebene von drei Bestandesdichteklassen verbessert werden.
- ▶ Der generalisierte Modellierungsansatz auf Basis der Radarinformation erbrachte eine qualitativ vergleichbare Abbildung der Bestandesdichte, wie sie mittels NDVI erreicht werden konnte. Aufgrund der radartypischen Speckle-Struktur war eine Anwendung der Modellfunktion auf die Bilddaten jedoch problembehaftet.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen deutlich die Schwierigkeiten der praktischen Anwendung der Radarfernerkundung als Informationsgrundlage für eine teilschlagspezifische Bestandesführung. Die Variabilität der Radarrückstreuung von Winterweizenbeständen wird durch ein komplexes Wirkungsgefüge aus verschiedenen system- und objektspezifischen Einflussfaktoren verursacht, welche zudem zeitlichen Schwankungen unterliegen. Die vielfältigen Ursachen erschweren die Interpretation und Vergleichbarkeit, so dass es kaum möglich ist, die Radarrückstreusignatur mit einem bestimmten Entwicklungsstadium in Verbindung zu bringen. Ferner sind alle ermittelten Zusammenhänge nur fallspezifisch und nicht auf andere Zeitpunkte und Gebiete generalisierbar.

Durch die Multi-dimensionalität wurde allerdings ein Informationszugewinn hinsichtlich der Variabilität der Bestände erzielt. Derzeit ist die optische Fernerkundung aufgrund der geringeren Beeinflussung durch variable, schwer erfassbare Faktoren und dem besseren Verständnis der physikalisch zugrundeliegenden Mechanismen als das stabilere Verfahren anzusehen.

## Using multi-dimensional radar data for the determination of spatial variability of crop features

### Summary

Radar remote sensing allows an extensive and continuous observation of agricultural soils and crops due to its weather independence. Thus dynamic changes could be determined. Quantitative relationships between radar backscattering and agronomically relevant crop data are required for using this techniques for precision agriculture.

It was the aim of the presented study to investigate the suitability of radar backscattering of multi-dimensional SAR-data (*Synthetic Aperture Radar*) as a source of information about the spatial variability of winter wheat characteristics.

The investigations were carried out on three fields of the Neetzower Agrarhof Peenetal GmbH in Mecklenburg-Western Pomerania in 2001 and 2002. In total plant samples were taken at four different growth stages of the winter wheat crop. The main objective of the study was the detection of the spatial variability of crop characteristics. Airborne radar-data was acquired by the German E-SAR sensor of the German Aerospace Center (DLR-Oberpfaffenhofen) at two different wavelengths, X-band (3 cm) and L-band (23 cm) with vertical (VV) and horizontal (HH) co-polarization. Additional cross-polarization (HV, VH) was only available for the L-band. Radar images were taken five times during two vegetation periods, concurrently with the assessment of relevant crop and soil parameters in a field campaign.

The research yielded the following main results:

- ▶ During the tillering of winter wheat backscattering of the X-band was always higher than backscattering of the L-band. In comparison, no consistent results for other growth stages were found due to an increasing influence of crop-specific and weather dependent effects on the backscatter.
- ▶ The backscatter intensity of all radar channels varied during the vegetation period in dependence on several influencing factors. The backscatter signal was dominated stronger by the geometrical structure of the crop canopy than the water content of the plant.



- ▶ The backscattering of vertical polarizations of the X- and L-band was usually lower than the backscatter of horizontal polarizations due to a higher absorption by dominating vertical structures of the wheat canopy. In contrast during tillering backscatter of the soil was dominating.
- ▶ Cross-polarized backscattering increased with crop development when the soil moisture content remained constant.
- ▶ Changes in backscatter intensity during crop development were not homogeneous within each test site.
- ▶ Changes of the backscatter intensity of each radar channel during different growth stages was almost identical on different winter wheat fields.
- ▶ The total backscatter intensity of winter wheat during stem elongation in different vegetation periods was not comparable due to varying external influences such as dew and soil moisture, but the relative proportion of the different radar channels remained almost constant.
- ▶ A few significant relationships between radar backscatter of single channels and crop features such as biomass (fresh weight) and crop density were determined. Generally, with higher values for both features the L-band radar backscatter increased and the X-band radar backscatter decreased. With ear emergence an inverse relationship between crop features and X-band was found.
- ▶ X-band backscatter, particularly the horizontal polarization, was most suitable for determining the spatial variability of winter wheat characteristics by means of a pixel based evaluation.
- ▶ Relationships between radar backscatter and crop characteristics were improved by using different polarization indices. Here, combinations of one co-polarized X-band with one cross-polarized L-band, but also those of both co-polarized channels of the X-band distinctly improved the correlations.
- ▶ No particular growth stage of winter wheat proved to be preferable for determining the spatial variability of crop features by means of radar backscattering.

- ▶ A generalized discriminant analytical approach based on crop density classes improved the determination of spatial variability of crop characteristics by means of radar backscattering.
- ▶ The results of the generalized modelling approach based on radar backscatter revealed a crop density distribution comparable to that provided by the NDVI. The transformation of pixel values with the model function was, however, difficult due to the image structure caused by the radar typical speckle-effect.

The results of this study clearly reveal the difficulties related to a practical application of radar remote sensing as a source of information for precision agriculture. The radar backscatter variability of winter wheat is affected by complex scattering mechanisms caused by various system- and crop-specific factors, which are highly variable over time. These physically very complex relationships make the interpretation and comparability extremely difficult. It is hardly possible to assign the radar backscatter signature to a specific growth stage of winter wheat. Additionally, no general relationships can be established, but are rather valid for individual fields or areas so that it is not possible to transfer them to other areas.

The multi-dimensionality of radar data offers, however, additional information about crop variability. Currently optical remote sensing is the superior approach to determine the spatial variability of crop features due to the better understanding of underlying physical mechanisms.

## 7 Literaturverzeichnis

**AG Boden** (1994) Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl. 392 S, Hannover, 1994.

**Allen WA, Ulaby FT** (1984) Modelling the polarisation dependence of the attenuation in vegetation, Proc. of IGARSS 84, ESA-SP 215, 119-124.

**Asner GP** (1998) Biophysical and Biochemical sources of Variability in Canopy Reflectance. Remote Sensing of Environment, 64, 234-253.

**Asrar G, Fuchs M, Kanemasu ET, Hatfield JL** (1984) Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat. Agronomy Journal, Vol. 76, 300-306.

**Astrium** (2003) TerraSAR - Satellite Data Custom Tailored for Commercial Use, [online] zu finden in <[http://53.122.45.146/corp/programs/index\\_earth\\_ob.htm?/programs/part7/00000444.htm](http://53.122.45.146/corp/programs/index_earth_ob.htm?/programs/part7/00000444.htm)> [zitiert am 30.03.2003].

**Attema EPW, Ulaby FT** (1978) Vegetation modeled as a cloud model, Radio Science 13, 357-364.

**Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber W** (2000) Multivariate Analysemethoden – eine anwendungsorientierte Einführung, Springer-Verlag, Berlin.

**Bähr HP, Vögtle T** (1998) Digitale Bildverarbeitung: Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung, 3. Aufl., Heidelberg, Wichmann, 1998, ISBN 3-87907-270-1.

**Bahrenberg G, Giese E, Nipper J** (1992) Statistische Methoden in der Geographie – Band 2 Multivariate Statistik. Stuttgart: Teubner-Verlag, 414 p, 2. Aufl., ISBN 3-519-03422-0.

**Bahrenberg G, Giese E, Nipper J** (1999) Statistische Methoden in der Geographie – Band 1 Univariate und bivariate Statistik. Stuttgart: Teubner-Verlag, 234 p, 4. Aufl., ISBN 3-519-23421-1.

**Bannari A, Morin D, Bonn F, Huete AR** (1995) A Review of Vegetation Indices. Remote Sensing Reviews, 1995, Vol. 13, pp. 95 – 120.

**Baret F, Guyot G** (1991) Potenzial and limits of Vegetation Indices for LAI and APAR assessment, Remote Sensing of Environment, 35, 161-173.

**Baret F, Jacquemond S** (1994) Modelling canopy spectral properties to retrieve biophysical and biochemical characteristics. In: Hill J, Mégiér J (eds) Imaging spectrometry – a new tool for environmental observations. Dordrecht, Bosten, London: Kluwer, pp 145-167, ISBN 0-7923-2965-1.

**Baronti S, Del Frate F, Ferrazzoli P, Paloscia S, Pampaloni P, Schiavon G** (1995) SAR polarimetric features of agricultural areas. Int. Journal of Remote Sensing, Vol. 16, No. 14, 2639-2656.

**Bartelme N** (2000) Geoinformatik. Modelle, Strukturen, Funktionen. Springer-Verlag.

**BASF** (1997) Pilzkrankheiten und Schadsymptome im Getreidebau. BASF Aktiengesellschaft.

**Benallegue M, Taconet O, Vidal-Madjar D** (1994) Estimation of soil and crop parameters over wheat at field scale from Airborne radar backscattering data in C and X bands, Proc. Of the 1<sup>st</sup> Int. Airborne Remote Sensing Conference, Strasbourg, 237-338.

**Ben-Dor E, Levin N** (2000) Determination of surface reflectance from raw hyperspectral data without simultaneous ground data measurements: a case study of the GER 63-channel sensor data acquired over Naan, Israel, In: Int. J. of Remote Sensing, Vol. 21, No. 10, pp 2053-2074.

**Bjerre KD** (1999) Disease maps and site specific fungicide application in winter wheat. In: Precision Agriculture '99, ed. J.V. Stafford. Sheffield, UK: Sheffield Academic Press., pp.495-504.

**Bjerre KD, Jørgensen LN, Olesen JE** (in press): Site-specific management of crop diseases. In: Precision Farming - A Global Perspective. Ed: A Srinivasan. Haworth Press Inc., Binghamton, USA.

**Blackmer TM, Schepers JS, Varvel GE, Meyer GE** (1996) Analysis of aerial photography for nitrogen stress within corn fields, Agron. J. 88, 729-733.

- BNSC** (2001) RADWHEAT – Advanced Radar for Measuring Green Area Index (GAI), Biomass and Shoot Numbers in Wheat, British National Space Centre Link Project, Final Report on Field Experiments R4/25, 2001.
- Boerner W-M, Mott H, Lüneburg E, Livingstone C, Brisco B, Brown RJ, Patterson J** (1998) Polarimetry in Radar Remote Sensing: Basic and Applied Concepts. In Henderson FM & Lewis AJ (eds.) 1998: Principles and application of imaging Radar, Manual of remote sensing, Third edition Vol. 2, New York: Wiley & Sons, pp. 271-357, ISBN 0-471-29406-3.
- Bouman BAM** (1991) Crop parameter estimation from ground-based X-band (3cm wave) radar backscattering data, *Remote Sensing of Environment* 37, 193-205.
- Bouman BAM** (1995) Growth models to simulate crop growth, optical reflectance and radar back-scatter of sugar beet and winter wheat, In: G.J.A. Nieuwenhuis & W.W.L. van Rooij (Eds), Application of the ERS-1 SAR data in agriculture and forestry. SC-DLO Report 101, SC-DLO, Wageningen, The Netherlands, pp. 123-138.
- Bouman BAM, Uenk D** (1992) Crop Classification Possibilities with Radar in ERS-1 And JERS-1 Configuration. *Remote Sensing of Environment*, 40, pp. 1-13.
- Bouman BAM, van Kasteren HWJ** (1990) Ground-based X-Band (3-cm wave) radar backscattering of agricultural crops. II. Wheat, Barley and Oats; the Impact of Canopy Structure. *Remote Sensing of Environment*, 34, 93-105.
- Bouman BAM, van Kraalingen DWG, Stol W, van Leeuwen HJC** (1999) An agro-ecological modelling approach to explain ERS SAR radar backscatter of agricultural crops, *Remote Sensing Environment*, 67, 137-146.
- Bouman BAM, Vissers MAM, Uenk D** (1991) Multifrequency Radar Measurements of Potato, Beet and Wheat during the Agriscatt-88 campaign in The Netherlands.
- Brakke TW, Kanemasu ET, Steiner JL, Ulaby FT, Wilson E** (1981) Microwave radar response to canopy moisture, Leaf-Area Index, and dry weight of wheat, corn and sorghum, *Remote Sensing of the Environment*, 11, 207-220.
- Brisco B, Bedard D, Naunheimer JJ, Brown RJ** (1993) Environmental Effects on Radar Data of Agricultural Areas, Proceedings of 16<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing, Sherbrooke, Québec, June 7-10, 1993, pp. 283-288.
- Brisco B, Brown RJ** (1998) Agricultural Applications with Radar. In Henderson FM & Lewis AJ (eds.) 1998: Principles and application of imaging Radar, Manual of remote sensing, Third edition Vol. 2, , New York: John Wiley & Sons, pp. 381-406, ISBN 0-471-29406-3.
- Brisco B, Brown RJ, Hirose T, Mc Nairn H, Staenz K** (1998) Precision Agriculture and the Role of Remote Sensing: A Review; *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, No 3, 1998, pp. 315-327.
- Brisco B, Brown RJ, Koehler JA, Sofko GJ, McKibben MJ** (1990) The Diurnal Pattern of Microwave Backscattering by Wheat. *Remote Sensing of Environment*, 34: 37-47.
- Brisco B, Ulaby FT, Protz R** (1984) Improving crop classification through Attention to the timing of airborne radar acquisitions, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 50, pp. 739-745.
- Brosius F** (1999) SPSS 8 – Professionelle Statistik unter Windows. Bonn: MITP-Verlag, 1001 p, ISBN 3-8266-0437-7
- Brostuen D** (1999) New and Improved Digital Orthophoto Imaging Techniques, *Earth Observation Magazine*, [www.Eomonline.com/common/archives/sep99/technotes2.htm](http://www.Eomonline.com/common/archives/sep99/technotes2.htm) [zitiert 25.09.2002].
- Brown RJ, Manore MJ, Poirier S** (1992) Correlations between X-, C- and L-band imagery within an agricultural environment. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 1645-1661.
- Brown SCM, Bennett JC, Quegan S, Cookmartin G, Morrison K** (2001) Measurements of Radar Scattering from Wheat Canopies and their Relevance to Recovering Crop Parameters. Proc. of 8th Int. Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing – ISPRS -, 8-12 January, Aussois, France, 293-296.
- Brown SCM, Cookmartin G, Morrison K, Mc Donald AJ, Quegan S** (2000) Wheat Scattering Mechanisms observed in Near-Field Radar Imagery compared with Results from a Radiative Transfer Model, *IGARSS 2000*, pp. 2933-2953.
- Brown SCM, Morrison K, Cookmartin G, Bennett JC, Quegan S** (2000a) Using radar for management of wheat canopies, *Aspects of Biology* 60, *Remote Sensing in Agriculture*, pp. 11-19.
- BSA** (2001) Beschreibende Sortenliste 2001, Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen und Hackfrüchte. Hannover: Landbuch Verlagsgesellschaft mbH, 258 p., ISSN 09 48-41 67.

- Burrough PA, Mc Donnell** (1998) Principles of Geographical Information Systems. 2nd Edition. New York, Oxford: Oxford University Press, 1998.
- Bush TF, Ulaby FT** (1975) Fading Characteristics of Radar Backscatter from Selected Agricultural Targets, IEEE Trans. On Geoscience and Electronics, Vol. GE-14.
- Champion I.** (1996): Simple Modelling of Radar Backscattering Coefficient over a Bare Soil: Variation with Incidence Angle, Frequency and Polarization, International Journal of Remote Sensing, 17, 4, pp. 783-800.
- Cihlar J, Dobson MC, Schmutge T, Hoogeboom P, Janse ARP, Baret F, Guyot G, LeToan T, Pampaloni P** (1987) Procedures for the description of agricultural crops and soils in optical and microwave remote sensing studies, Int. J. of Remote Sensing, Vol. 8, No. 3, pp. 427-439.
- Cloutis E, Connery DR, Major DJ, Dover FJ** (1996) Agricultural crop condition monitoring using airborne C-band synthetic aperture radar in southern Alberta, Int. Journal of Remote Sensing, Vol. 17, No. 13, 2565-2577.
- Cocks TD, Jenssen R, Stewart A, Wilson I, Shields T** (1998) The HyMap Airborne Hyperspectral Sensor: The system, calibration and performance. In Proceedings of the 1<sup>st</sup> EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Zurich.
- Conel JE, Green RO, Vane G, Bruegge CJ, Alley RE** (1987) Airborne Imaging Spectrometer-2: Radiometric spectral characteristics and comparison of ways to compensate for the atmosphere, Proceedings of SPIE Vol. 834 Imaging Spectroscopy II, pp. 140-157.
- Cookmartin G, Saich P J, Quegan S, Cordey RA, Burgess-Allen P, Sowter A.** 2000. Modeling Microwave Interactions with Crops and Comparison with ERS-2 SAR Observations. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, pp. 658-670.
- Cookmartin G, Saich PJ, Quegan S, Cordey RA, Burgess-Allen P** (1998) Using backscatter models to define the limits of crop information recovery from SAR data. In: Proc. Of the Retrieval of Bio and Geo-physical Parameters from SAR-Data for Land Applications Workshop, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, pp. 107-114.
- Dampney P, Quegan S, Meadows P** (2001) Advanced Radar for Measuring Green Area Index (GAI), Biomass and Shoot Numbers in Wheat. Home-Grown Cereals Authority (HGCA) Project Report No. 252 (RADWHEAT) [online]. UK, zu finden in <<http://www.hgca.com/ftpaccess/docs/projectreports/report252.pdf>> [zitiert am 01.04.2003].
- De Mattheais P, Schiavon G, Solimini D** (1994) Effect of scattering mechanisms on polarimetric features of crops and trees, Int. J. of Remote Sensing, Vol. 15, No. 14, pp. 2917-2930.
- Deering DW, Eck TF, Banerjee B** (1999) Characterization of the reflectance anisotropy of three boreal forest canopies in spring-summer, Rem. Sens. Environ., 67, 205-229.
- Dempsey DA, Barnett PJ, Kenny F, Gibson C** (1997) Initial observations on the characterization of soil moisture conditions along the Oak Ridges Moraine using RADARSAT data and field measurements, ADRO Mid-Term Symposium [online]. Canada, zu finden in <[http://www.space.gc.ca/csa\\_sectors/earth\\_environment/radarsat/research/adro1/adrocd/main1.html](http://www.space.gc.ca/csa_sectors/earth_environment/radarsat/research/adro1/adrocd/main1.html)> [zitiert am 15.04.2003].
- Dixon J, McCann M** (1997) Precision Agriculture in the 21<sup>st</sup> Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management. Washington D.C.: National Academy Press, 118,p, ISBN 0-309-05893-7.
- DLR** (1994) EMAC E-SAR data format description, Oberpfaffenhofen: German Aerospace Research Establishment (DLR).
- Dobson MC, Ulaby FT** (1998) Mapping Soil Moisture Distribution with Imaging Radar. In Henderson FM & Lewis AJ (eds.) 1998: Principles and application of imaging Radar, Manual of remote sensing, Third edition Vol. 2, , New York: John Wiley & Sons, pp. 407-430, ISBN 0-471-29406-3.
- Dubois PC, van Zyl J, Engman T** (1995) Measuring Soil Moisture with Imaging Radar, IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, Vol. 33, No. 4, pp. 915-926.
- Dusek DA, Jackson RD, Musick, JT** (1985) Winter wheat vegetation Indices calculated from combinations of seven spectral bands. Remote Sensing of the Environment, 18, 255-267.
- Elachi C** (1988) Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques. New York.
- Engman T, Chauhan N** (1995) Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing, Remote Sensing of Environment, 51,pp. 189-198.
- ENVI 2000:** ENVI 3.4 User's Guide, 2000 Edition, Boulder USA, 930 p.

- Eom HJ, Fung KA** (1984) A scatter model for vegetation up to Ku-Band, *Remote Sensing of Environment*, 15, 185-200.
- Erasmí S** (2002) Analyse spektroradiometrischer in situ Messungen als Datenquelle für die teilflächenspezifische Zustandsbeschreibung von Winterweizenbeständen. Dissertation an der Universität Göttingen, Deutschland, 201 p.
- Erb W-D** (1990) Anwendungsmöglichkeiten der linearen Diskriminanzanalyse in Geographie und Regionalwissenschaft, *Schriften des Zentrums für regionale Entwicklungsforschung der Justus-Liebig-Universität Giessen*, Bd. 39.
- ERDAS** (1999) Field guide. Fifth edition, Atlanta USA, 672 p.
- ERDAS** (2001) Tour Guide's. Erdas Imagine 8.5, Atlanta, USA, 662 p.
- Ernst H, Fischbeck G** (1984) X-, and L-band radar backscatter analysis of agricultural crops in West Germany. - In: *Proceedings of IGARSS'84 Symposium*, 27. – 30. August 1984, Strasburg, ESA SP-215, S. 137 – 140.
- Ernst-Cordary H** (1984) Rückstreuverhalten von Pflanzenbeständen und oberen Bodenschichten im Spektralbereich der Mikrowelle, Dissertation an der TU München, 1984.
- ESRI** (1999) Extending ArcView® Gis, Teach yourself to use ArcView GIS extensions, New York, USA, 527 p., ISBN 1-879102-05-6.
- Evans DL, Farr TG, van Zyl JJ, Zebker HA** (1988) Radar polarimetry: Analysis tools and applications, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 26, No. 6, pp. 774-789.
- Farrand WH, Singer RB, Merenyi E** (1994) Retrieval of apparent surface from AVIRIS data: a comparison of Empirical Line, radiative transfer and spectral mixture methods, *Remote Sens. Environ.* 47, 369-374.
- Ferrazzoli P, Guerriero L** (1994) Interpretation and model analysis of Maestro 1 Flevoland data. *Int. Journal of Remote Sensing*, Vol. 15, 2091 – 2095.
- Ferrazzoli P, Paloscia S, Pampaloni P, Schiavon G, Solimini D, Coppo P** (1992) Sensitivity of microwave measurements to vegetation biomass and soil moisture content: A case study. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 750-756.
- Fisher RA** (1936) The use of multiple measurements in taxonomic problems. *Annals of Eugenics* 7, 179-188.
- Flowers M, Weisz R, Heiniger R** (2001) Remote sensing of winter wheat tiller density for early nitrogen application decisions. *Agron. J.* 93:783-789.
- Friedl H, Stampfer E** (2001) Cross-Validation. In: *Encyclopedia of Environmetrics*, Vol. 1, Eds.: El-Shaarouri, A. und W. Piegorsch, Wiley:Chichester, pp. 452-460.
- Frost VS, Stiles JA, Shanmugan KS, Holtzman KC** (1982) A Model for Radar Images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-4, 157-166.
- Gillespie TJ, Brisco B, Brown RJ, Sofko GJ** (1990) Radar Detection of a Dew Event in Wheat, *Remote Sensing of Environment*, 33, 151-156.
- Gnosa T** (1997) Radarfernerkundung landwirtschaftlich genutzter Flächen – Scatterometermessungen an Winterweizen und Zuckerrüben. – Dissertation an der Friedrich Wilhelm Universität Bonn.
- Godding R, Dockter K, Kupfer G, Kühbauch W** (1989) Eignung von SAR-Daten zur Gewinnung von Agrarinformation, In: *Geo-Informations-Systeme: GIS – Zeitschrift für raumbezogene Informationstechnologie* 2/1989.
- Goodenough DG, Deguise JC, Robson MA** (1990) Multiple expert systems for using digital terrain models, in *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'90*, Washington DC, p. 961.
- Greifswalder Geografen** (1991) Exkursionsführer Mecklenburg-Vorpommern, 1. Aufl., [Hrsg.] W. Albrecht, Braunschweig.
- Haas G** (1995) Auswahl von Feldversuchsflächen auf heterogenem Auenboden: Bestandeskartierungen – Uniformitätsernten – Luftbildaufnahmen – Exaktvermessung. Dissertation an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.
- Hamacher M** (2000) Zustandserfassung von Wintergetreide und Zuckerrüben während des Wachstums mit Hilfe des C-Band Radars der ERS-1 und ERS-2 Satelliten- Dissertation an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.
- Haneklaus S, Lilienthal H, Schnug E, Panten K, Haveresch E** (2000) Routines for efficient yield mapping. In *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Precision Agriculture*, July 16-19 2000, Bloomington, Minnesota, USA.

**Haneklaus S, Ruehling I, Schroeder D, Schnug E** (1997) Studies on the Variability of Soil and Crop Fertility Parameters and Yields in different landscapes of Northern Germany. Precision Agriculture 1997, Vol. II, 785-792, J.V. Stafford (Ed.) Scientific Publishers Ltd., UK.

**Haneklaus S, Schnug E** (2000) Nachhaltige Landwirtschaft mittels Precision Agriculture. Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 212 (2000), ISBN 3-933140-34-X..

**Hatfield JL, Kanemasu ET, Asrar G, Jackson RD, Pinter PJ Jr., Reginato RJ, Idso SB** (1985) Leaf Area Estimates from Spectral Measurements Over Various Planting Dates of Wheat. International Journal of Remote Sensing 6, pp 167-175.

**Hellebrand HJ** (1997) Prinzipien zur Zustandserfassung von Böden und Pflanzen (Principles for the acquisition of the state of soils and plants). Frühjahrstagung der DPG, Münster 17.-21. 3. 1997, Verhandlungen der DPG, Reihe VI, Band 32, Heft 5/1997, 1038, Langfassung CD-ROM, 2N Hochschulkommunikation, Holzheim 1997 und CD DPG98 (ISBN 3-931253-25-2), Lehmanns Berlin 1999 [online] <<http://www.atb-potsdam.de/hauptseite-deutsch/Institut/Abteilungen/Abt2/Mitarbeiter/jhellebrand/jhellebrand/helle2.html#Conferences>> [zitiert am 29.05.2003].

**Herold M, Pathe C, Schmillius CC** (2001) The Effect of free Vegetation Water on the Multi-Frequency and Polarimetric Radar Backscatter – Proceedings of International Remote Sensing and Geoscience Symposium (IGARSS), Sydney, July 2001 (on supplement CD Rom).

**HGCA** (1998) The Wheat Growth Guide, Home-Grown Cereals Authority, London, p. 31.

**Hinzman LD, Bauer ME, Daughtry CST** (1986) Effects of Nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat, Remote Sensing of Environment 19, 47-61.

**Hobbs S, Ang W, Seynat C** (1998) Wind and Rain Effects on SAR Backscatter from Crops. In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Workshop on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, ESTEC, Netherlands, 21. - 23. Okt. 1998.

**Hochschild V** (1995) Geomorphologische Kartierung und Untersuchung der Auftaudynamik mit ERS-1-SAR-Daten im Bereich der Antarktischen Halbinsel, Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung, Heft 28.

**Hoekman DH, van der Sanden JJ, Vissers MAM** (1992) MAESTRO-1 Flevoland/Speulderbos: analysis results of multiband polarimetric SAR data of forests and agricultural crops. In: Proc. Of MAESTRO-1/AGRISCATT: Radar Techniques for Forestry and Agricultural Applications, Final Workshop, The Netherlands, pp. 53-58, Paris, France: European Space Agency.

**Horn R** (1997) The DLR Airborne SAR Project E-SAR [online]. Germany, zu finden in <[http://www.dlr.de/NE-HF/projects/ESAR/igars96\\_scheiber.html](http://www.dlr.de/NE-HF/projects/ESAR/igars96_scheiber.html)> [zitiert am 28.02.2003].

**Horn R, Schreiber R, Buckreuss S, Zink M, Moreira A** (1999) E-SAR generates Level-3 products for ProSmart, in Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'99), Hamburg, Germany.

**Isensee E, Griepentrog HW** (1998) DGPS in der Landwirtschaft – Möglichkeiten, Kosten und Grenzen. In: RKL-Schrift, Rationalisierungskuratorium f. Landwirtschaft, pp. 925-942.

**Jackson T, Schmutge T** (1989) Correction for the effects of vegetation on the microwave emission of soils, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 1989), pp. 753-756.

**Jackson RD, Teillet PM, Slater PN, Fedosejevs G, Jasinski MF, Aase JK, Moran MS** (1990) Bidirectional measurements of surface reflectance for view angle corrections of oblique imagery, Remote Sens. Environ., 32, 189-202.

**Jahnke S** (1991) Die natürlichen Bedingungen, in: Exkursionsführer Mecklenburg-Vorpommern, 1. Aufl., W. Albrecht [Hrsg], 1991.

**Jürgens C** (2000) Fernerkundungsanwendungen im Precision Farming, Petermanns Geographische Mitteilungen, 144, pp. 61-69.

**King D** (1991) Determination and reduction of cover type brightness variations with view angle in airborne multispectral video imagery, Photogramm. Eng. Remote Sens., 57, 1571-1577.

**Klank I, Kretschmer H, Marchand P** (1990) Untersuchungen zum Stichprobenumfang für die Bestimmung der Bestandesdichte, der Trieb- und der Ährenzahl bei Winterweizen.

**Klausing H, Holpp W** (2000) Radar mit realer und synthetischer Apertur: Konzeption und Realisierung. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 399 p, ISBN 3-486-23475-7.

- Klenke M** (1999) GIS-gestützte Landnutzungsklassifikationen auf Grundlage von Daten passiver und aktiver Fernerkundungssensoren zur distributiven Flußeinzugsgebietsmodellierung. Jenaer Geographische Schriften, Band 8.
- Kodak** (1998) Kodak Aerochrome II Infrared Film 2443, Technical notes AS-69, Eastman Kodak Company.
- Körschens M** (1972) Die Ermittlung des Stichprobenumfanges für stückweise zu bestimmende Prüfmerkmale in der Getreidezüchtung. In: Aktuelle Probleme der Getreideforschung, Tagung Berliner Akademie Landwirtsch. Wiss. DDR; 119, Berlin 1972, 105-112.
- Kruse FA, Kierein-Young KS, Boardman JW** (1990) Mineral Mapping at Cuperite, Nevada with the 63 Channel imaging spectrometer, Photogram. Eng. Remote Sens., 56, 83-92.
- Kühbauch W** (2002) Fernerkundung – eine Zukunftstechnologie im Präzisionspflanzenbau. In Precision Agriculture – Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis, KTBL-Sonderveröffentlichung 038, pp 79-87.
- Kübler E** (1994) Weizenanbau. Stuttgart: Ulmer Verlag, S. 191, ISBN 3-8001-3091-2.
- Kuntze H, Roeschmann G, Schwerdtfeger G** (1994) Bodenkunde. Stuttgart: Ulmer-Verlag, 5. Aufl., S. 424, ISBN 3-8001-2651-6.
- Lacaze B** (1996) Spectral characterisation of vegetation communities and practical approaches to vegetation cover changes monitoring. In: Hill J; Peter D (eds) The use of remote sensing for land degradation and desertification monitoring in the mediterranean basin - State of the art and future research, Proceedings of an experts workshop, Valencia, Spain 13-15 June 1994, pp 149-166.
- Le Toan T, Lopes A, Huete M** (1984) On the relationships between radar backscattering coefficient and vegetation canopy characteristics, In Proceedings of. IGARSS '84 Symposium, Strasbourg, pp. 155-160.
- Leblon B** (1997) Soil and vegetation optical properties.- In: The Remote Sensing Core Curriculum, Volume 4 Applications in Remote Sensing [online]. Canada, zu finden in <<http://umbc7.umbc.edu/~tbenja1/index.html>> [zitiert am 15.01.2003].
- Lee JS, Grunes MR, DeGrandi G** (1997) Polarimetric SAR Speckle filtering and its Impact on Classification, Proc. of IGARSS'97, Singapore.
- Lee JS, Jurkevich I** (1994) Speckle Filtering of Synthetic Aperture Radar Images: A Review, Remote Sensing Reviews, Vol. 8, pp. 313-340.
- Lemoine GG** (1991) Dual polarization microwave backscatter signatures of bare and vegetated soils, Proceedings of the 5<sup>th</sup> Int. Colloquium - Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, France, 14-18 January 1991, ESA SP-319, 289-292.
- Lewis AJ, Henderson FM, Holcomb DW** (1998) Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective. In Henderson FM & Lewis AJ (eds.) 1998: Principles and application of imaging Radar, Manual of remote sensing, Third edition Vol. 2, , New York: John Wiley & Sons, pp. 131-176, ISBN 0-471-29406-3.
- LGN, Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen** (2002) ATKIS - Digitale Geländehöhenmodelle - DGM [online]. Deutschland, zu finden in <<http://www.lgn.de/>> [zitiert am 15.12.2002].
- Lilienthal H** (2003) Entwicklung eines bodengestützten Fernerkundungssystems für die Landwirtschaft. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft – Braunschweig: FAL, 2003, Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 254, ISBN 3-933140-76-5.
- Lillesand TM, Kiefer RW** (1994) Remote Sensing and Image Interpretation. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons. 750 p, ISBN 0-471-57783-9.
- Lorenzen B, Jensen A** (1989) Changes in leaf spectral properties induced in barley by cereal powdery mildew. Rem. Sens. Environm. 27, 201-209.
- Lottmann W** (2000) Untersuchung und Realisierung eines Programms zur Lichtabfallkorrektur in digitalen Bildern, Diplomarbeit am Inst. f. Photogrammetrie und Ingenieurvermessung d. Universität Hannover.
- Luciani S, Paloscia S, Pampaloni P, Schiavon G, Sigismondi S, Solimini D** (1994) Sensitivity of Microwave Backscattering to Crop Biomass. Proceedings of IGARSS 94 – Surface and Atmospheric Remote Sensing: Tehnologies, Data Analysis and Interpratation, Vol. 3, 1844-1846, 8-12 August 1994, Pasadena, California USA.



- Macelloni G, Paloscia S, Pampaloni P, Marliani F, Marco G** (2001) The relationship between the backscattering coefficient and the biomass of narrow and broad leaf crops. - In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2001, Vol. 39, No. 4, S. 873 – 884.
- Major DG, Schaalje GB, Asrar G, Kanemasu ET** (1986) Estimation of whole-plant biomass and grain yield from spectral reflectance of cereals. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 12, No. 1, pp. 47-54.
- Mc Nairn H, Duguay C, Brisco B, Pultz TJ** (2002a) The effect of soil crop residue characteristics on polarimetric radar response. Remote Sensing of Environment 80, 308-320.
- Mc Nairn H, Ellis J, van der Sanden JJ, Hirose T, Brown RJ** (2002) Providing Crop Information using RADARSAT-1 and Satellite Optical Imagery. International Journal of Remote Sensing, Vol. 23, No 5, 2002, pp. 851-870.
- Mc Nairn H, van der Sanden JJ, Brown RJ, Ellis J** (2000) The Potenzial of RADARSAT-2 for Crop Mapping and Assessing Crop Condition; Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Lake Buena Vista, Florida, 10-12 January, Vol. 2, 2000, pp.81-88.
- Mc Nairn H, Brown RJ, Wood D** (1998) Incidence Angle Considerations for Crop Mapping Using Multitemporal RADARSAT Data. In Proceedings of 20th Canadian Symposium on Remote Sensing, Calgary, May 11-14, 1998.
- Mehl W** (1994) Data analysis – processing requirements and available software. In: Hill & Megier (eds.) : Imaging spectrometry – a tool for environmental observations, Dodrecht.
- Meier U** (2001) Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen, BBCH Monografie, Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, 2. Auflage, [online] Deutschland, zu finden in <<http://www.bba.de/veroeff/bbch/bbchdeu.pdf>> [zitiert am 10.03.2003].
- Meteorologischer Dienst der Deutschen Demokratischen Republik** (1987) Klimadaten der Deutschen Demokratischen Republik, Reihe B, Bd.14, Klimatologische Normalwerte 1951/80, Potsdam.
- Miller PCH, Lane AG, Wheeler HC** (2002) Optimising Fungicide Application according to Crop Canopy Characteristics in Wheat. Home-Grown Cereals Authority (HGCA), Project Report No. 277 [online] zu finden in <<http://www.hgca.com/ftpaccess/docs/projectreports/report277.pdf>> [zitiert am 27.03.2003].
- Misselwitz G** (1975) Variabilität und Stichprobenumfang morphologischer Merkmale von Winterweizen- und Wintergerstensorten unter verschiedenen Umweltbedingungen. In: Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkunde – Berlin 19 (1975)4., 641-651.
- Moran MS, Hymer DC, Qi J, Kerr V** (1999) Radar imagery for precision crop and soil management. Proc. Int. Conference on Precision Agriculture, 19-22 July, St. Paul, Minnesota, pp. 1423-1434.
- Moran MS, Inoue Y, Barnes EM** (1997) Opportunities and Limitations for Image-Based Remote Sensing in Precision Crop Management, Remote Sensing of Environment, 61:319-346.
- Moran MS, Vidal A, Troufleau D, Qi J, Clarke TR, Pinter PJ, Mitchell TA, Inoue Y, Neale CMU** (1997a) Combining multifrequency microwave and optical data for crop management, Remote Sensing of Environment, 61, pp. 96-109.
- Moran MS** (2000) New imaging sensor technologies suitable for agricultural management. Aspects of Applied Biology 60, Remote Sensing in agriculture, pp.1-10.
- Morrison K, Bennett JC, Brown SCM, Cookmartin G, Dampney P, McDonald AJ, Quegan S** (2000) Very High Resolution Polarimetric L, S, C and x-Band 3D SAR Imagery of the Scattering Characteristics of Wheat Canopies, In Proceedings of IGARSS 2000.
- NASA** (2003) Remote Sensing Glossary [online] zu finden in <<http://rst.gsfc.nasa.gov/AppD/glossary.html>> [zitiert am 19.08.2003].
- Nilsson HE** (1995) Remote Sensing and image analysis in plant pathology. Annual Review Phytopathology 15, 489-527.
- Pack RT, Tarboton DG, Goodwin CN** (1998) A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping. SINMAP User's Manual [online] zu finden in <<http://moose.cee.usu.edu/sinmap/sinmap.PDF>> [zitiert am 07.03.2003].
- Palacios-Orueta A, Ustin SL** (1996) Multivariate statistical classification of soil spectra, Remote Sensing of Environment, 57, 108-118.
- Paloscia S** (1998) An empirical approach to estimating leaf area index from multifrequency SAR data. Int. J. of Remote Sensing, 19 (2): 359-364.

- Pampaloni P, Macelloni G, Paloscia S, Sigismondi S** (1997) The Potenzial of C- and L-Band SAR in assessing vegetation biomass: the ERS-1 and JERS-1 experiments, in Proceedings of the Third ERS Symposium, Florence, pp. 1729-1733.
- Panten K, Haneklaus S, Schnug E** (2002) Spatial accuracy of online yield mapping. [Fehlerquellen bei der Bestimmung der räumlichen Zugehörigkeit von online Ertragsdaten], *Landbauforschung Völkenrode* 52 (4):205-209 (2002).
- Papathanassiou K, Zink M** (1998) Polarimetric Calibration of the Airborne Experimental SAR System of DLR, Proc. EUSAR'98, Friedrichshafen, Germany, pp. 259-262, 25.-27. May 1998.
- Pathe C, Schmullius CC, Riedel T, Herold M, Müller A, Thiel C** (2001) Influence of Diurnal Variations of Surface Wetness on Classification of Agricultural Crops using Multi-Parametric E-SAR Data with respect to Future TerraSar Applications, Proceedings of the 3rd International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, 11th - 14th September 2001, SCEOS, University of Sheffield, UK.
- Pelikka P** (1998) Development of correction chain for multispectral airborne video camera data for natural resource assessment, *Fennia*, 176, 1-110.
- Pelikka P, King D-J, Leblanc SG** (2000) Quantification and Reduction of Bidirectional Effects in Aerial CIR Imagery of Deciduous Forest Using Two Reference Land Surface Types, *Rem. Sens. Reviews*, 2000, Vol. 00, pp. 1-33.
- Poirier S, Thomson KPB, Condal A, Brown RJ** (1988) A comparison of steep and shallow mode (30° and 53° incidence angles) data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 10, No 6, 1085-1092.
- Pope KO, Rey-Benayas JM, Paris JF** (1994) Radar Remote Sensing of Forest and Wetland Ecosystems in the Central American Tropics, *Remote Sensing of Environment*, 48, 1994, 205-219.
- Prévoit L, Dechambre M, Taconet O, Vidal-Madjar D, Normand M, Galle S** (1993) Estimating the characteristics of vegetation canopies with the airborne radar measurements, *Int. J. of Remote Sensing*, 14, pp. 2803-2818.
- Price R, Anger CD, Mah S** (1995) Preliminary evaluation of casi preprocessing techniques, Proc. of the 17<sup>th</sup> Canadian Symp. On Rem. Sens., pp. 694-697.
- Prietzsch C** (1999) Vergleichende Analyse von SAR-Daten für die Regionalisierung des Wassergehalts im Oberboden. ZALF-Bericht Nr.40, Müncheberg.
- ProSmart** (2002) ProSmart II End Report, Teilvorhaben FUGERA, Kap. 4, 1- 50. Dok. No.: PSII-ITD-ER-0001.
- Radeloff V, Hill J, Mehl W** (1997) Forest Mapping from Space, Enhanced Satellite data processing by spectral mixture analysis and topographic corrections, Space Applications Institute – Joint Research Centre, European Commission.
- Raney R** (1998) Radar Fundamentals: Technical Perspective. In Henderson FM & Lewis AJ (eds.) 1998: Principles and application of imaging Radar, Manual of remote sensing, Third edition Vol. 2, , New York: John Wiley & Sons, pp. 9-130, ISBN 0-471-29406-3.
- Rao KS, Rao YS** (1996) Potenzial of SIR-C data to study vegetation over Gujarat Test Site India, *IEEE* 96, 201-204.
- Roberts DA, Yamaguchi Y, Lyon RJP** (1985) Calibration of airborne imaging spectrometer data to percent reflectance using field spectral measurements. Proc. Of the 19<sup>th</sup> Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, 21-25 October. ERIM, Ann Arbor, MI, 679-688.
- Rosenthal WD, Blanchard BJ, Bianchard AJ** (1985) Visible/Infrared/Microwave Agriculture Classification, Biomass and Plant Height Algorithms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 23, pp. 84-90.
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW, Harlan JC** (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md. p 371.
- Sandmeier S, Itten, K** (1999) A field goniometer system (FIGOS) for acquisition of hyperspectral data, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 37, 978-986.
- Schellberg J** (1990) Die spektrale Reflexion von Weizen – ein Beitrag zur Zustandsbeschreibung landwirtschaftlicher Kulturpflanzenbestände durch Fernerkundung, Dissertation an der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- Schmullius CC** (1992) Radarfernerkundung landwirtschaftlicher Flächen mit einem flugzeuggetragenen Scatterometer. *Berliner Geowiss. Abhandl., Reihe D, Band 3*.

- Schmullius CC, Evans DL** (1997) Review article Synthetic Aperture Radar (SAR) Frequency and Polarization Requirements for Applications in Ecology, Geology, Hydrology, and Oceanography: A tabular Status Quo after SIR-C/X-SAR, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, No 13, 2713 – 2722.
- Schmullius CC, Nithack J** (1992) High-resolution SAR-frequency and polarization dependent backscatter variation from agricultural fields, *Proc. IGARSS 92, Houston*, pp. 930-932.
- Schmullius CC, Nithack J.** (1996) Crop monitoring with multitemporal airborne DLR E-SAR images, *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'95), Florence, Italy, 10 – 14 July 1995*, vol. 1 (Picataway, NJ), pp. 719-721.
- Schnug E, Haneklaus S, Lamp J** (1990) Economic and ecological optimization of farm chemical application by "Computer Aided Farming" (CAF). - *Proc. Int. Conf. Agric. Engineering Berlin (1990)*, S.163-164.
- Schröder D** (1999) Strategien zur Erfassung der kleinräumigen Heterogenität. In: *Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, KTBL-Arbeitspapier 264*, pp. 47-52.
- Secher BJM** (1997) Site specific control of diseases in winter wheat. *Aspects of Applied Biology* 48:57-64.
- Sellers P** (1985) Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration, *Int. J. of Remote Sensing*, 6, pp. 1335-1375.
- Sinoquet H, Andrieu B** (1993) The geometrical structure of plant canopies: characterization and direct measurement methods. In: *Varlet-Grancher et al. (ed) Crop structure and light microclimate characterization and applications*, Paris: INRA, 1993, pp.131-153.
- Skriver H, Svendsen MT, Thomsen AG** (1999) Multitemporal C- and L-Band Polarimetric Signatures of Crops. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 37, Nr. 5, 2413-2429.
- Smith GM, Milton EJ** (1999) The use of the Empirical Line Method to calibrate remotely sensed data to reflectance, *Int. J. of Rem. Sens.* Vol. 20, No. 13, 2653-2662.
- Sofko G, Sloboshan J, McKibben M, Koehler J, Brisco B** (1989) Variation of Microwave Cross-Section of Wheat during the Initial Hours of a Rainfall, *IGARSS / 12<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, BC, July 10 – 14*, pp. 1191-1194.
- Stadtbäumer B** (1988) Möglichkeiten der Beurteilung wachsender Weizenbestände mit Methoden der Luftbildgestützten Fernerkundung und digitalen Bildverarbeitung mit dem Ziel einer schlagspezifischen Beratung. *Dissertation an der Friedrich-Wilhelm-Universität zu Bonn*.
- Staenz K, Gauthier RP, Williams DJ, Teillet PM** (1995) The behavior of the anisotropic reflectance of a pecan orchard derived from multiview and multiscale imaging spectrometer data, *Remote Sens. Environ.*, 52, 122-136.
- Steingießer R** (1997) Erfassung der frischen und trockenen Biomasse von Wintergerste und Mais in verschiedenen Regionen Europas anhand multitemporaler, multifrequenter und polarimetrischer Radardaten. *Dissertation an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn*.
- Steingießer R, Davidson M, Kühbauch W** (1999) Lesbarkeit von Radarsignaturen in der landwirtschaftlichen Fernerkundung. In: *Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, KTBL Arbeitspapier 264*, 118-122.
- Steingieser R, Kühbauch W** (1998) Measurement of fresh and dry biomass and estimation of fresh biomass of winter barley in various regions of Europe with a satellite-borne radar sensor, *Journal of Agronomy and Crop science – Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau*, 181 (3), 145-152.
- Stoyan D, Stoyan H, Jansen U** (1997) *Umweltstatistik – Statistische Verarbeitung und Analyse von Umweltdaten*, Stuttgart, Teubner 1997, 348 p., ISBN 3-8154-3526-9.
- Su Z, Troch PA, Troch FP** (1997) Remote Sensing of bare soil moisture using EMAC/ESAR data. *Int. Journal of Remote Sensing*, Vol.18, No. 10, 2105-2124.
- Taconet O, Benallegue M, Vidal-Madjar D, Prévot L, Dechambre M, Normand M** (1994) Estimation of soil and crop parameters for wheat from airborne radar backscattering data in C and X bands. *Remote Sensing of Environment*, 50, pp. 287-294.
- Taylor JC, Wood GA, Thomas G** (1997) Mapping yield Potential with remote sensing. In *Proceedings of 1<sup>st</sup> European Conference on Precision Agriculture*, pp 713-720. Ed. JV Stafford. SCI:London.

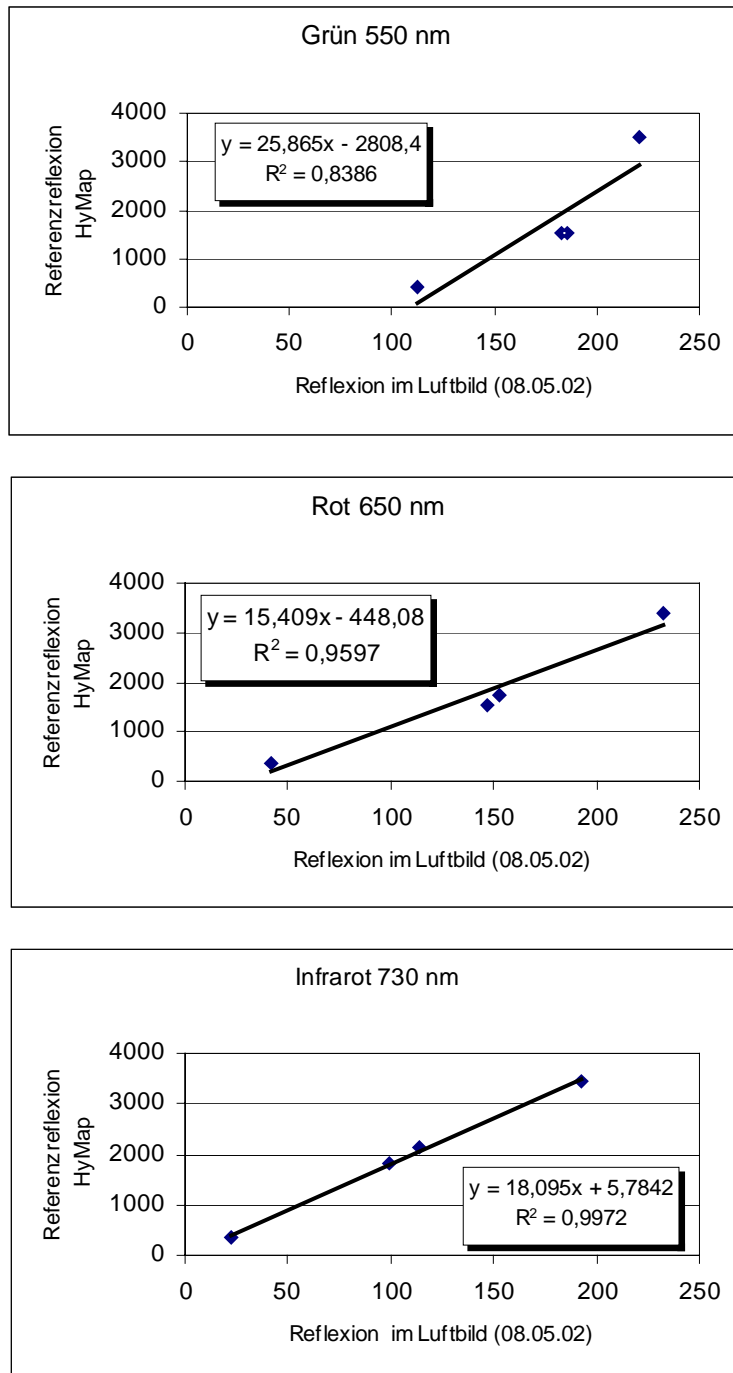
- Taylor JC, Wood GA, Welsh JP, Knight S** (2000) Exploring management strategies for precision farming of cereals assisted by remote sensing. *Aspects of Applied Biology* 60, Remote Sensing in agriculture, pp. 53-60.
- Touré A, Thompson KP, Edwards G, Brown RJ, Brisco BG** (1994) Adaption of the MIMICS backscattering model to the agricultural context – Wheat and canola at L and C bands, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 32, pp. 47-61.
- Trimble** (2000) *Mapping Systems*, General Reference, Sunnyvale, USA.
- Tucker CJ** (1979) Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 8, No. 2, pp 127-150.
- Ulaby FT** (1992) Modeling Radar Backscatter from Vegetation. Short Course Notes. DLR, Oberpfaffenhofen, 15-16 December 1992.
- Ulaby FT** (1998) SAR Biophysical Retrievals: Lessons learned and Challenges to Overcome. Proceedings of the 2. International Workshop on Retrieval of Bio- and Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications, ESTEC, Noordwijk, pp. 19-25.
- Ulaby FT, Bush TF** (1976) Monitoring Wheat Growth with Radar, *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, Vol. 42, pp. 557-568.
- Ulaby FT, Allen CT, Eger G, Kanemasu E** (1984) Relating the Microwave Backscattering Coefficient to Leaf Area Index. *Remote Sensing of Environment* Vol. 14, 113-133.
- Ulaby FT, Bare JE** (1979) Look-direction modulation function of the radar backscattering coefficient of agricultural fields. *Photogr. Eng. and Remote Sensing*, Vol. 45, Nr. 11, 1495-1509.
- Ulaby FT, Dubois PC, van Zyl J** (1996) Radar Mapping of Surface Soil Moisture, *Journal of Hydrology*, 184, pp. 57-84.
- Ulaby FT, Elachi M** (1990) *Radar Polarimetry for Geoscience Application*, Artech House, MA.
- Ulaby FT, Held D, Dobson MC, McDonald MC, Senior TB** (1987) Relating Polarization Phase Difference of SAR Signals to Scene Properties, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-25(1), pp. 83-91.
- Ulaby FT, Moore R, Fung A** (1986) *Microwave remote sensing. Active and passive. Vol. III: From theory to applications*, Artech House.
- Ustin SL, Smith MO, Jacquemond S, Verstraete M, Govaerts Y** (1999) *Geobotany: Vegetation Mapping for Earth Sciences*. In Rencz AN (ed.) 1999: *Remote Sensing for Earth Sciences, Manual of remote sensing, Third edition* Vol. 3, New York: John Wiley & Sons, pp. 189-249, ISBN 0-471-29405-5.
- van der Sanden JJ, Budkewitsch P, Landry R, Lukowski TI, Manore MJ, Mc Nairn H, Pultz TJ, Vachon PW** (2000) Application Potenzial of Planned SAR Satellites - a Preview; 11th Conference on Astronautics (ASTRO-2000), Ottawa, November 6-9, 2000.
- VDLUFA** (1991) *Methodenhandbuch, Band I, Die Untersuchung von Böden*, 4. Aufl., 1991, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- von Poncét F, Tapkenhinrichs M, Hannemann J, Schmidt R, Prietzsch C, Bork H-R** (1995) Methodenentwicklung zur Nutzung von Satelliten-SAR-Daten für die Kartierung und Erfassung von Parametern und Phänomenen des Bodenwasserhaushaltes. ZALF-Bericht Nr. 17, ISSN 0943-7266.
- Wanjura DF, Hatfield JL** (1987) Sensitivity of spectral vegetative Indizes to crop biomass, *Trans ASAE* 30:810-816.
- Wegmüller U** (1993) Signature research for crop classification by active and passive microwaves, *Int. Journal of Remote Sensing*, Vol. 14, No. 5, 871-883.
- Weimann A** (1996) *Bestimmung der Bodenfeuchte mittels aktiver Mikrowellensensoren*. Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften, Freie Universität Berlin.
- Wiegand CL, Maas SL, Aase JK, Hatfield JL, Pinter PJ Jr., Jackson RD, Kanemasu ET, Lapitan RL** (1992) Multisite analyses of spectral-biophysical data for wheat. IN: *Remote sensing of environment* 42, pp. 1-21.
- Wiltshire J, Clark WS, Riding A, Steven M, Holmes G, Moore M** (2002) Spectral Reflectance as a Basis for in-field Sensing of Crop Canopies for Precision Husbandry of Winter Wheat – The SPARTAN Project. Home-Grown Cereals Authority (HGCA), Project Report No. 288 [online] zu finden in <<http://www.hgca.com/ftpaccess/docs/projectreports/report288.pdf>> [zitiert am 27.03.2003].

**Wu LK, Moore RK, Zoughi R** (1985) Sources of Scattering from Vegetation Canopies at 10 GHz, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-23, No. 5, pp. 737-745.

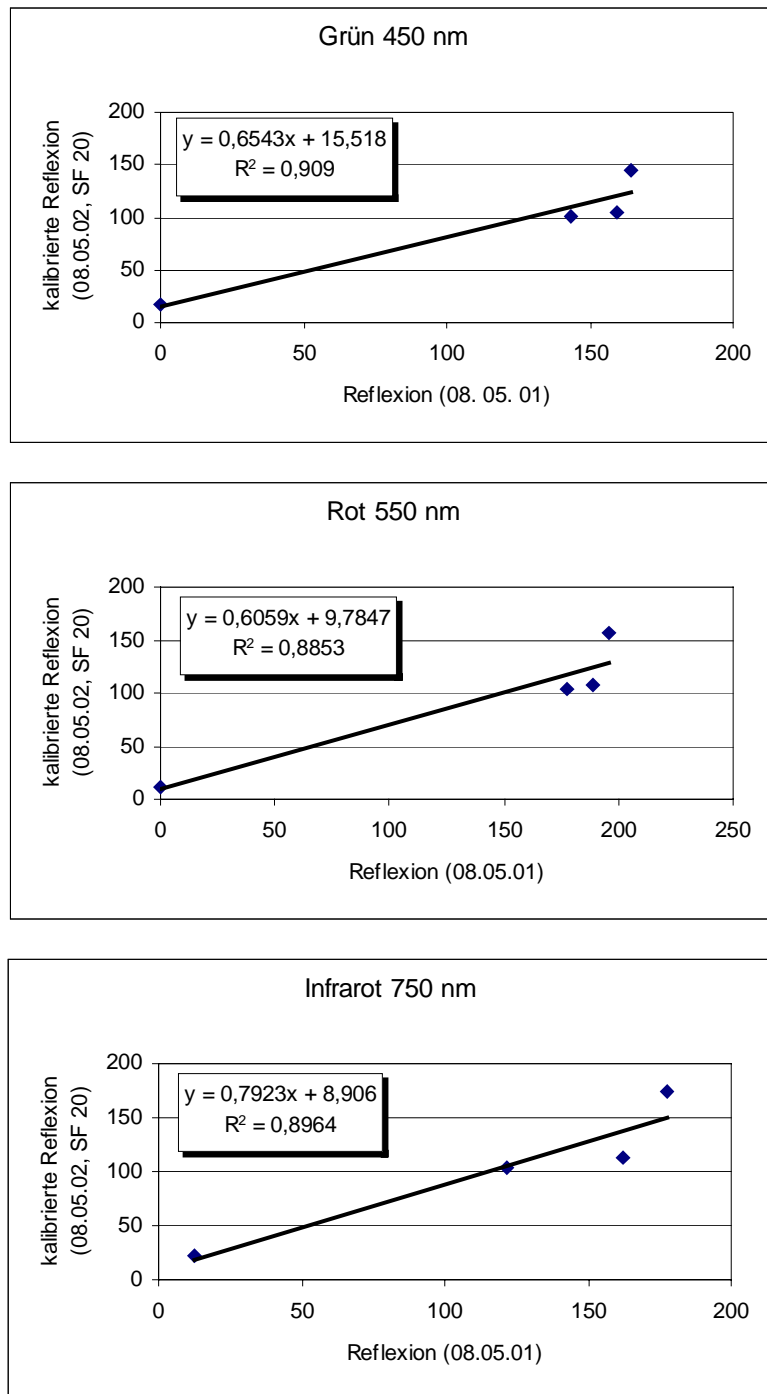
**Zimmermann G** (1998) Getreidebau, IN: Die Landwirtschaft, Band I, Pflanzliche Erzeugung, 11.Auflage, BLV-Verlagsgesellschaft

.

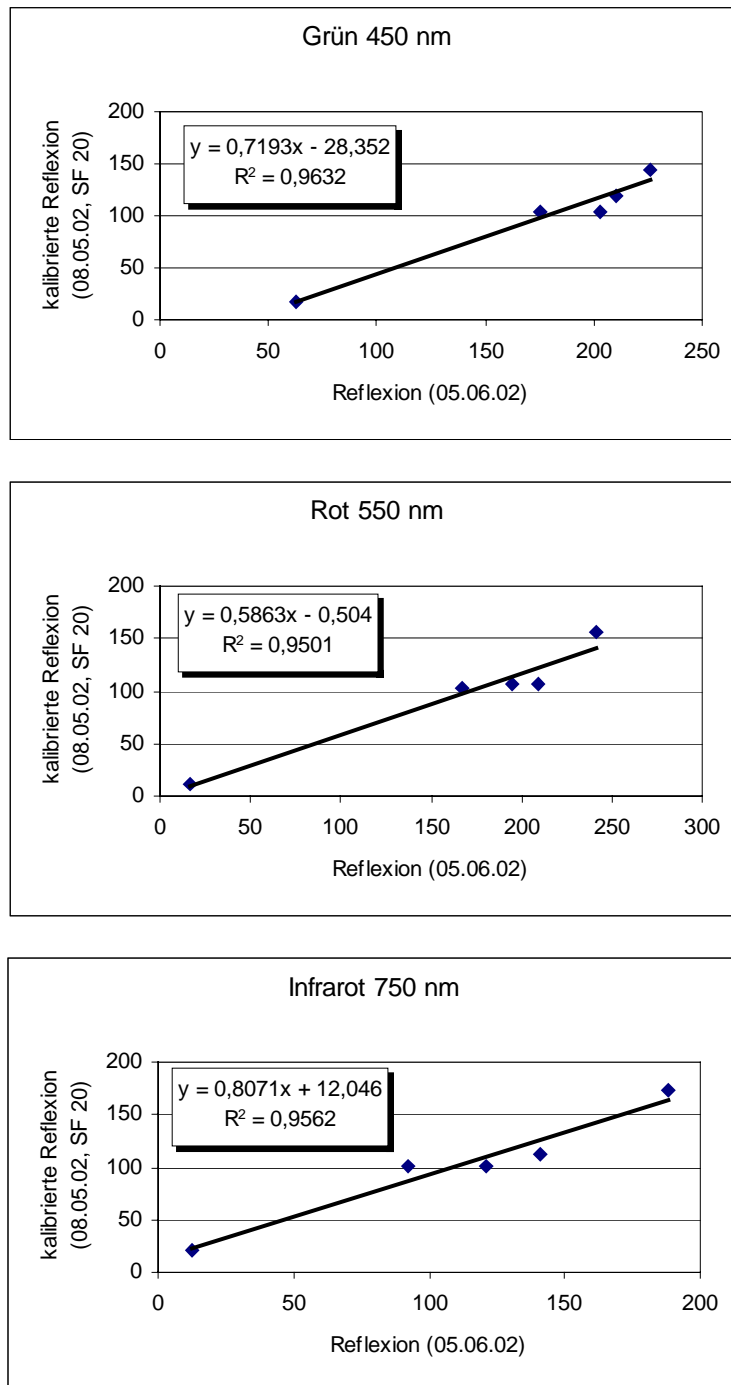
## 8 Anhang



**Abb. A-1a:** Ergebnisse der Kalibrierung nach der Empirical Line Methode. Regressionsgeraden für die Beziehung zwischen Reflexion der Referenzflächen der HyMap<sup>®</sup>-Aufnahme vom 06.05.1999 und des Luftbildes vom 08.05.2002 (Reflexionswerte der HyMap<sup>®</sup>-Daten sind mit Faktor 100 skaliert).



**Abb. A-1b:** Ergebnisse der Ko-Kalibrierung nach der Empirical Line Methode. Regressionsgeraden für die Beziehung zwischen Reflexion der Referenzflächen im Luftbild vom 08.05.2001 und des kalibrierten Luftbildes vom 08.05.2002 (SF: Skalierungsfaktor).



**Abb. A-1c:** Ergebnisse der Ko-Kalibrierung nach der Empirical Line Methode. Regressionsgeraden für die Beziehung zwischen Reflexion der Referenzflächen im Luftbild vom 05.06.2002 und des kalibrierten Luftbildes vom 08.05.2002 (SF: Skalierungsfaktor).



**Tab. A-1a:** Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 10.2 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrain am 08. Mai 2001.

Probe	FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	Gruppenzuordnung		
			Cluster aus FM <sub>v</sub> + Halme	Cluster aus Halmen	Cluster nach $\sigma$ der Halme*
N15	2318	752	1	1	2
N18	1851	704	2	1	1
N23	1632	648	2	1	1
N16	2008	792	1	2	2
N19	2412	828	1	2	2
N25	2086	804	1	2	2
N20	2761	1048	3	3	3
N21	2415	964	3	3	3
N22	2350	936	3	3	3
N24	2658	896	3	3	2
N28	1812	924	1	3	3

FM<sub>v</sub>: frische Biomasse; Halme: Bestandesdichte; grau unterlegt ist die in der Arbeit verwendete Gruppierung: Gruppe 1: gering, Gruppe 2: mittel, Gruppe 3: hoch;  $\sigma$ : Standardabweichung (3 Gruppen: 1:  $x - 0,5 \sigma$ , 2:  $x \pm 0,5 \sigma$  und 3:  $x + 0,5 \sigma$ , wobei  $x$ = arithmetisches Mittel)

**Tab. A-1b:** Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 10.3 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrain am 08. Mai 2001.

Probe	FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	Gruppenzuordnung		
			Cluster aus FM <sub>v</sub> + Halme	Cluster aus Halmen	Cluster nach $\sigma$ der Halme*
N29	1518	620	1	1	1
N30	1514	608	1	1	1
N33	1545	640	1	1	1
N40	1566	612	1	1	1
N41	816	476	3	1	1
BV2	1259	568	1	1	1
N31	1395	672	1	2	2
N32	1535	676	1	2	2
N38	1750	744	2	2	2
N42	1695	792	2	2	3
AV1	2062	768	2	2	2
BV3	1927	696	2	2	2
CV1	1597	696	1	2	2
N34	1958	916	2	3	3
N36	1976	908	2	3	3
N37	1925	936	2	3	3

FM<sub>v</sub>: frische Biomasse; Halme: Bestandesdichte; grau unterlegt ist die in der Arbeit verwendete Gruppierung: Gruppe 1: gering, Gruppe 2: mittel, Gruppe 3: hoch;  $\sigma$ : Standardabweichung (3 Gruppen: 1:  $x - 0,5 \sigma$ , 2:  $x \pm 0,5 \sigma$  und 3:  $x + 0,5 \sigma$ , wobei  $x$ = arithmetisches Mittel)

**Tab. A-1c:** Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 10.2 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrain am 09. Juni 2001

Probe	FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	Gruppenzuordnung		
			Cluster aus FM <sub>v</sub> + Halme	Cluster aus Halmen	Cluster nach $\sigma$ der Halme*
N15	4775	616	1	1	1
N16	4053	580	1	1	1
N17	4211	596	1	1	1
N18	3737	492	1	1	1
N19	6577	808	2	2	3
N20	6418	852	2	2	3
N21	6511	788	2	2	3
N22	6843	908	2	2	3
N28	6336	836	2	2	3
N23	5346	680	3	3	2
N24	5320	672	3	3	2
N25	5143	708	3	3	2
N27	5353	684	3	3	2

FM<sub>v</sub>: frische Biomasse; Halme: Bestandesdichte; grau unterlegt ist die in der Arbeit verwendete Gruppierung: Gruppe 1: gering, Gruppe 2: hoch, Gruppe 3: mittel;  $\sigma$ : Standardabweichung (3 Gruppen: 1:  $< x - 0,5 \sigma$ , 2:  $> x + 0,5 \sigma$  und 3:  $x \pm 0,5 \sigma$ , wobei  $x$ = arithmetisches Mittel)

**Tab. A-1d:** Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 10.3 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrain am 09. Juni 2001.

Probe	FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	Gruppenzuordnung		
			Cluster aus FM <sub>v</sub> + Halme	Cluster aus Halmen	Cluster nach $\sigma$ der Halme*
N29	5057	604	1	1	2
N30	4731	616	1	1	2
N36	5492	596	1	1	2
N40	5853	576	1	1	2
N42	4423	588	1	1	2
N47	5607	632	1	1	2
N48	4818	584	1	1	2
N31	4534	548	1	2	1
N33	4119	476	2	2	1
N34	5710	544	1	2	1
N44	4066	480	2	2	1
N46	5359	540	1	2	1
N49	4937	524	1	2	1
N35	6114	688	3	3	3
N37	6106	688	3	3	3
N38	6232	772	3	3	3
N39	7747	744	3	3	3
N45	5978	688	3	3	3

FM<sub>v</sub>: frische Biomasse; Halme: Bestandesdichte; grau unterlegt ist die in der Arbeit verwendete Gruppierung: Gruppe 1: gering, Gruppe 2: hoch, Gruppe 3: mittel;  $\sigma$ : Standardabweichung (3 Gruppen: 1:  $< x - 0,5 \sigma$ , 2:  $> x + 0,5 \sigma$  und 3:  $x \pm 0,5 \sigma$ , wobei  $x$ = arithmetisches Mittel)

**Tab. A-2a:** Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 10.3 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrain am 07. April 2002.

Probe	FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	Gruppenzuordnung		
			Cluster aus FM <sub>v</sub> + Halme	Cluster aus Halmen	Cluster nach $\sigma$ der Halme*
N1	65,7	124	1	1	2
N2	58,2	128	1	1	2
N3	77,8	128	1	1	2
N4	104,9	140	2	1	3
N5	57,0	120	1	1	1
N7	93,4	124	2	1	2
N8	59,6	136	1	1	2
N9	104,1	124	2	1	2
N10	54,4	120	1	1	1
N11	97,4	136	2	1	2
N13	71,6	140	1	1	3
N16	122,7	128	2	1	2
N17	71,4	136	1	1	2
N18	82,6	136	1	1	2
N19	112,1	120	2	1	1
N20	110,9	136	2	1	2
N21	84,3	140	1	1	3
N22	84,4	128	1	1	2
N23	80,8	132	1	1	2
N24	130,2	124	2	1	2
N25	97,7	120	2	1	1
N6	84,9	104	2	2	1
N15	99,3	88	2	2	1
N12	155,3	160	3	3	3
N14	135,2	160	3	3	3
N26	135,4	152	3	3	3

FM<sub>v</sub>: frische Biomasse; Halme: Bestandesdichte; grau unterlegt ist die in der Arbeit verwendete Gruppierung: Gruppe 1: mittel, Gruppe 2: gering, Gruppe 3: hoch;  $\sigma$ : Standardabweichung (3 Gruppen: 1:  $x \pm 0,5 \sigma$ , 2:  $< x - 0,5 \sigma$  und 3:  $> x + 0,5 \sigma$ , wobei  $x$ = arithmetisches Mittel)

**Tab A-2b:** Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 10.3 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrain am 08. Mai 2002.

Probe	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	Gruppenzuordnung		
			Cluster aus FM <sub>V</sub> + Halme	Cluster aus Halmen	Cluster nach $\sigma$ der Halme*
N26	1684	868	1	1	2
N25	1640	808	1	1	2
N24	1732	852	1	1	2
N20	1848	936	1	1	3
N19	1324	904	1	1	3
N17	1184	800	2	1	2
N16	1440	972	1	1	3
N8	1520	900	1	1	3
N7	1828	896	1	1	3
N6	1528	844	1	1	2
N4	1496	872	1	1	2
N2	1384	828	1	1	2
N23	1196	716	2	2	2
N22	1128	568	2	2	1
N21	1060	560	2	2	1
N18	1184	720	2	2	2
N15	952	592	2	2	1
N13	1088	556	2	2	1
N12	1400	620	2	2	1
N11	1128	656	2	2	1
N10	884	608	2	2	1
N9	1156	620	2	2	1
N5	1000	636	2	2	1
N3	1752	740	1	2	2
N1	1484	712	2	2	2
N14	2152	1488	3	3	3

FM<sub>V</sub>: frische Biomasse; Halme: Bestandesdichte; grau unterlegt ist die in der Arbeit verwendete Gruppierung: Gruppe 1: mittel, Gruppe 2: gering, Gruppe 3: hoch;  $\sigma$ : Standardabweichung (3 Gruppen: 1:  $x \pm 0,5 \sigma$ , 2:  $< x - 0,5 \sigma$  und 3:  $> x + 0,5 \sigma$ , wobei  $x$  = arithmetisches Mittel)

**Tab. A-2c:** Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 10.3 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrain am 05. Juni 2002.

Probe	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	Gruppenzuordnung		
			Cluster aus FM <sub>V</sub> + Halme	Cluster aus Halmen	Cluster nach $\sigma$ der Halme*
N26	5084	708	1	1	3
N20	4424	704	1	1	3
N19	5200	828	1	1	3
N14	5576	836	1	1	3
N25	4064	544	2	2	2
N24	4472	572	1	2	2
N18	3796	616	2	2	2
N17	3972	644	2	2	3
N15	3804	592	2	2	2
N7	4584	640	1	2	3
N6	4680	596	1	2	2
N3	4520	596	1	2	2
N22	3608	452	2	3	1
N21	3840	476	2	3	1
N13	3840	512	2	3	2
N12	3780	472	2	3	1
N11	4000	504	2	3	2
N10	2768	392	3	3	1
N9	2928	376	3	3	1
N8	2792	372	3	3	1
N5	3200	452	2	3	1
N4	3956	496	2	3	2
N2	4028	492	2	3	1
N1	4188	496	2	3	2

FM<sub>V</sub>: frische Biomasse; Halme: Bestandesdichte; grau unterlegt ist die in der Arbeit verwendete Gruppierung: Gruppe 1: hoch, Gruppe 2: mittel, Gruppe 3: gering;  $\sigma$ : Standardabweichung (3 Gruppen: 1:  $> x + 0,5 \sigma$ , 2:  $x \pm 0,5 \sigma$  und 3:  $< x - 0,5 \sigma$ , wobei  $x$ = arithmetisches Mittel)

**Tab. A-2d:** Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 3.2 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrain am 07. April 2002.

Probe	FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	Gruppenzuordnung		
			Cluster aus FM <sub>v</sub> + Halme	Cluster aus Halmen	Cluster nach $\sigma$ der Halme*
N30	136,8	140	1	1	1
N40	79,5	140	1	1	1
N43	163,8	160	1	1	1
N49	128,6	160	1	1	1
N31	135,0	176	1	2	2
N41	130,5	176	1	2	2
N48	182,3	184	2	2	2
N50	192,8	176	2	2	2
N51	219,8	184	2	2	2
N32	172,9	192	2	3	3
N42	180,6	196	2	3	3
N47	117,7	212	3	3	3

FM<sub>v</sub>: frische Biomasse; Halme: Bestandesdichte; grau unterlegt ist die in der Arbeit verwendete Gruppierung: Gruppe 1: gering, Gruppe 2: mittel, Gruppe 3: hoch;  $\sigma$ : Standardabweichung (3 Gruppen: 1:  $< x - 0,5 \sigma$ , 2:  $x \pm 0,5 \sigma$  und 3:  $> x + 0,5 \sigma$ , wobei  $x$ = arithmetisches Mittel)

**Tab. A-2e:** Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 3.2 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrain am 08. Mai 2002.

Probe	FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	Gruppenzuordnung		
			Cluster aus FM <sub>v</sub> + Halme	Cluster aus Halmen	Cluster nach $\sigma$ der Halme*
N47	1560	600	1	1	1
N44	1168	488	2	1	1
N43	1740	596	1	1	1
N42	1688	648	1	1	2
N38	1760	676	1	1	2
N37	1924	660	1	1	2
N35	1560	640	1	1	1
N32	1532	596	1	1	1
N46	1652	780	1	2	3
N45	1828	724	1	2	2
N41	1876	724	1	2	2
N40	2168	776	3	2	3
N36	1700	716	1	2	2
N34	1780	740	1	2	2
N33	1788	708	1	2	2
N39	2272	852	3	3	3
N31	2080	860	3	3	3

FM<sub>v</sub>: frische Biomasse; Halme: Bestandesdichte; grau unterlegt ist die in der Arbeit verwendete Gruppierung: Gruppe 1: gering, Gruppe 2: mittel, Gruppe 3: hoch;  $\sigma$ : Standardabweichung (3 Gruppen: 1:  $< x - 0,5 \sigma$ , 2:  $x \pm 0,5 \sigma$  und 3:  $> x + 0,5 \sigma$ , wobei  $x$ = arithmetisches Mittel)

**Tab. A-2f:** Ergebnisse der Clusteranalyse: Gruppenzuordnung der einzelnen Stichproben von 3.2 nach verschiedenen Varianten der Clustereinteilung zum Aufnahmeterrain am 05. Juni 2002.

Probe	FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	Gruppenzuordnung		
			Cluster aus FM <sub>v</sub> + Halme	Cluster aus Halmen	Cluster nach $\sigma$ der Halme*
N31	5584	708	1	1	3
N34	5360	692	1	1	2
N35	5176	668	1	1	2
N36	5216	688	1	1	2
N37	5408	704	1	1	3
N41	5332	680	1	1	2
N42	4728	656	3	1	2
N46	4880	692	3	1	2
N47	4284	676	3	1	2
N32	6208	752	1	2	3
N40	5680	720	1	2	3
N43	5696	732	1	2	3
N33	4064	528	2	3	1
N38	4856	600	3	3	1
N39	4924	600	3	3	1

FM<sub>v</sub>: frische Biomasse; Halme: Bestandesdichte; grau unterlegt ist die in der Arbeit verwendete Gruppierung: Gruppe 1: mittel, Gruppe 2: hoch, Gruppe 3: gering;  $\sigma$ : Standardabweichung (3 Gruppen: 1:  $x \pm 0,5 \sigma$ , 2:  $> x + 0,5 \sigma$  und 3:  $< x - 0,5 \sigma$ , wobei  $x$ = arithmetisches Mittel)

**Tab. A-3a:** Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 10.3 in Neetzow am 08.05.2001 (Entwicklungsstadium: BBCH 32).

10.3 Stichprobe	Boden			Vegetation					
	FM [g]	TM [g]	WG [Vol-%]	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	WG <sub>V</sub> [%]	Höhe [cm]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	BG [%]
N29	301	287	8,5	1518	307	79,8	40	620	67
N30	318	300	9,4	1513	248	83,6	42	608	74
N31	287	276	7,2	1395	255	81,7	39	672	70
N32	303	287	9,7	1535	276	82,0	40	676	69
N33	304	278	15,2	1545	302	80,5	43	640	80
N34	321	293	15,2	1958	343	82,5	45	916	75
N35	306	283	13,2	2438	409	83,2	45	1388	89
N36	297	273	14,9	1976	336	83,0	40	908	80
N37	287	264	15,3	1925	311	83,9	41	936	88
N38	294	272	13,9	1750	298	83,0	43	744	79
N39	276	262	10,4	1423	268	81,1	43	668	72
N40	283	267	10,9	1566	286	81,7	43	612	74
N41	308	292	9,6	816	139	83,0	40	476	63
N42	306	291	8,4	1695	383	77,4	40	792	80
AV1	289	268	13,3	2062	335	83,8	40	768	84
BV2	279	267	8,5	1259	240	81,0	40	568	88
BV3	303	287	9,8	1927	360	81,3	43	696	72
CV1	290	277	8,7	1597	289	81,9	40	696	72

WG: Wassergehalt, BG: Bedeckungsgrad,

**Tab. A-3b:** Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 10.2 in Neetzow am 08.05.2001 (Entwicklungsstadium: BBCH 32).

10.2 Stichprobe	Boden			Vegetation					
	FM [g]	TM [g]	WG [Vol-%]	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	WG <sub>V</sub> [%]	Höhe [cm]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	BG [%]
N15	285	271	9,6	2317	409	82,3	47	752	79
N16	282	269	9,0	2008	343	82,9	44	792	81
N17	299	280	11,2	3003	518	82,8	48	1016	80
N18	278	263	10,3	1851	340	81,6	43	704	82
N19	319	291	14,8	2411	423	82,4	45	828	81
N20	332	302	15,6	2761	455	83,5	46	1048	80
N21	287	264	15,7	2415	421	82,6	43	964	80
N22	331	307	12,6	2350	405	82,8	43	936	83
N23	326	301	13,0	1632	296	81,9	48	648	71
N24	330	306	11,9	2657	476	82,1	48	896	80
N25	302	285	10,5	2086	359	82,8	50	804	74
N26	287	269	11,4	2371	460	80,6	49	852	72
N27	308	289	10,6	1773	316	82,2	44	724	81
N28	296	280	10,1	1812	299	83,5	44	924	75

WG: Wassergehalt, BG: Bedeckungsgrad,



**Tab. A-3c:** Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 10.3 in Neetzow am 09.06.2001 (Entwicklungsstadium: BBCH 59-61).

10.3 Stichprobe	Boden			Vegetation					
	FM [g]	TM [g]	WG [Vol-%]	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	WG <sub>V</sub> [%]	Höhe [cm]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	BG [%]
N29	314	289	14,2	5057	1089	78,5	70	604	84
N30	304	293	7,1	4731	1072	77,3	77	616	91
N31	276	266	7,3	4534	1092	75,9	76	548	91
N33	294	284	5,8	4119	952	76,9	82	476	84
N34	286	274	7,6	5710	1230	78,5	83	544	92
N35	295	281	8,7	6114	1248	79,6	82	688	91
N36	294	277	10,3	5492	1088	80,2	82	596	90
N37	282	260	14,7	6106	1148	81,2	76	688	91
N38	270	245	14,3	6232	1272	79,6	78	772	90
N39	274	247	15,5	7747	1407	81,8	86	744	91
N40	251	231	13,2	5853	1208	79,4	76	576	84
N41	307	292	8,9	5972	1325	77,8	92	856	92
N42	279	267	8,1	4423	1013	77,1	76	588	84
N44	294	283	7,0	4066	933	77,1	81	480	83
N45	296	284	7,2	5978	1292	78,4	82	688	92
N46	286	275	7,5	5359	1055	80,3	86	540	91
N47	273	264	6,9	5607	1240	77,9	75	632	93
N48	300	290	6,5	4818	1024	78,7	82	584	90
N49	280	269	7,6	4937	1011	79,5	83	524	91

WG: Wassergehalt, BG: Bedeckungsgrad,

**Tab. A-3d:** Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 10.2 in Neetzow am 09.06.2001 (Entwicklungsstadium: BBCH 59-61).

10.2 Stichprobe	Boden			Vegetation					
	FM [g]	TM [g]	WG [Vol-%]	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	WG <sub>V</sub> [%]	Höhe [cm]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	BG [%]
N15	282	270	7,9	4775	1034	78,3	82	616	91
N16	284	274	6,5	4053	963	76,2	80	580	88
N17	280	271	6,6	4211	1001	76,2	84	596	88
N18	274	266	5,8	3737	895	76,1	80	492	81
N19	284	263	13,6	6577	1238	81,2	90	808	88
N20	299	278	13,8	6418	1193	81,4	86	852	88
N21	318	291	15,0	6511	1255	80,7	84	788	81
N22	291	268	14,8	6843	1298	81,0	88	908	87
N23	301	276	14,7	5346	1024	80,8	90	680	90
N24	311	291	11,3	5320	1183	77,8	84	672	92
N25	308	294	8,1	5143	1170	77,3	86	708	83
N26	277	264	9,0	5792	1382	76,1	86	776	90
N27	272	260	9,5	5353	1108	79,3	84	684	82
N28	300	288	7,5	6336	1387	78,1	84	836	84

WG: Wassergehalt, BG: Bedeckungsgrad,

**Tab. A-4a:** Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 10.3 in Neetzow am 07.04.2002 (Entwicklungsstadium: BBCH 22-25).

10.3 Stichprobe	Boden			Vegetation					
	FM [g]	TM [g]	WG [Vol-%]	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	WG <sub>V</sub> [%]	Höhe [cm]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	BG [%]
N1	152	139	8,7	65,7	23,7	63,9	11	124	32
N2	168	154	8,5	58,2	23,3	59,9	11	128	25
N3	140	131	5,9	77,8	28,1	63,8	11	128	21
N4	137	127	7,6	105,	33,6	68,0	11	140	42
N5	139	129	7,4	57,0	20,4	64,2	11	120	20
N6	167	154	8,1	84,9	29,4	65,4	11	104	41
N7	144	135	6,3	93,4	31,4	66,4	10	124	38
N8	157	145	7,3	59,6	20,8	65,1	10	136	19
N9	149	142	4,5	104	38,4	63,1	11	124	36
N10	171	155	8,9	54,4	17,6	67,6	10	120	11
N11	170	150	11,8	97,4	37,5	61,5	11	136	14
N12	163	146	10,2	155	53,4	65,6	12	160	37
N13	154	142	7,6	71,6	22,7	68,3	11	140	15
N14	147	128	12,9	135	44,0	67,5	13	160	40
N15	163	143	12,1	99,3	36,4	63,4	11	88	32
N16	156	141	9,7	123	48,8	60,2	11	128	35
N17	161	141	12,6	71,4	27,9	61,0	11	136	15
N18	145	129	11,6	82,6	32,0	61,2	11	136	32
N19	148	130	12,4	112	46,9	58,2	11	120	42
N20	161	149	7,8	111	37,0	66,6	12	136	41
N21	155	144	6,8	84,3	28,2	66,6	12	140	33
N22	158	147	6,7	84,4	29,1	65,6	11	128	30
N23	142	131	8,4	80,8	26,7	67,0	11	132	28
N24	134	124	7,4	130	45,8	64,8	12	124	44
N25	145	134	7,3	97,7	28,6	70,7	11	120	33
N26	148	137	7,5	135	43,4	68,0	12	152	41

WG: Wassergehalt, BG: Bedeckungsgrad,

**Tab. A-4b:** Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 10.3 in Neetzow am 08.05.2002 (Entwicklungsstadium: BBCH 31-32).

10.3 Stichprobe	Boden			Vegetation					
	FM [g]	TM [g]	WG [Vol-%]	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	WG <sub>V</sub> [%]	Höhe [cm]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	BG [%]
N1	159	136	14,2	1484	190	87,2	43	712	76
N2	177	155	12,3	1384	171	87,6	39	828	65
N3	144	123	14,2	1752	223	87,3	40	740	70
N4	176	153	13,0	1496	191	87,2	38	872	72
N5	178	154	13,5	1000	131	86,9	39	636	63
N6	177	156	12,3	1528	203	86,7	39	844	74
N7	171	149	12,9	1828	235	87,1	40	896	71
N8	190	167	12,2	1520	197	87,0	38	900	74
N9	172	150	12,8	1156	158	86,3	37	620	64
N10	177	153	13,6	884	107	87,9	38	608	49
N11	157	138	12,2	1128	145	87,2	39	656	54
N12	146	123	15,5	1400	184	86,9	41	620	78
N13	184	156	15,2	1088	143	86,8	42	556	63
N14	163	131	19,4	2152	265	87,7	39	1488	84
N15	150	120	20,0	952	120	87,4	34	592	66
N16	160	132	17,2	1440	193	86,6	34	972	70
N17	158	130	18,1	1184	159	86,6	35	800	70
N18	162	132	18,4	1184	166	85,9	36	720	69
N19	188	156	17,1	1324	181	86,3	34	904	82
N20	170	148	13,1	1848	246	86,7	41	936	83
N21	170	149	12,5	1060	146	86,3	39	560	65
N22	173	151	12,5	1128	160	85,9	38	568	63
N23	171	148	13,2	1196	150	87,5	36	716	66
N24	181	144	20,0	1732	248	85,7	41	852	83
N25	172	149	13,6	1640	227	86,2	39	808	84
N26	181	155	14,6	1684	233	86,1	42	868	84

WG: Wassergehalt, BG: Bedeckungsgrad,

**Tab. A-4c:** Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 10.3 in Neetzow am 05.06.2002 (Entwicklungsstadium: BBCH 47-61).

10.3 Stichprobe	Boden			Vegetation					
	FM [g]	TM [g]	WG [Vol-%]	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	WG <sub>V</sub> [%]	Höhe [cm]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	BG [%]
N1	138	131	5,54	4188	888	78,8	73	496	82
N2	136	133	2,10	4028	841	79,1	65	492	90
N3	132	130	1,84	4520	865	80,9	74	596	95
N4	137	132	3,64	3956	896	77,4	84	496	89
N5	138	133	3,87	3200	635	80,2	64	452	85
N6	133	125	5,79	4680	949	79,7	77	596	85
N7	133	128	3,32	4584	950	79,3	71	640	91
N8	147	142	3,73	2792	657	76,5	64	372	84
N9	154	146	4,73	2928	724	75,3	63	376	83
N10	150	147	2,28	2768	652	76,4	62	392	84
N11	109	105	3,42	4000	849	78,8	64	504	92
N12	148	139	5,88	3780	835	77,9	70	472	95
N13	133	126	5,38	3840	778	79,8	68	512	93
N14	155	136	12,5	5576	952	82,9	73	836	92
N15	139	126	9,09	3804	820	78,4	68	592	90
N16	163	145	10,6	4776	928	80,6	74	776	91
N17	128	115	10,3	3972	760	80,9	68	644	91
N18	140	126	9,76	3796	791	79,2	67	616	93
N19	160	140	12,4	5200	937	82,0	70	828	90
N20	130	126	3,23	4424	898	79,7	67	704	87
N21	138	134	2,61	3840	888	76,9	66	476	89
N22	148	143	3,72	3608	853	76,3	62	452	89
N24	127	119	6,30	4472	899	79,9	66	572	90
N25	144	136	5,64	4064	761	81,3	65	544	90
N26	156	147	5,91	5084	1020	79,9	66	708	91

WG: Wassergehalt, BG: Bedeckungsgrad,

**Tab. A-4d:** Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 3.2 in Neetzow am 07.04.2002 (Entwicklungsstadium: BBCH 22-25).

3.2 Stichprobe	Boden			Vegetation					
	FM [g]	TM [g]	WG [Vol-%]	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	WG <sub>V</sub> [%]	Höhe [cm]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	BG [%]
N30	130	114	12,6	137	42,6	68,9	11	140	56
N31	142	131	7,8	135	39,4	70,8	10	176	52
N32	126	110	12,7	173	53,9	68,8	10	192	40
N40	173	156	9,4	80	23,8	70,1	11	140	40
N41	161	142	12,3	131	41,5	68,2	11	176	52
N42	152	137	9,7	181	57,2	68,3	12	196	51
N43	159	141	11,3	164	52,0	68,3	12	160	50
N47	144	131	9,3	118	36,9	68,7	10	212	49
N48	158	139	11,8	182	58,5	67,9	10	184	55
N49	143	125	12,5	129	42,0	67,4	10	160	53
N50	140	120	14,6	193	67,0	65,3	10	176	56
N51	119	107	10,0	220	66,4	69,8	10	184	55

WG: Wassergehalt, BG: Bedeckungsgrad,

**Tab. A-4e:** Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 3.2 in Neetzow am 08.05.2002 (Entwicklungsstadium: BBCH 31-33).

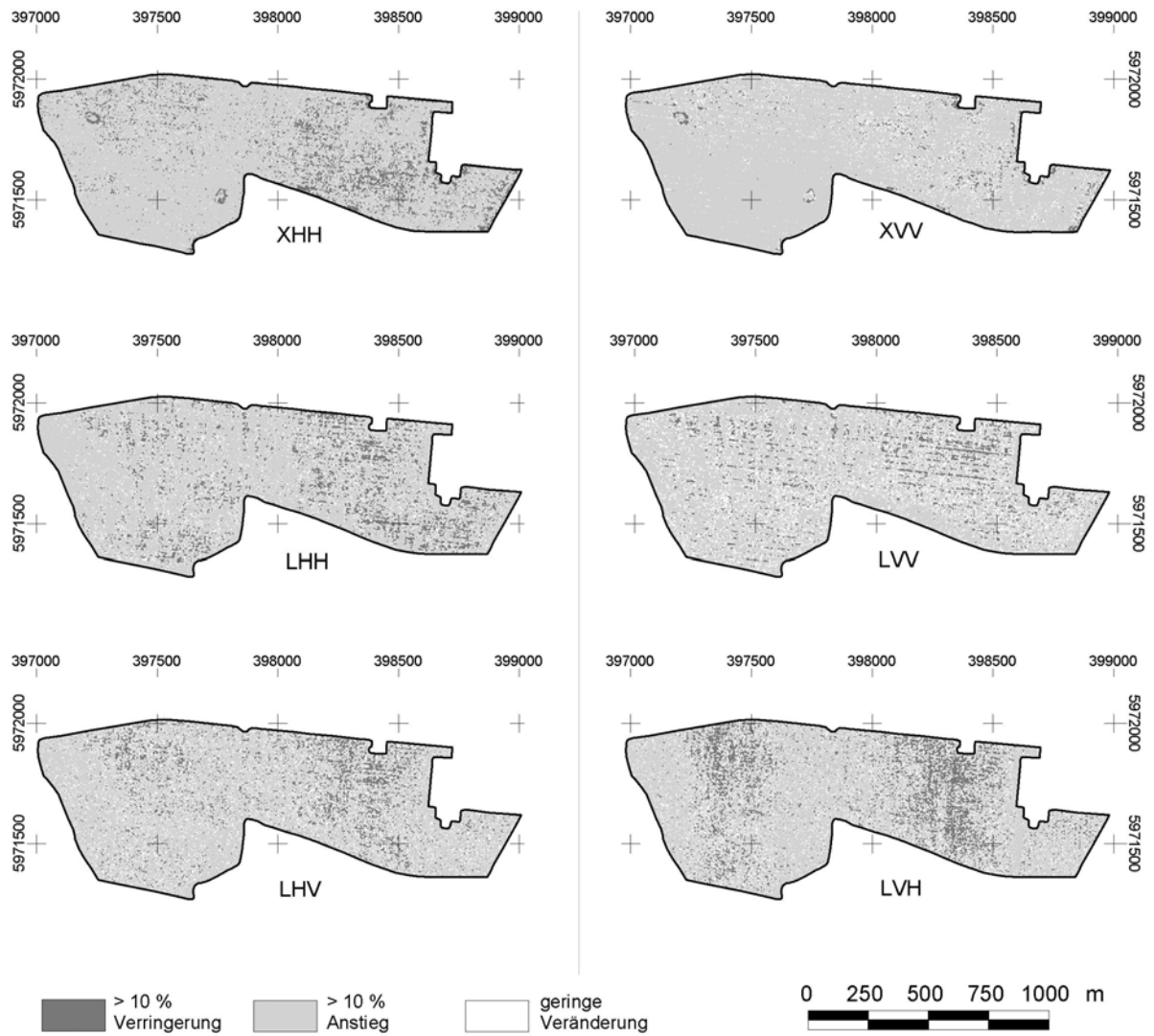
3.2 Stichprobe	Boden			Vegetation					
	FM [g]	TM [g]	WG [Vol-%]	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	WG <sub>V</sub> [%]	Höhe [cm]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	BG [%]
N30	180	152	15,7	1156	177	84,6	37	552	70
N31	178	150	15,3	2080	259	87,5	45	860	85
N32	176	147	16,6	1532	229	85,1	44	596	71
N33	172	142	17,0	1788	243	86,4	45	708	83
N34	159	134	15,7	1780	247	86,1	42	740	84
N35	161	132	18,1	1560	213	86,4	46	640	73
N36	174	146	16,5	1700	246	85,6	43	716	71
N37	165	139	15,8	1924	245	87,3	46	660	84
N38	153	129	15,6	1760	241	86,3	46	676	84
N39	167	137	18,1	2272	309	86,4	49	852	86
N40	175	150	14,7	2168	300	86,2	47	776	71
N41	159	135	15,2	1876	266	85,8	46	724	73
N42	176	149	15,4	1688	250	85,2	43	648	72
N43	178	145	18,8	1740	252	85,5	43	596	75
N44	181	155	14,5	1168	183	84,3	41	488	57
N45	184	152	17,4	1828	257	85,9	43	724	72
N46	173	144	16,8	1652	224	86,4	41	780	74
N47	179	153	14,5	1560	229	85,3	41	600	71

WG: Wassergehalt, BG: Bedeckungsgrad,

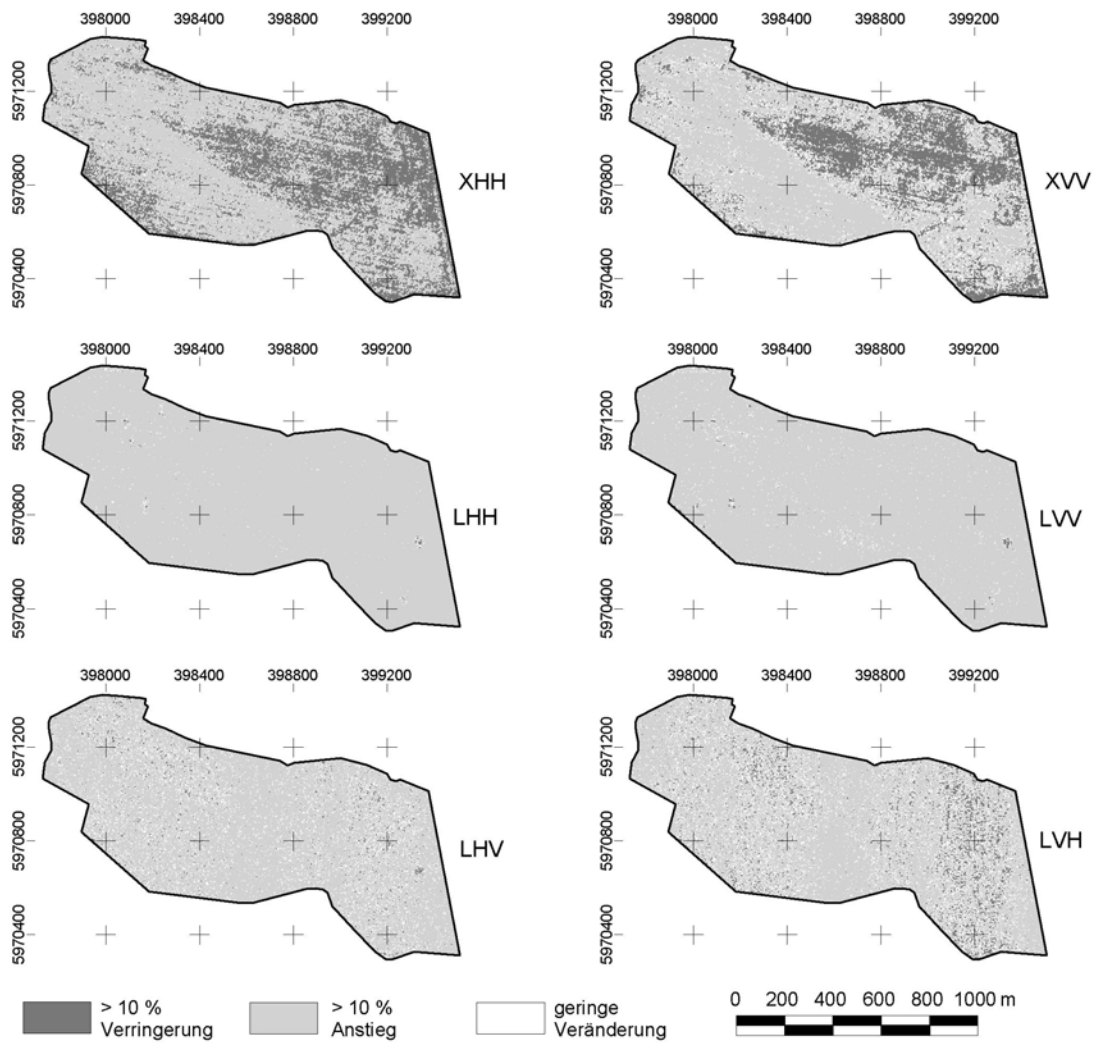
**Tab. A-4f:** Boden und Vegetationsparameter der Stichprobenahme auf Testfläche 3.2 in Neetzow am 05.06.2002 (Entwicklungsstadium: BBCH 55).

3.2 Stichprobe	Boden			Vegetation					
	FM [g]	TM [g]	WG [Vol-%]	FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	WG <sub>V</sub> [%]	Höhe [cm]	Halme [m <sup>-2</sup> ]	BG [%]
N30	137	124	9,5	3308	711	78,5	75	544	84
N31	142	127	11,1	5584	1003	82,0	87	708	90
N32	154	135	12,3	6208	1165	81,2	86	752	88
N33	140	126	10,5	4064	747	81,6	85	528	83
N34	133	119	10,7	5360	1003	81,3	84	692	89
N35	149	132	11,7	5176	1282	75,2	86	668	88
N36	154	138	10,8	5216	1046	80,0	83	688	89
N37	164	148	10,0	5408	970	82,1	91	704	86
N38	136	120	11,3	4856	915	81,1	90	600	85
N39	157	142	9,7	4924	963	80,4	87	600	86
N40	168	151	10,4	5680	1054	81,4	88	720	88
N41	178	159	10,5	5332	1000	81,2	86	680	88
N42	169	147	12,8	4728	959	79,7	85	656	85
N43	146	130	10,7	5696	1082	81,0	85	732	83
N44	150	132	11,9	4688	952	79,7	82	656	82
N45	154	135	12,0	4888	940	80,8	85	632	84
N46	164	147	10,1	4880	970	80,1	84	692	84
N47	180	164	9,1	4284	896	79,1	85	676	84

WG: Wassergehalt, BG: Bedeckungsgrad,

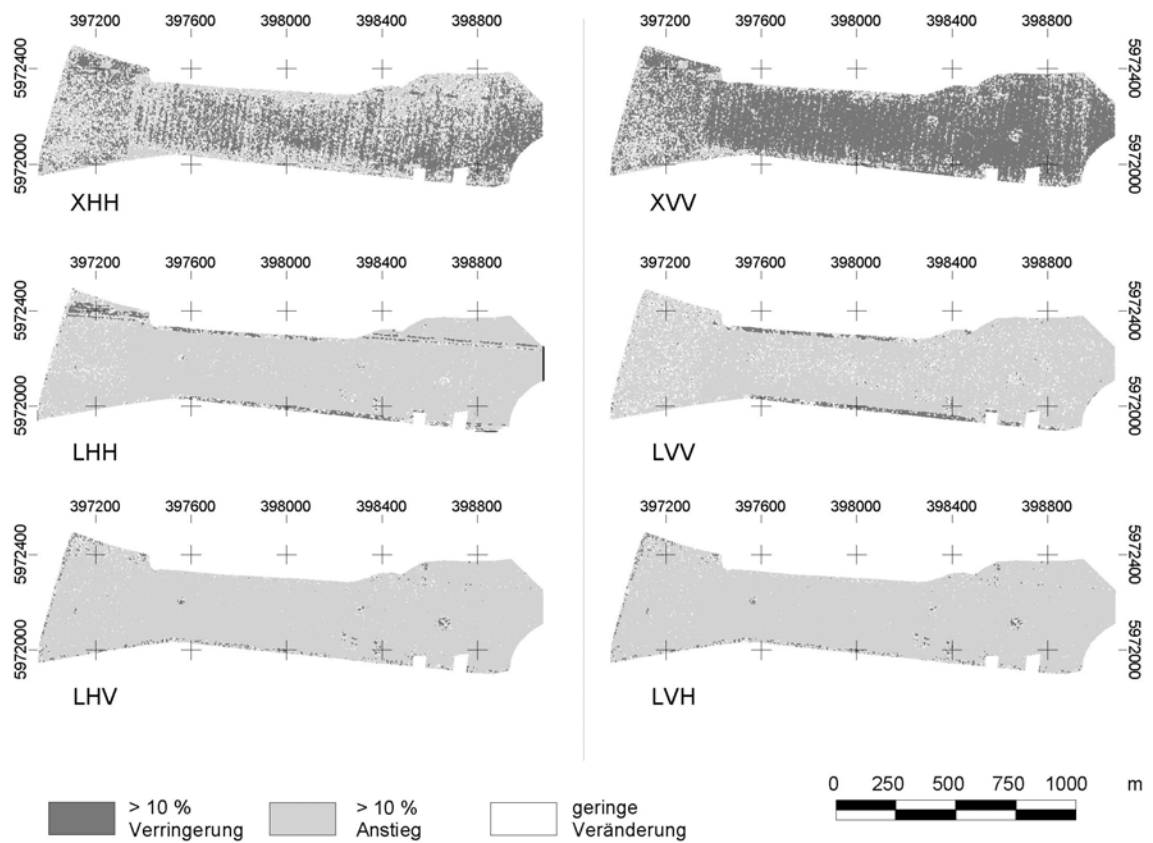


**Abb. A-2a:** Veränderung des Radarrückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  auf der Testfläche 10.2 in Neetzow im Vergleich der Aufnahmetermine 08. Mai 2001 und 09. Juni 2001 (WGS 84, UTM Zone 33).

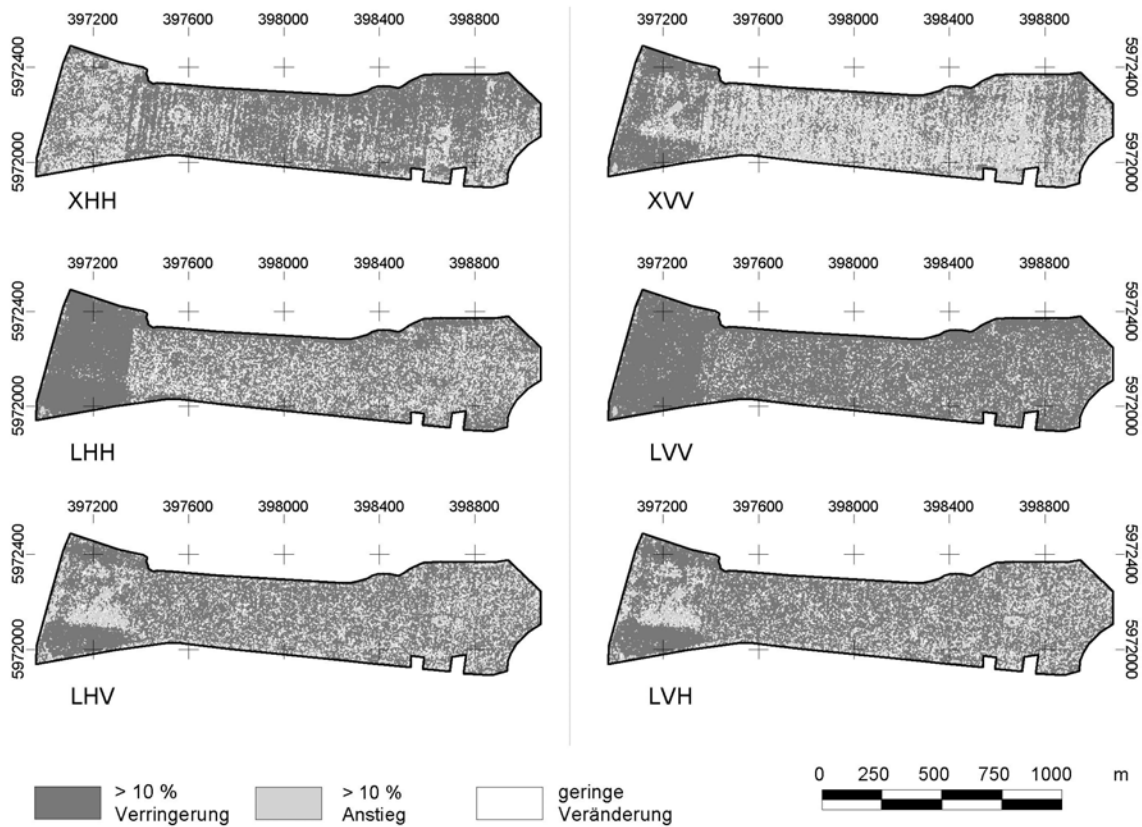


**Abb. A-2b:** Veränderung des Radarrückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  auf der Testfläche 10.3 in Neetzwow im Vergleich der Aufnahmetermine 08. Mai 2001 und 09. Juni 2001 (WGS 84, UTM Zone 33).

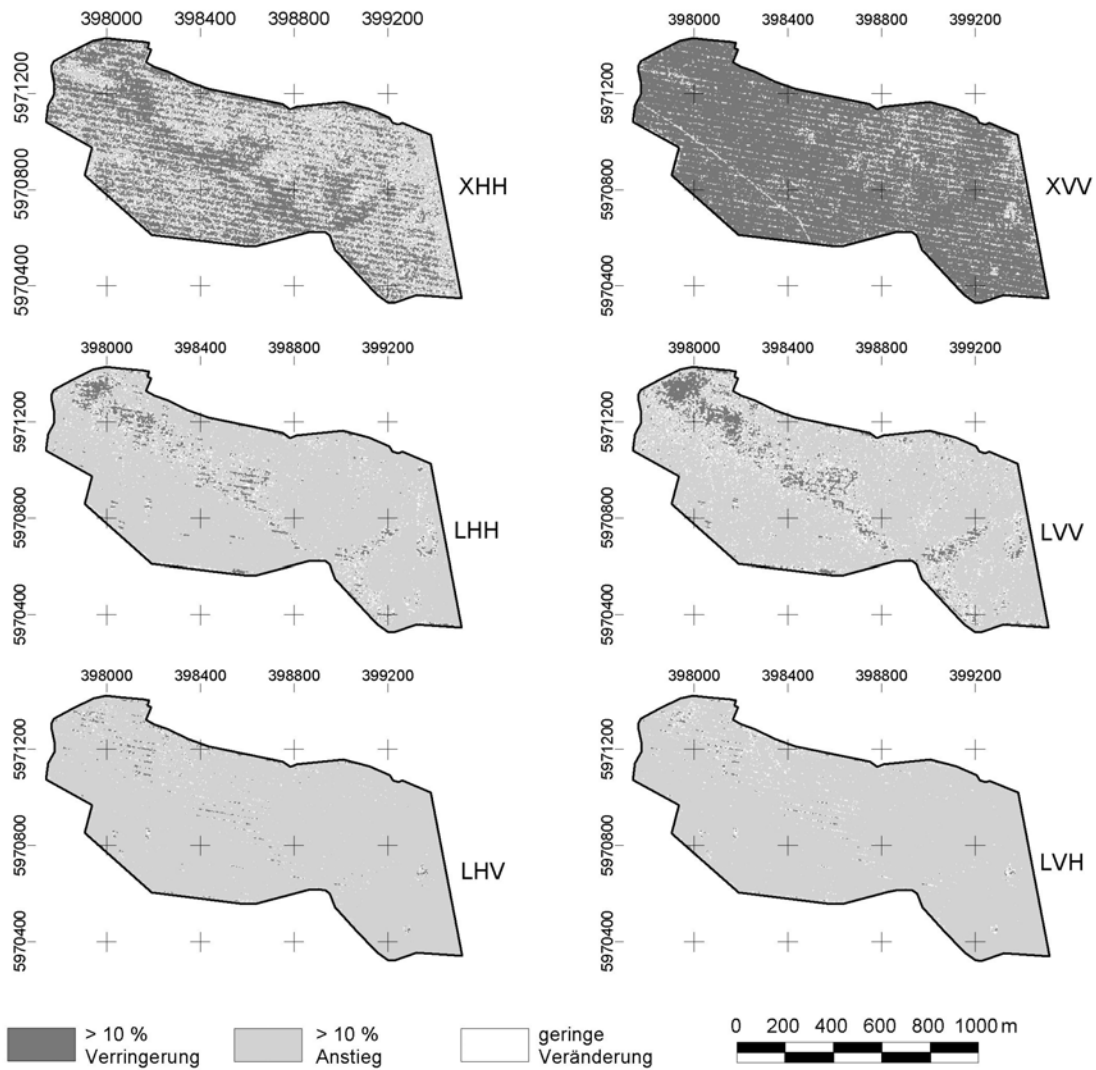




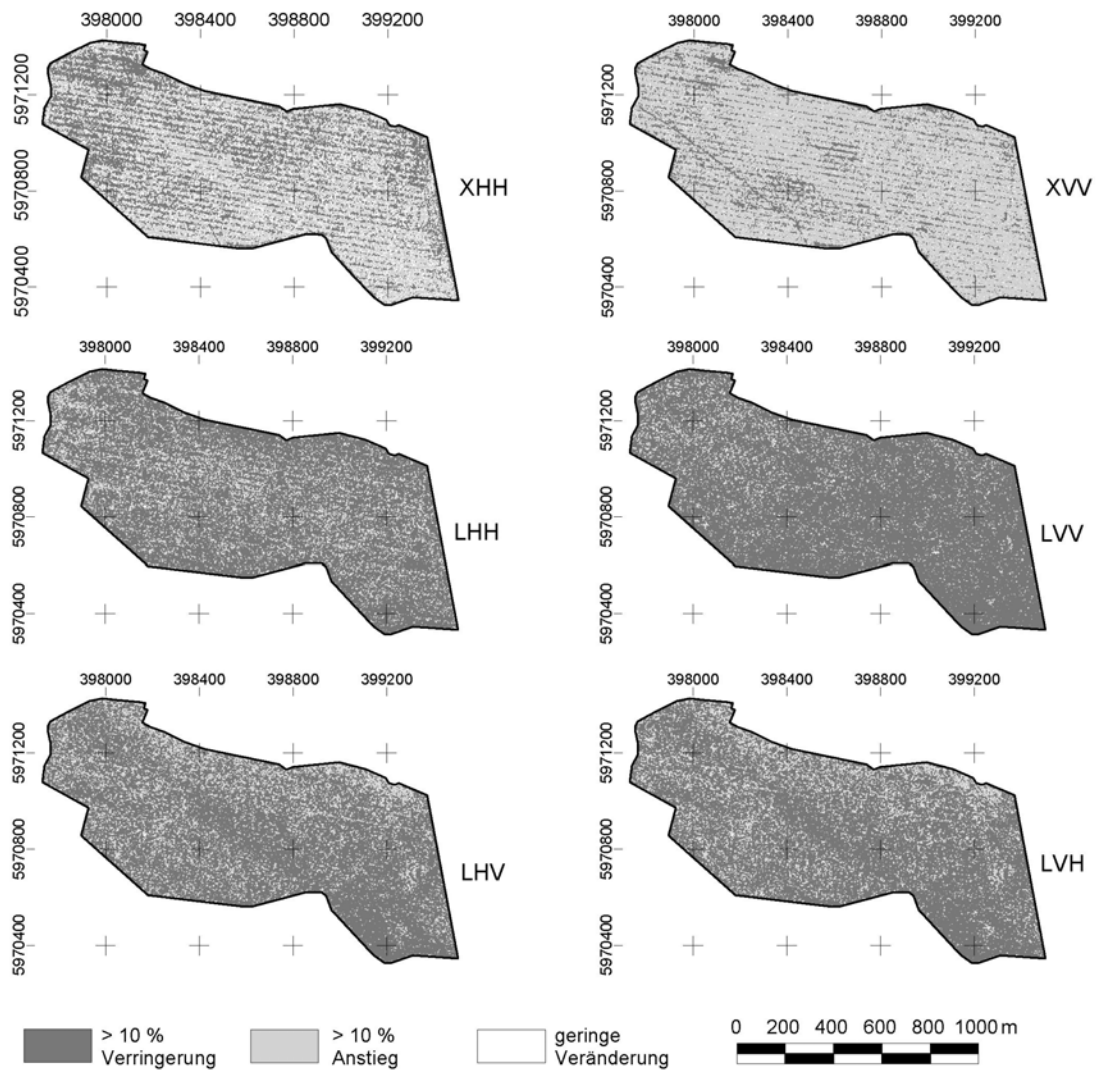
**Abb. A-2c:** Veränderung des Radarrückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  auf der Testfläche 3.2 in Neetzow im Vergleich der Aufnahmetermine 07. April 2002 und 08. Mai 2002 (WGS 84, UTM Zone 33).



**Abb. A-2d:** Veränderung des Radarrückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  auf der Testfläche 3.2 in Neetow im Vergleich der Aufnahmetermine 08. Mai 2002 und 05. Juni 2002 (WGS 84, UTM Zone 33).



**Abb. A-2e:** Veränderung des Radarrückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  auf der Testfläche 10.3 in Neetzow im Vergleich der Aufnahmetermine 07. April 2002 und 08. Mai 2002 (WGS 84, UTM Zone 33).



**Abb. A-2f:** Veränderung des Radarrückstreukoeffizienten  $\sigma^0$  auf der Testfläche 10.3 in Neetzow im Vergleich der Aufnahmetermine 08 Mai 2002 und 05. Juni 2002 (WGS 84, UTM Zone 33).

**Tab. A-5a:** Deskriptive Statistik der Radarrückstreuung  $\sigma^0$  von Winterweizen der Testflächen in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2001.

08. Mai 2001	Radarkanal						r-cross
	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	
	-----[dB]-----						
Testfläche 10.3							<i>n</i> = 16
Minimum	-18,1	-27,7	-18,5	-25,0	-13,8	-15,2	-25,3
Maximum	-12,2	-21,6	-13,6	-20,3	-9,5	-10,2	-20,9
Range	5,9	6,1	4,9	4,7	4,4	5,0	4,3
Mittelwert	-15,4	-24,4	-16,5	-22,8	-11,7	-12,9	-23,6
$\sigma$	1,6	1,8	1,3	1,4	1,5	1,8	1,4
v [%]	10,3	7,2	7,9	6,0	12,7	14,2	5,7
Testfläche 10.2							<i>n</i> = 11
Minimum	-13,3	-26,0	-15,8	-25,0	-16,0	-19,4	-24,7
Maximum	-5,7	-21,8	-6,8	-21,0	-10,8	-15,4	-21,5
Range	7,6	4,2	9,0	4,1	5,3	4,1	3,2
Mittelwert	-10,2	-23,7	-12,0	-22,8	-13,6	-17,5	-23,2
$\sigma$	2,3	1,4	2,3	1,4	1,5	1,6	1,1
v [%]	22,5	5,7	19,1	6,3	11,3	8,9	4,8

$\sigma$ : Standardabweichung, v [%]: Variationskoeffizient, r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, Range: dynamischer Bereich

**Tab. A-5b:** Deskriptive Statistik der Radarrückstreuung  $\sigma^0$  von Winterweizen der Testflächen in Neetzow während der Blüte am 09. Juni 2001.

09. Juni 2001	Radarkanal						r-cross
	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	
	-----[dB]-----						
Testfläche 10.3							<i>n</i> = 18
Minimum	-11,7	-24,6	-14,4	-24,1	-13,1	-15,2	-24,3
Maximum	-6,4	-18,6	-7,5	-18,8	-10,0	-9,7	-18,7
Range	5,3	6,0	6,9	5,3	3,1	5,5	5,6
Mittelwert	-9,1	-21,6	-11,0	-21,0	-11,4	-12,8	-21,3
$\sigma$	1,2	-1,6	1,8	1,3	0,9	1,6	1,5
v [%]	13,3	7,6	16,5	6,3	7,5	12,2	6,8
Testfläche 10.2							<i>n</i> = 13
Minimum	-11,0	-25,5	-12,2	-23,8	-14,0	-16,3	-24,7
Maximum	-3,7	-19,0	-5,2	-14,2	-8,9	-8,5	-16,6
Range	7,3	6,6	7,0	9,6	5,1	7,7	8,1
Mittelwert	-6,6	-22,1	-9,5	-21,6	-11,7	-12,8	-21,8
$\sigma$	2,3	1,7	1,9	2,7	1,5	2,2	2,1
v [%]	35,0	7,8	20,1	12,4	12,9	16,9	9,5

$\sigma$ : Standardabweichung, v [%]: Variationskoeffizient, r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, Range: dynamischer Bereich

**Tab. A-5c:** Deskriptive Statistik der Radarrückstreuung  $\sigma^0$  von Winterweizen der Testflächen in Neetzow während der Bestockung am 07. April 2002.

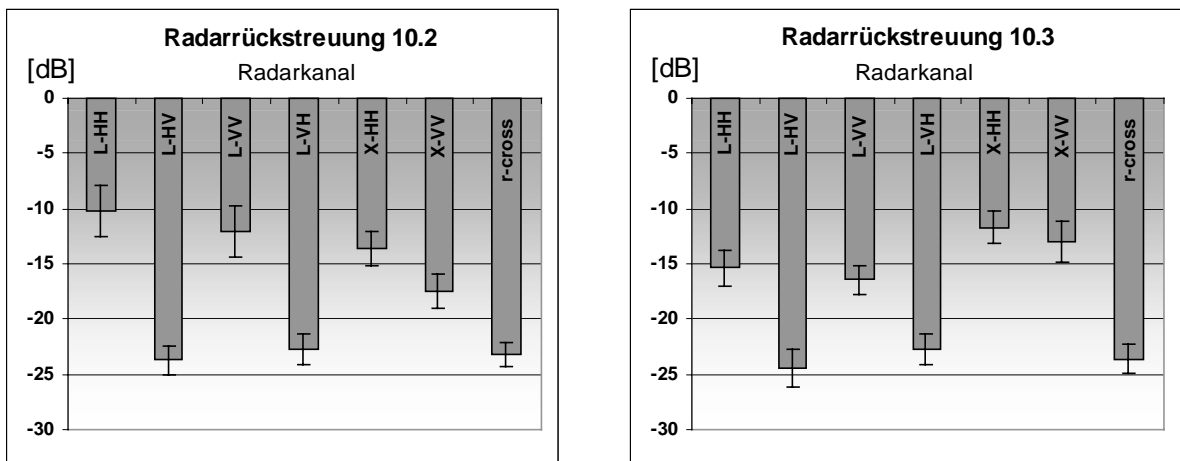
07. April 2002	Radarkanal						
	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	r-cross
	-----[dB]-----						
Testfläche 10.3	<i>n</i> = 26						
Minimum	-20,9	-32,4	-19,4	-32,0	-8,9	-8,3	-32,1
Maximum	-14,9	-27,5	-12,5	-28,2	-5,5	-5,9	-28,3
Range	6,0	4,9	6,9	3,8	3,4	2,4	3,7
Mittelwert	-17,9	-30,0	-16,2	-30,4	-7,3	-7,2	-30,2
$\sigma$	1,8	1,3	1,7	1,0	0,8	0,7	1,0
v [%]	9,8	4,2	10,4	3,1	11,0	9,8	3,4
Testfläche 3.2	<i>n</i> = 12						
Minimum	-18,3	-28,1	-16,8	-28,7	-8,0	-10,7	-28,4
Maximum	-11,7	-24,7	-10,9	-24,6	-5,1	-6,9	-25,2
Range	6,6	3,4	5,9	4,1	2,9	3,8	3,2
Mittelwert	-15,6	-26,5	-15,0	-26,5	-6,8	-8,4	-26,5
$\sigma$	1,7	1,0	1,5	1,2	1,0	1,2	1,1
v [%]	11,0	3,8	10,3	4,6	11,8	14,1	4,0

$\sigma$ : Standardabweichung, v [%]: Variationskoeffizient, r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, Range: dynamischer Bereich

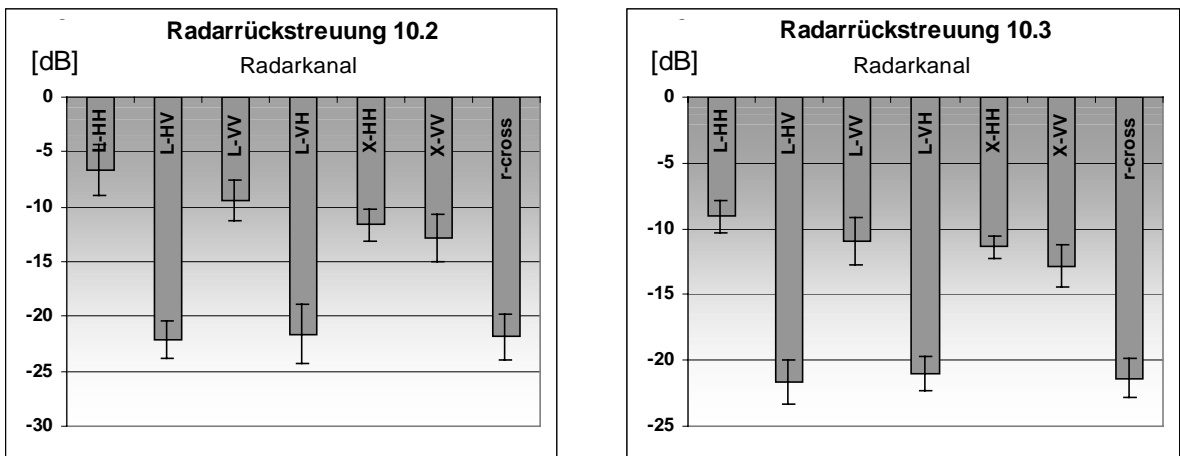
**Tab. A-5d:** Deskriptive Statistik der Radarrückstreuung  $\sigma^0$  von Winterweizen der Testflächen in Neetzow während des Ährenschiebens am 05. Juni 2002.

05. Juni 2002	Radarkanal						
	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	r-cross
	-----[dB]-----						
Testfläche 10.3	<i>n</i> = 24						
Minimum	-17,53	-29,17	-18,86	-28,93	-10,55	-12,45	-29,05
Maximum	-11,33	-23,33	-13,33	-23,00	-7,33	-8,11	-23,17
Range	6,20	5,84	5,53	5,98	3,22	4,34	5,88
Mittelwert	-14,28	-25,70	-15,78	-25,59	-9,14	-10,21	-25,65
$\sigma$	1,31	1,38	1,28	1,44	0,81	1,10	1,39
v [%]	9,17	5,39	8,10	5,62	8,89	10,76	5,42
Testfläche 3.2	<i>n</i> = 15						
Minimum	-12,39	-23,14	-15,71	-22,31	-13,77	-15,25	-22,61
Maximum	-8,47	-18,31	-11,19	-18,83	-9,16	-10,34	-18,57
Range	3,92	4,83	4,52	3,48	4,61	4,91	4,04
Mittelwert	-10,00	-20,96	-13,68	-20,81	-11,57	-13,31	-20,89
$\sigma$	1,25	1,17	1,33	1,00	1,48	1,18	1,06
v [%]	12,55	5,60	9,72	4,78	12,79	8,87	5,09

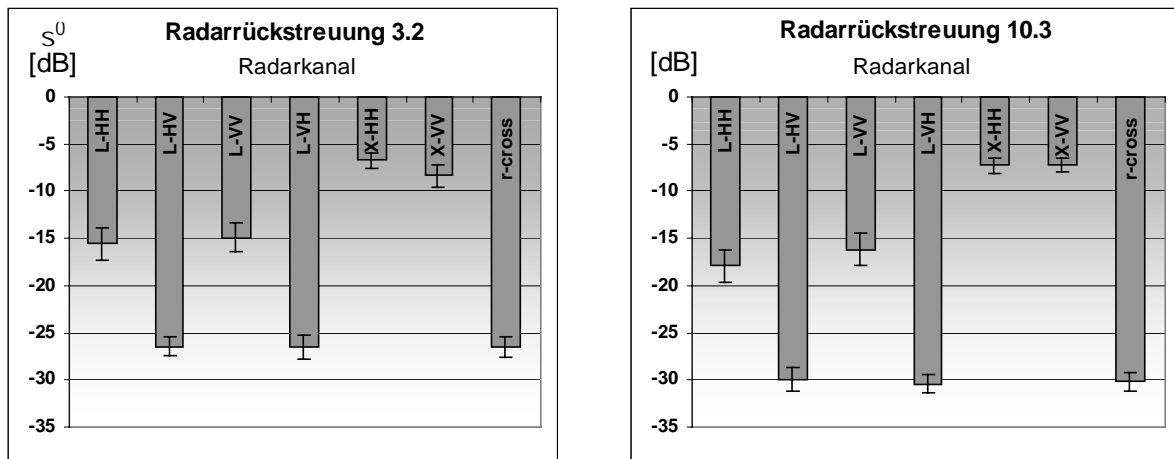
$\sigma$ : Standardabweichung, v [%]: Variationskoeffizient, r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, Range: dynamischer Bereich



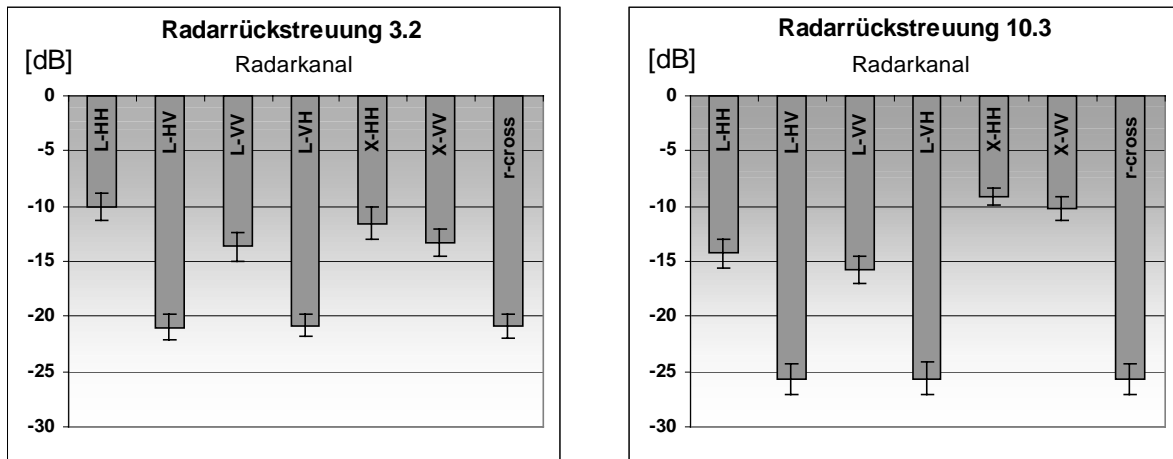
**Abb. A-3a:** Mittlerer Radarrückstreukoeffizient ( $\sigma^0$ ) von Winterweizen während des Schossens am 08. Mai 2001 auf den Testflächen in Neetzow inklusive der Standardabweichung.



**Abb. A-3b:** Mittlerer Radarrückstreukoeffizient ( $\sigma^0$ ) von Winterweizen während des Schossens am 09. Juni 2001 auf den Testflächen in Neetzow inklusive der Standardabweichung.



**Abb. A-3c:** Mittlerer Radarrückstreukoeffizient ( $\sigma^0$ ) von Winterweizen während des Schossens am 07. April 2002 auf den Testflächen in Neetzow inklusive der Standardabweichung.



**Abb. A-3d:** Mittlerer Radarrückstreukoeffizient ( $\sigma^0$ ) von Winterweizen während des Schossens am 05. Juni 2002 auf den Testflächen in Neetzow inklusive der Standardabweichung.

**Tab. A-6:** Test auf Normalverteilung der Radarrückstreueung von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow in den Jahren 2001 und 2002 (Asymptotische Signifikanz des Kolmogorov-Smirnov-Tests ( $\alpha=0,05$ )).

Kanal	10.2		10.3		3.2					
	08. Mai 2001	09. Juni 2001	08. Mai 2001	09. Juni 2001	07. April 2002	08. Mai 2002				
LHH	0,871	0,981	0,443	0,938	0,884	0,822	0,788	0,955	0,979	0,925
LHV	0,900	0,862	0,479	0,728	0,995	0,901	0,796	0,980	0,997	0,961
LVV	0,847	0,523	0,978	0,999	0,996	0,988	0,988	0,251	0,921	0,647
LVH	0,803	0,536	0,983	0,948	0,999	0,822	1,000	0,926	0,925	0,835
XHH	0,680	0,982	0,766	0,981	0,757	0,663	0,803	0,991	0,954	0,976
XVV	0,693	0,976	0,676	0,832	0,996	0,999	0,772	0,917	0,985	0,985
r-cross	0,955	0,963	0,920	0,509	0,993	0,938	1,000	0,897	0,852	0,995

r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen,  
grau unterlegt sind die Werte, bei denen das Vorliegen der Normalverteilung **nicht** gesichert ist



**Tab. A-7a:** Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse der Einzelkanalrückstreuung von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (2001).

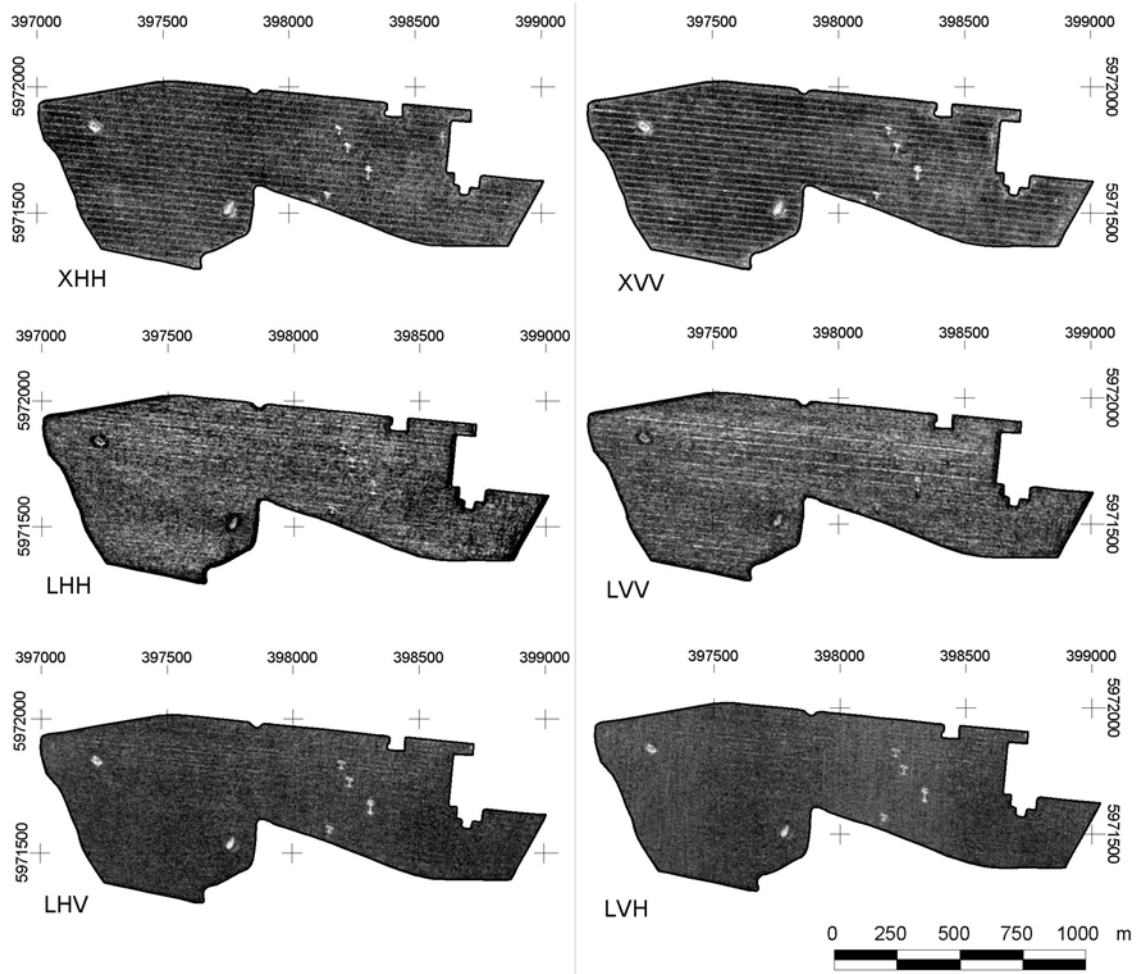
Radar- kanal	Testfläche 10.3							Testfläche 10.2						
	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	r <sub>cross</sub>	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	r <sub>cross</sub>
08. Mai 2001														
L-HH	1							1						
L-HV	0,23	1						-0,31	1					
L-VV	0,31	0,36	1					0,53	0,25	1				
L-VH	0,01	0,49	0,26	1				0,31	0,28	0,31	1			
X-HH	-0,63**	-0,39	-0,23	-0,15	1			-0,09	-0,03	-0,26	-0,24	1		
X-VV	-0,61*	-0,16	-0,18	-0,11	0,86**	1		-0,46	0,02	-0,46	-0,08	0,71*	1	
r <sub>cross</sub>	0,15	0,90**	0,37	0,82**	-0,32	-0,16	1	0,01	0,79**	0,35	0,81**	-0,17	-0,04	1
09. Juni 2001														
L-HH	1							1						
L-HV	0,40	1						0,71**	1					
L-VV	0,58*	0,41	1					0,80**	0,55	1				
L-VH	0,57*	0,93**	0,44	1				0,55	0,78**	0,54	1			
X-HH	0,39	0,22	0,20	0,29	1			-0,02	-0,24	-0,03	-0,28	1		
X-VV	0,76**	0,51*	0,62**	0,58*	0,39	1		-0,49	-0,49	-0,60*	-0,48	0,64*	1	
r <sub>cross</sub>	0,48*	0,99**	0,43	0,98**	0,26	0,55*	1	0,65*	0,92**	0,57*	0,97**	-0,28	-0,51	1

r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, Signifikanzniveau \*:  $\alpha = 0,05$ , \*\*:  $\alpha = 0,01$

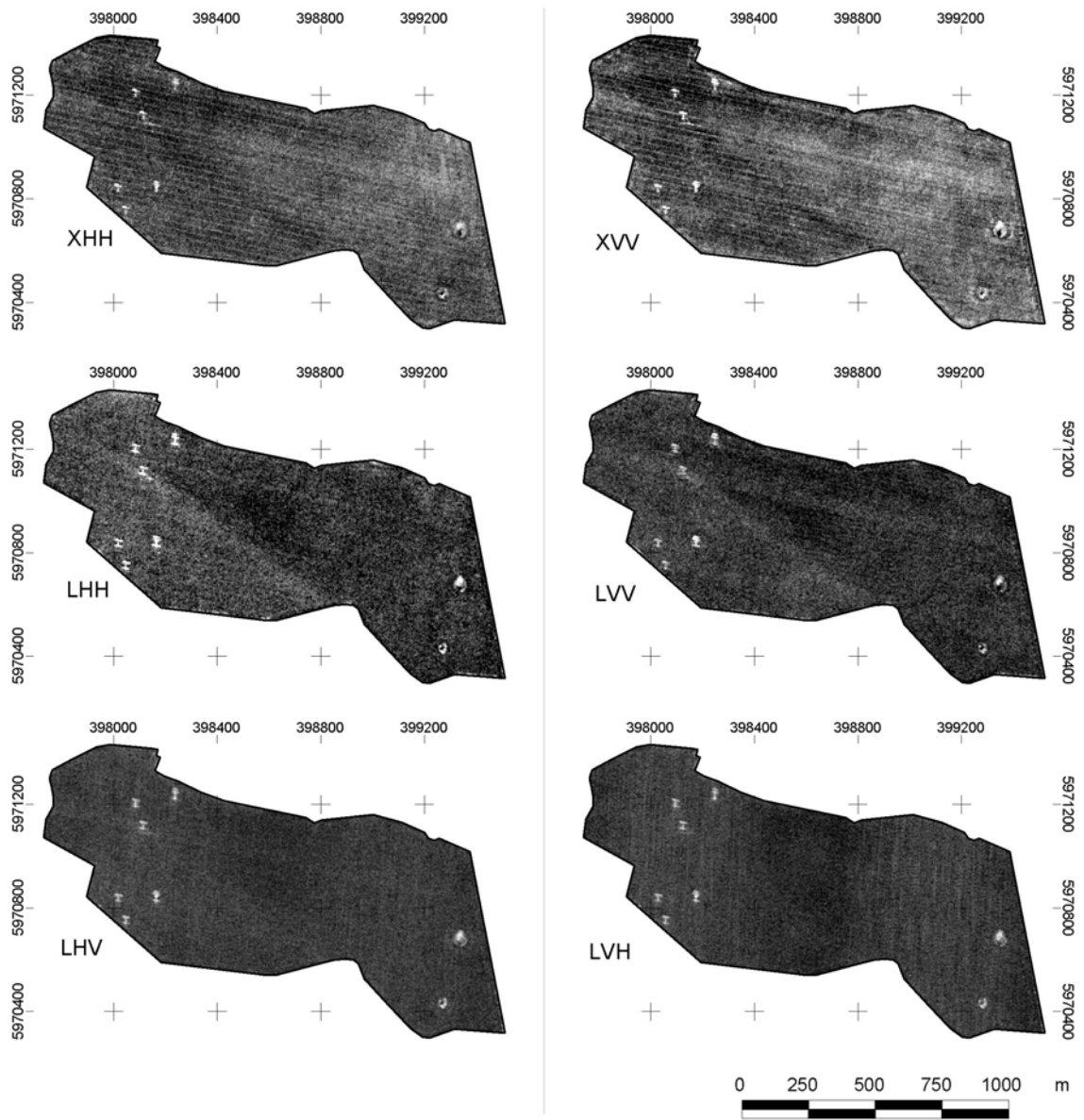
**Tab. A-7b:** Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse der Einzelkanalrückstreuung von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (2002).

	Testfläche 10.3							Testfläche 3.2						
	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	r <sub>cross</sub>	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	L-HH	L-VV	r <sub>cross</sub>
07. April 2002														
L-HH	1							1						
L-HV	0,34	1						0,63*	1					
L-VV	0,82**	0,56**	1					0,77**	0,62*	1				
L-VH	0,10	0,68**	0,20	1				0,50	0,81**	0,71*	1			
X-HH	0,44*	0,11	0,36	-0,08	1			0,27	0,17	0,43	0,51	1		
X-VV	0,18	0,40*	0,49*	0,21	0,41*	1		-0,31	0,32	-0,60	0,40	0,34	1	
r <sub>cross</sub>	0,26	0,94**	0,44*	0,89**	0,03	0,35	1	0,59*	0,94**	0,70*	0,96**	0,37	0,38	1
05. Juni 2002														
L-HH	1							1						
L-HV	0,67**	1						0,01	1					
L-VV	0,74**	0,72**	1					0,17	0,15	1				
L-VH	0,56**	0,94**	0,70**	1				-0,14	0,92**	-0,04	1			
X-HH	0,24	0,12	0,02	0,06	1			-0,23	0,44	-0,44	0,46	1		
X-VV	-0,13	-0,36	-0,28	-0,39	0,37	1		0,41	0,49	0,04	0,37	0,22	1	
r <sub>cross</sub>	0,62**	0,98**	0,72**	0,99**	0,91	-0,38	1	-0,06	0,98**	0,07	0,98**	0,45	0,44	1

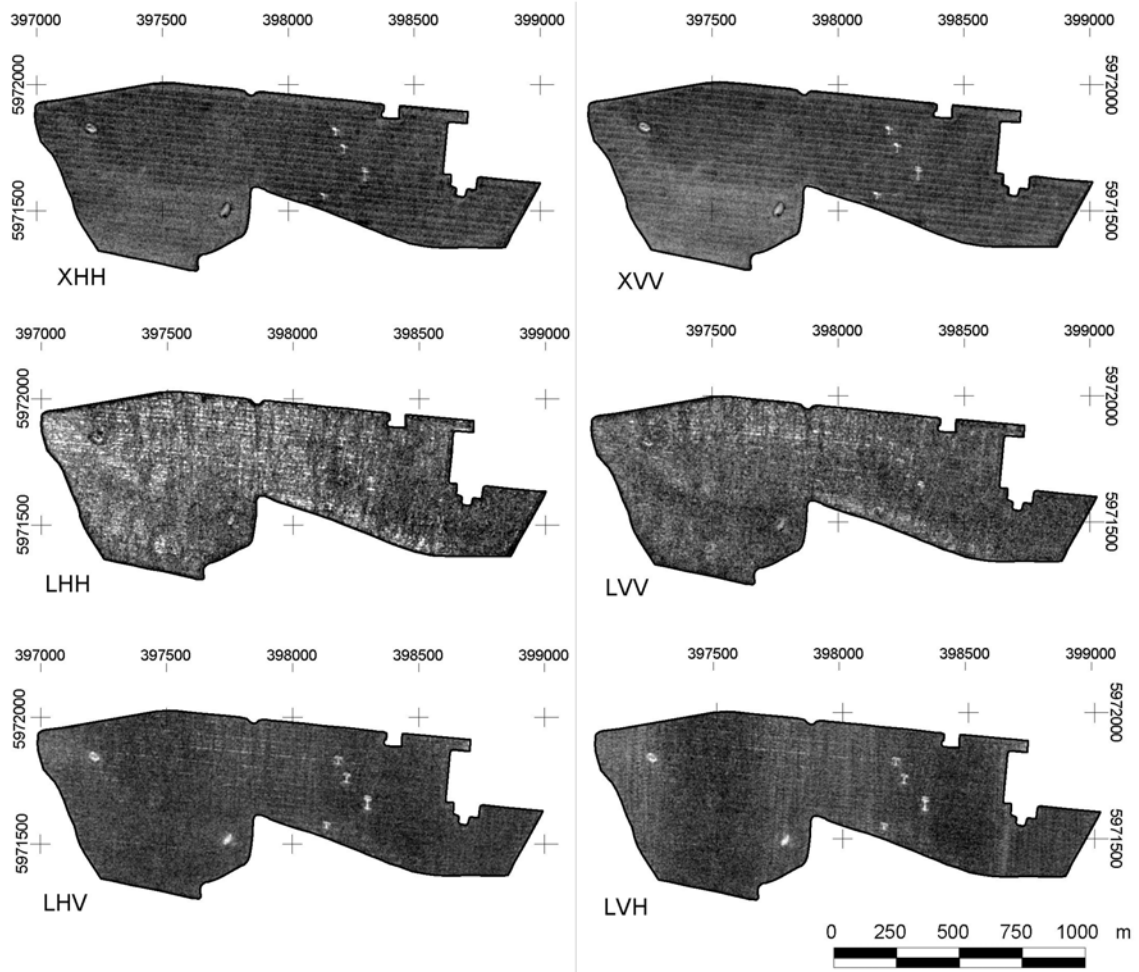
r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, Signifikanzniveau \*:  $\alpha = 0,05$ , \*\*:  $\alpha = 0,01$



**Abb. A-4a:** Einzelkanalardarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 10.2 in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2001 (WGS 84, UTM Zone 33).



**Abb. A-4b:** Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 10.3 in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2001 (WGS 84, UTM Zone 33).



**Abb. A-4c:** Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 10.2 in Neetzow während der Blüte am 09. Juni 2001 (WGS 84, UTM Zone 33).

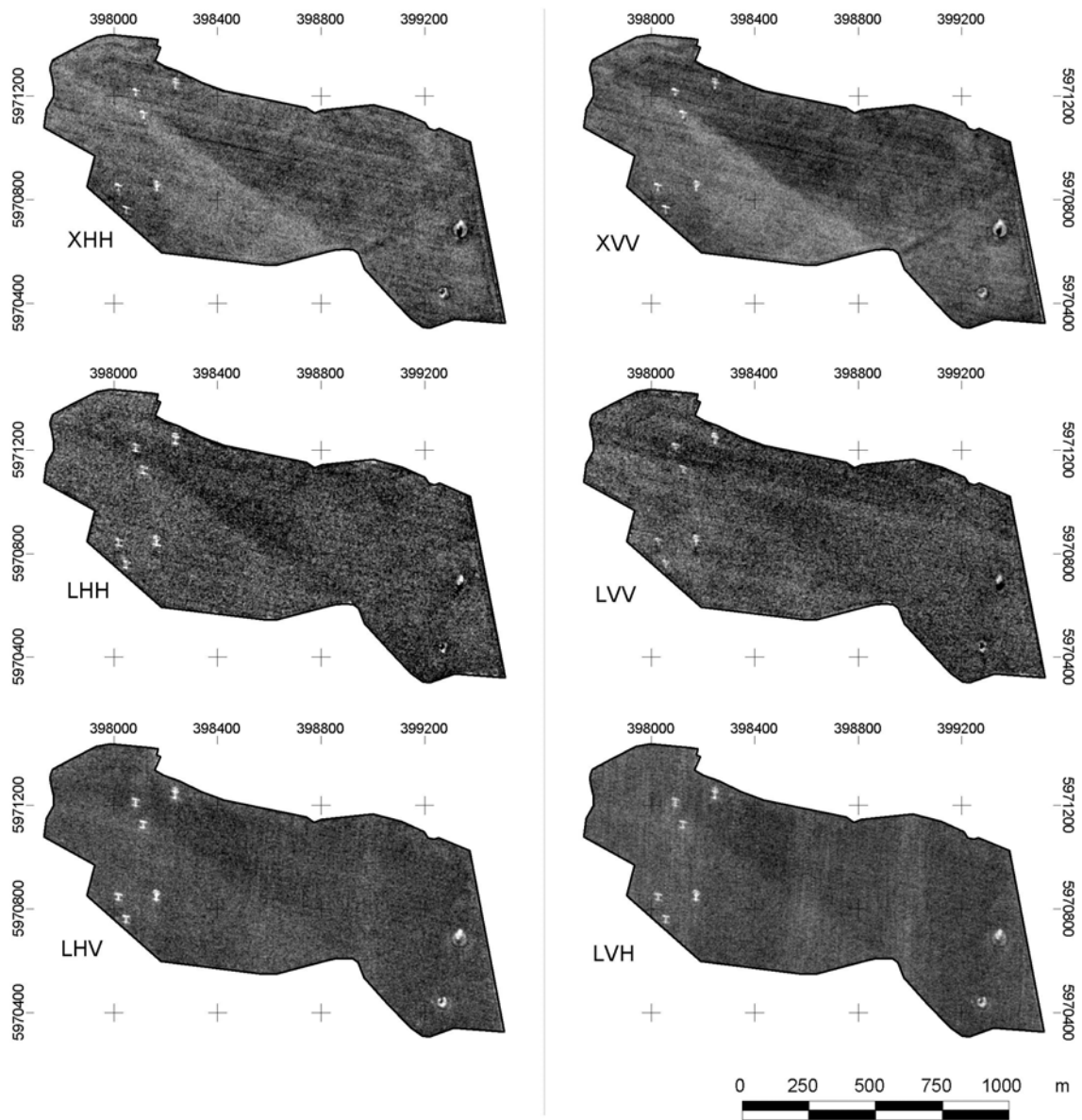
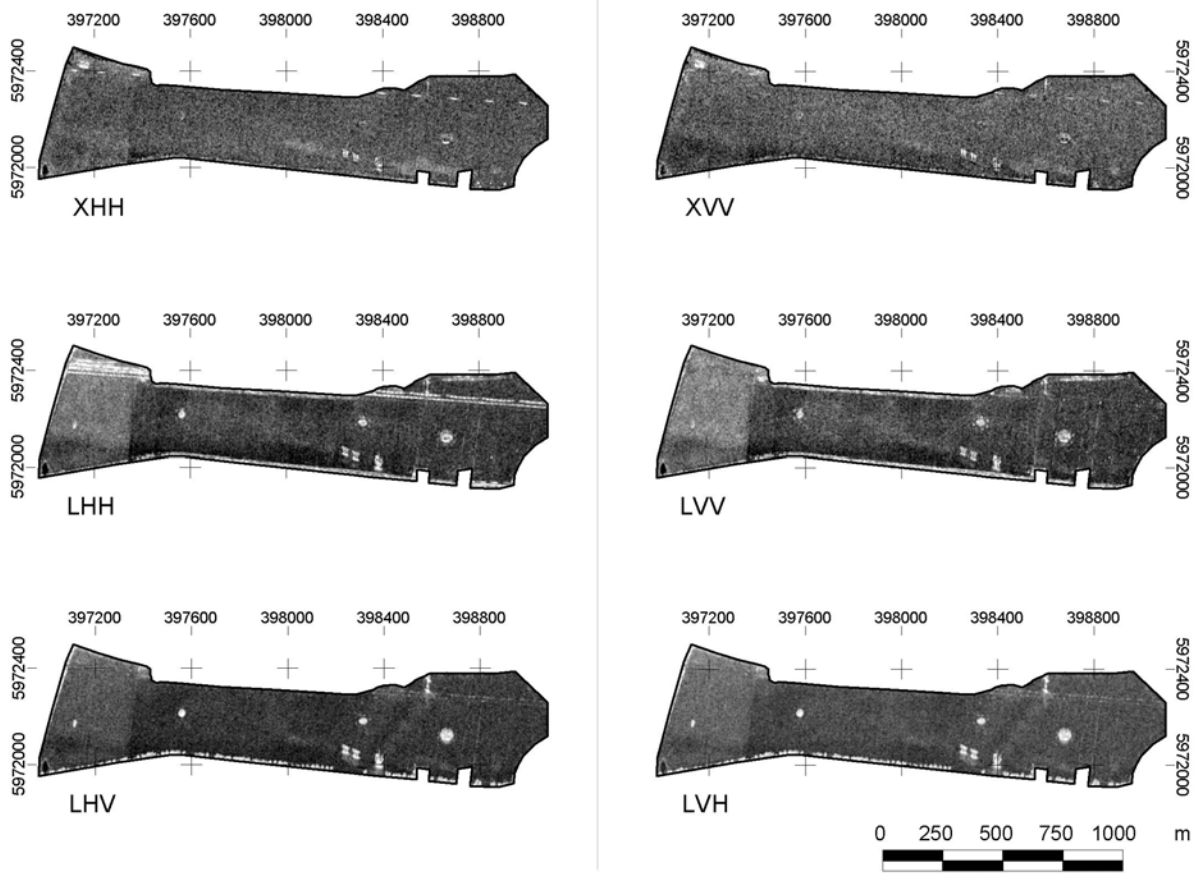
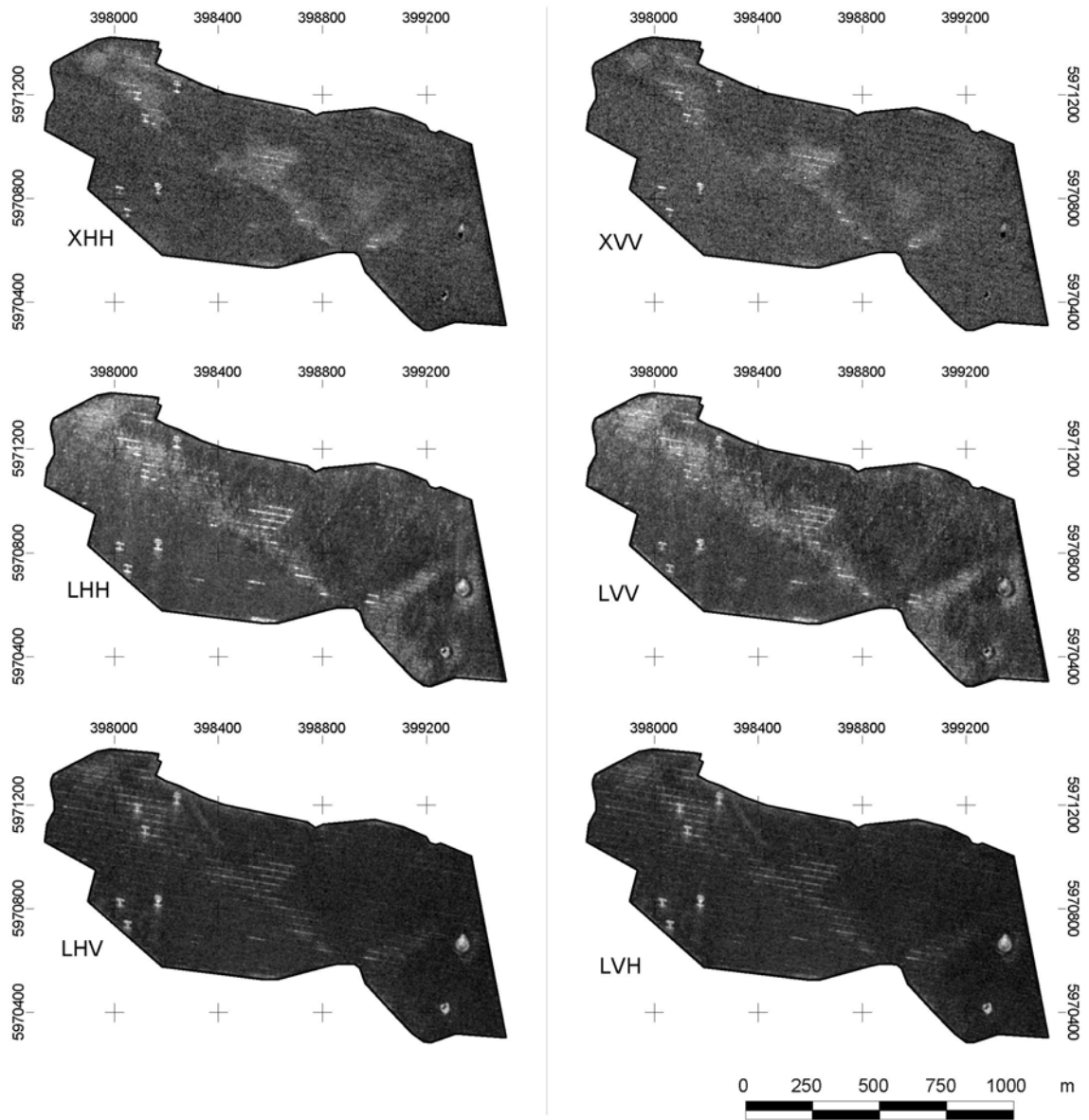


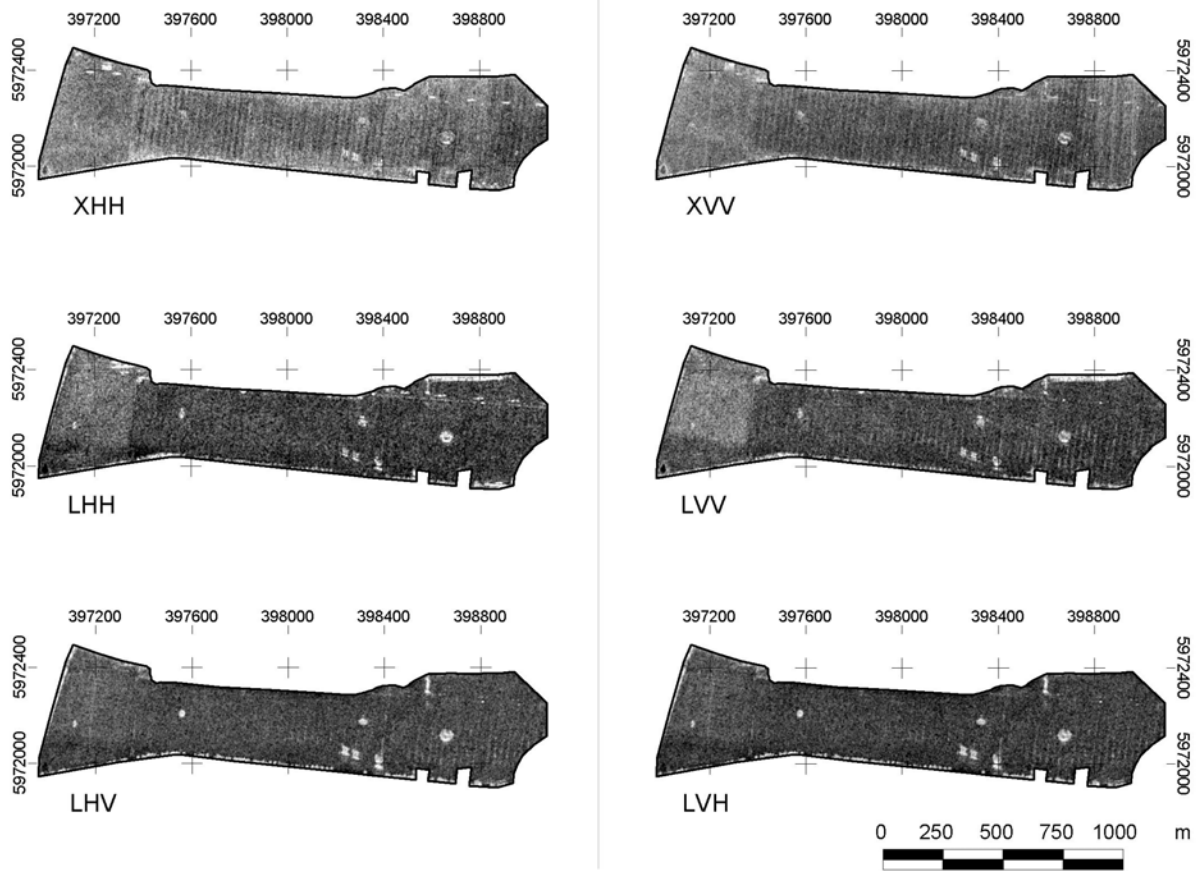
Abb. A-4d: Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 10.3 in Neetzow während der Blüte am 09. Juni 2001 (WGS 84, UTM Zone 33).



**Abb. A-4e:** Einzelkanalardarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 3.2 in Neetzow während der Bestockung am 07. April 2002 (WGS 84, UTM Zone 33).

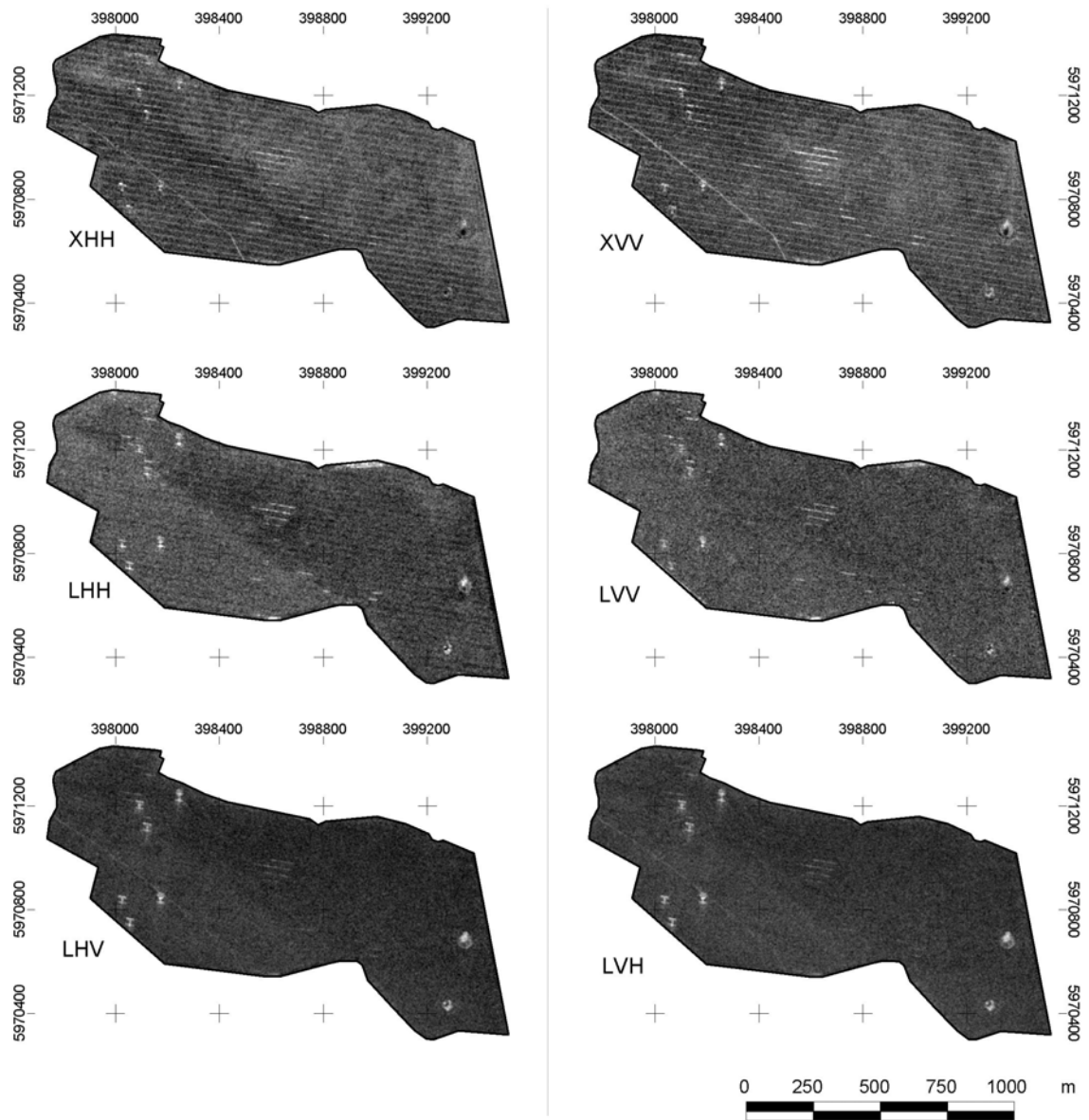


**Abb. A-4f:** Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 10.3 in Neetzow während der Bestockung am 07. April 2002 (WGS 84, UTM Zone 33).

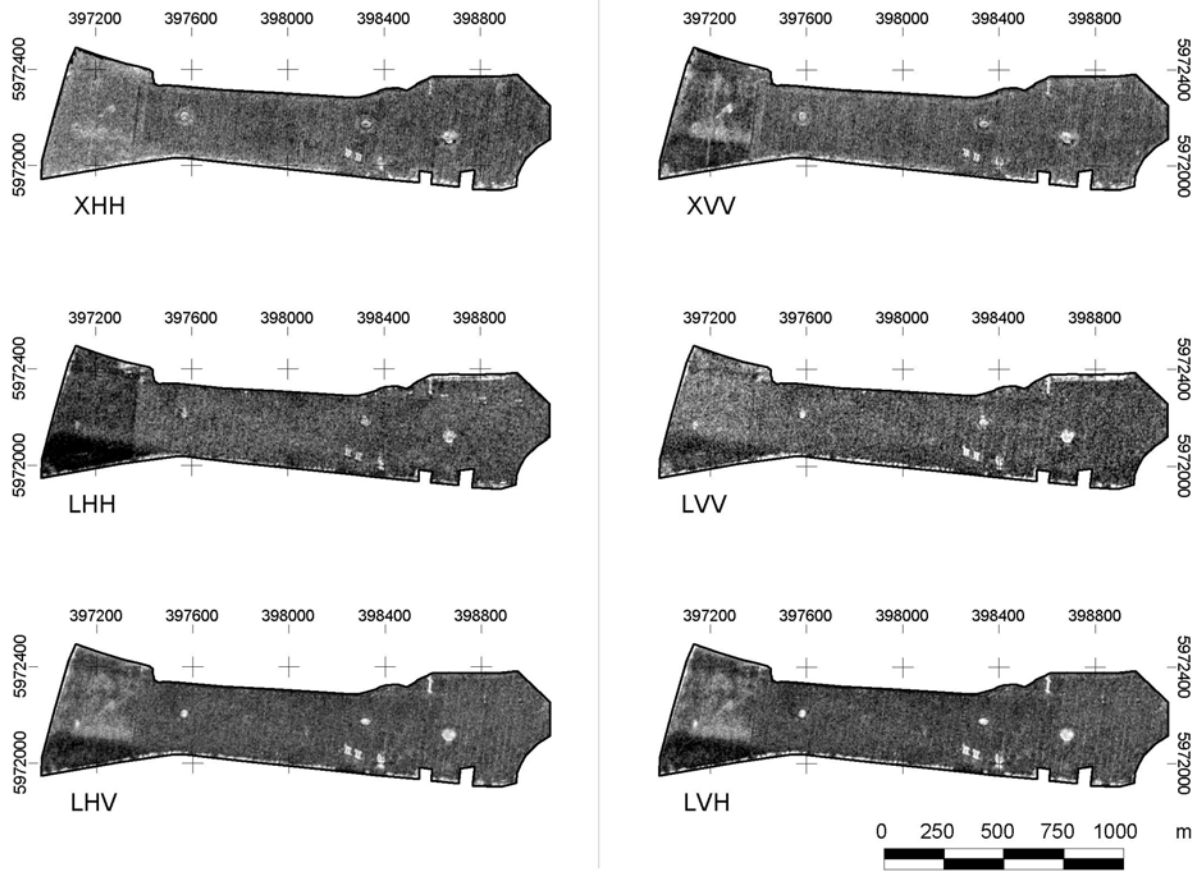


**Abb. A-4g:** Einzelkanalardarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 3.2 in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2002 (WGS 84, UTM Zone 33).

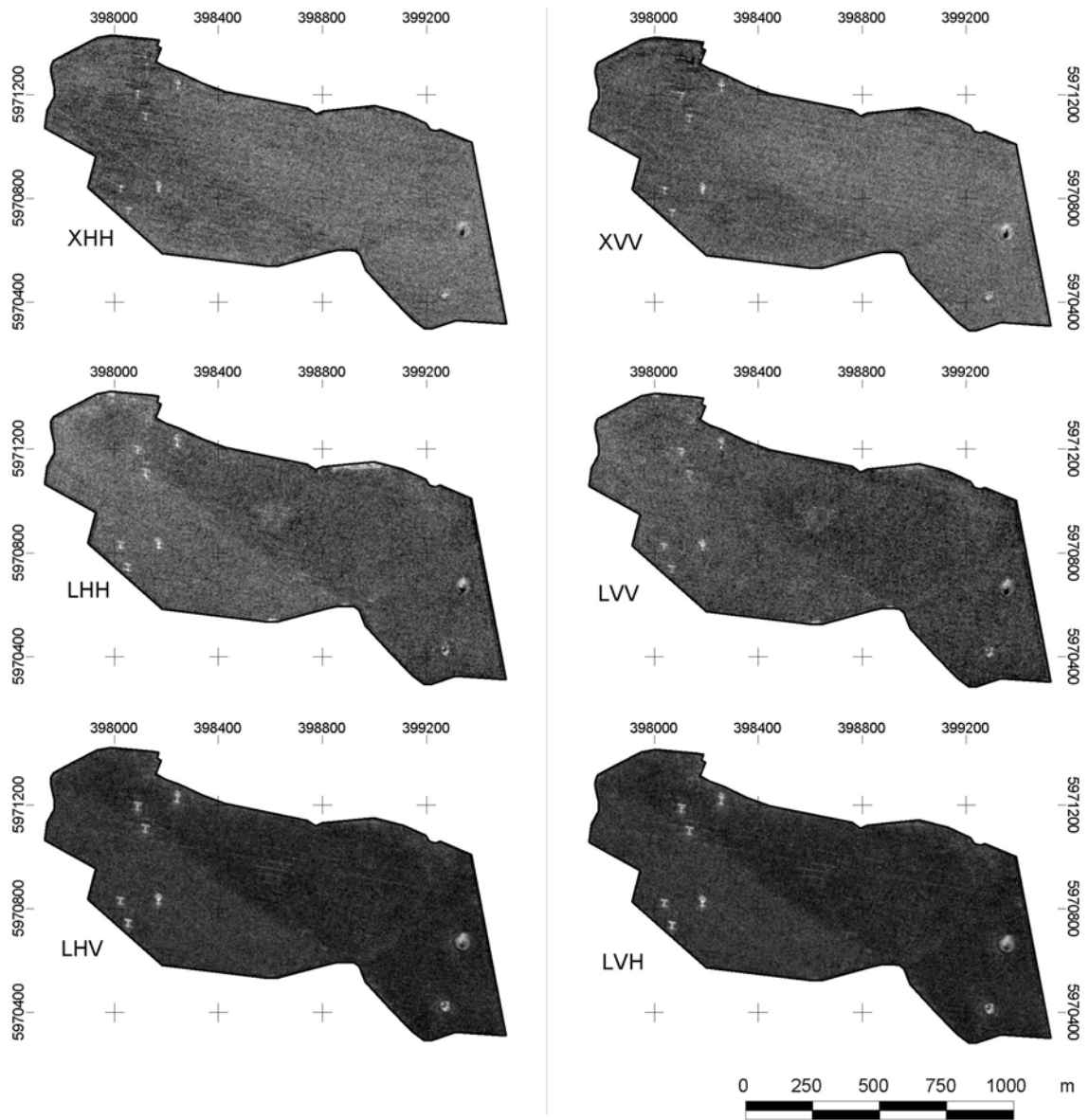




**Abb. A-4h:** Einzelkanalardarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 10.3 in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2002 (WGS 84, UTM Zone 33).



**Abb. A-4i:** Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 3.2 in Neetzow während des Ährenschiebens am 05. Juni 2002 (WGS 84, UTM Zone 33).



**Abb. A-4k:** Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 10.3 in Neetzow während des Ährenschiebens am 05. Juni 2002 (WGS 84, UTM Zone 33).

**Tab. A-8a:** Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen  $\sigma^0$  der Einzelkanäle und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow.

08. Mai 2001	Radarkanal						r-cross
	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	
Testfläche 10.3							$n=16$
FM <sub>B</sub> [g]	-0,20	0,62**	-0,18	0,39	-0,23	-0,09	0,60*
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,72**	0,50*	0,61*	0,09	-0,67**	-0,70**	0,37
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,55*	0,36	0,21	0,21	-0,63**	-0,50*	0,34
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,21	0,27	0,17	0,44	-0,45	-0,32	0,40
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,63**	0,20	0,03	-0,46	-0,32	-0,32	-0,10
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,56*	0,46	0,23	0,23	-0,47	-0,41	0,41
BG [%]	0,57*	0,10	0,46	-0,08	-0,29	-0,14	0,02
Testfläche 10.2							$n=11$
FM <sub>B</sub> [g]	-0,10	-0,17	-0,56	-0,17	-0,30	-0,11	-0,22
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,41	0,24	-0,37	0,06	-0,40	0,02	0,19
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,12	-0,09	-0,36	0,19	-0,20	0,36	0,07
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,08	-0,24	-0,38	0,22	-0,24	0,30	0,00
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,09	0,64*	0,17	-0,09	0,15	0,26	0,33
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,15	0,44	-0,02	0,27	-0,05	0,38	0,44
BG [%]	-0,43	-0,21	-0,35	-0,02	0,29	0,70*	-0,14

r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FM<sub>B</sub>: Bodenfrischgewicht, WG<sub>B</sub>: volum. Bodenfeuchte, FM<sub>V</sub>: Biomasse Frischgewicht, TM<sub>V</sub>: Biomasse Trockengewicht, WG<sub>V</sub>: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-8b :** Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen  $\sigma^0$  der Einzelkanäle und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow.

09. Juni 2001	Radarkanal						r-cross
	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	
Testfläche 10.3							$n=18$
FM <sub>B</sub> [g]	0,11	0,07	-0,18	0,06	-0,14	0,00	0,07
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,70**	0,40	0,77**	0,52*	0,34	0,81**	0,46
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,39	0,05	0,52*	0,16	0,27	0,56*	0,10
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,21	-0,12	0,40	0,02	0,05	0,38	-0,06
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,57*	0,25	0,51*	0,34	0,57*	0,62**	0,30
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,37	0,07	0,51*	0,18	0,37	0,55*	0,12
BG [%]	-0,33	-0,39	-0,19	-0,39	0,08	-0,16	-0,40
Testfläche 10.2							$n=13$
FM <sub>B</sub> [g]	0,05	0,23	0,16	0,24	0,05	0,10	0,25
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,04	-0,01	0,20	0,00	0,59*	0,53	0,00
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,11	0,08	0,19	0,04	0,81**	0,51	0,06
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,17	0,14	0,19	0,09	0,70**	0,31	0,11
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,08	0,02	0,22	0,01	0,70**	0,53	0,01
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,07	0,00	0,14	0,02	0,77**	0,53	0,01
BG [%]	-0,45	-0,58*	-0,40	-0,36	-0,04	0,33	-0,47

r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FM<sub>B</sub>: Bodenfrischgewicht, WG<sub>B</sub>: volum. Bodenfeuchte, FM<sub>V</sub>: Biomasse Frischgewicht, TM<sub>V</sub>: Biomasse Trockengewicht, WG<sub>V</sub>: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-8c:** Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen  $\sigma^0$  der Einzelkanäle und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow.

07. April 2002	Radarkanal						r-cross
	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	
Testfläche 10.3							$n=26$
FM <sub>B</sub> [g]	0,35	-0,01	0,22	-0,09	0,02	0,05	-0,04
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,05	0,22	0,12	0,43*	-0,17	0,18	0,34
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,32	0,50**	0,55**	0,28	0,27	0,42*	0,44*
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,34	0,56**	0,59**	0,30	0,30	0,45*	0,49*
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,03	-0,27	-0,15	-0,12	-0,14	-0,21	-0,22
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,14	0,15	0,05	0,38	-0,12	0,32	0,27
BG [%]	0,18	0,40*	0,41*	0,09	0,15	0,27	0,29
Testfläche 3.2							$n=12$
FM <sub>B</sub> [g]	-0,30	-0,52	0,03	-0,10	0,45	0,19	-0,30
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,04	-0,12	-0,14	-0,29	-0,39	0,04	-0,23
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,39	0,24	0,26	-0,10	-0,28	-0,37	0,06
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,37	0,15	0,24	-0,17	-0,32	-0,41	-0,03
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,09	0,30	-0,06	0,31	0,25	0,24	0,32
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,25	0,31	0,34	0,12	-0,33	-0,20	0,22
BG [%]	0,03	-0,21	0,03	-0,26	0,02	-0,42	-0,25

r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FM<sub>B</sub>: Bodenfrischgewicht, WG<sub>B</sub>: volum. Bodenfeuchte, FM<sub>V</sub>: Biomasse Frischgewicht, TM<sub>V</sub>: Biomasse Trockengewicht, WG<sub>V</sub>: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-8d:** Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen  $\sigma^0$  der Einzelkanäle und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow.

08. Mai 2002	Radarkanal						r-cross
	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	
Testfläche 10.3							$n=26$
FM <sub>B</sub> [g]	-0,17	-0,24	-0,20	-0,33	-0,06	0,08	-0,31
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,16	0,40*	0,03	0,25	-0,24	-0,27	0,35
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,16	-0,06	-0,31	0,25	-0,40*	-0,17	0,10
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,23	-0,06	-0,29	0,22	-0,43*	-0,26	0,07
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,24	0,11	-0,11	0,22	0,16	0,48*	0,17
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,05	-0,02	-0,37	0,24	-0,40*	-0,14	0,11
BG [%]	-0,05	0,02	-0,17	0,13	-0,64**	-0,52**	0,07
Testfläche 3.2							$n=17$
FM <sub>B</sub> [g]	-0,31	-0,22	0,03	0,07	0,38	0,13	-0,10
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,26	0,49*	0,30	0,08	-0,14	-0,10	0,33
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,50*	0,13	-0,47	0,18	-0,30	-0,56*	0,17
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,41	0,08	-0,42	0,20	-0,28	-0,51*	0,16
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,56*	0,28	-0,31	0,05	-0,29	-0,43	0,20
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,32	-0,02	-0,47	-0,17	-0,07	-0,41	-0,10
BG [%]	0,61**	0,45	-0,22	0,30	-0,27	-0,37	0,43

r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FM<sub>B</sub>: Bodenfrischgewicht, WG<sub>B</sub>: volum. Bodenfeuchte, FM<sub>V</sub>: Biomasse Frischgewicht, TM<sub>V</sub>: Biomasse Trockengewicht, WG<sub>V</sub>: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-8e:** Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen  $\sigma^0$  der Einzelkanäle und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow.

05. Juni 2002	Radarkanal						r-cross
	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	
Testfläche 10.3							$n=24$
FM <sub>B</sub> [g]	0,11	0,16	0,24	0,14	-0,21	-0,43*	0,15
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,32	0,46*	0,44*	0,44*	-0,60	-0,73**	0,46*
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,22	0,26	0,15	0,30	-0,38	-0,17	0,28
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,19	0,14	0,04	0,15	-0,21	-0,06	0,15
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,16	0,30	0,20	0,36	-0,41*	-0,18	0,34
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,12	0,20	0,14	0,28	-0,56**	-0,40	0,24
BG [%]	0,07	0,00	0,23	0,09	-0,15	0,06	0,04
Testfläche 3.2							$n=15$
FM <sub>B</sub> [g]	0,10	0,13	-0,45	0,25	0,14	0,37	0,19
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,25	0,11	0,32	0,05	-0,04	-0,18	0,09
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,02	0,17	0,25	0,12	0,07	-0,18	0,15
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,13	-0,07	0,15	-0,08	-0,33	-0,28	-0,08
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,16	0,32	0,09	0,28	0,55*	0,15	0,31
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,06	0,23	0,25	0,17	-0,10	-0,06	0,20
BG [%]	0,28	0,10	0,30	-0,02	0,02	0,01	0,05

r-cross: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FM<sub>B</sub>: Bodenfrischgewicht, WG<sub>B</sub>: volum. Bodenfeuchte, FM<sub>V</sub>: Biomasse Frischgewicht, TM<sub>V</sub>: Biomasse Trockengewicht, WG<sub>V</sub>: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9a:** Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2001 - Schossen).

Polarisationsindex	Lvv/Lhh	Lvh/Lhh	Lvh/Lvv	Lhh/Lvh	Lhh/Lvv	Lvv/Lvh	Lhh/Lw	Lhh-Lw	Xhh-Xvv	Xhh/Xvv	Lvv / (Lvv+Lhh)	Xvv / (Xvv+Xhh)	(Lhv+Lvh) / ((Lhv+Lvh) + (Lvv+Lhh)) <sup>-2</sup>
<b>Testfläche 10.3</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	-0,06	-0,38	-0,41	0,37	0,08	0,45	-0,05	-0,18	0,21	-0,07	-0,21	-0,21	-0,66 **
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,25	0,57 *	0,50 *	-0,57 *	-0,21	-0,48	0,20	0,30	-0,22	0,23	0,21	0,21	0,50 *
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,35	0,37	0,06	-0,34	-0,36	-0,02	0,35	-0,03	0,13	0,36	-0,13	-0,13	0,20
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,07	-0,01	-0,13	0,08	-0,07	0,17	0,06	-0,09	0,18	0,07	-0,18	-0,18	-0,08
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,56 *	0,73 **	0,33	-0,80 **	-0,57 *	-0,35	0,56 *	0,12	-0,09	0,57 *	0,10	0,10	0,49
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,40	0,42	0,03	-0,34	-0,39	-0,02	0,35	0,06	0,02	0,39	-0,02	-0,02	0,17
BG [%]	0,23	0,56 *	0,47	-0,50	-0,19	-0,46	0,18	-0,20	0,25	0,21	-0,25	-0,25	0,58 *
<b>Testfläche 10.2</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	0,42	0,09	-0,38	0,01	-0,41	0,53	0,48	-0,25	0,33	0,42	-0,32	-0,32	-0,29
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,07	-0,37	-0,37	0,42	0,02	0,41	-0,03	-0,55	0,60 *	-0,05	-0,60	-0,60	-0,50
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,29	-0,02	-0,42	0,15	-0,29	0,45	0,24	-0,74 **	0,66 *	0,28	-0,66 *	-0,66 *	-0,29
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,38	0,03	-0,49	0,11	-0,37	0,48	0,31	-0,71 *	0,64 *	0,37	-0,64 *	-0,64 *	-0,27
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,34	-0,12	0,37	0,06	0,34	-0,21	-0,27	-0,16	0,10	-0,34	-0,09	-0,09	0,00
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,10	-0,13	0,05	0,21	0,16	0,11	-0,13	-0,56	0,49	-0,15	-0,48	-0,48	-0,17
BG [%]	-0,05	-0,30	-0,36	0,43	0,02	0,37	-0,08	-0,56	0,32	-0,05	-0,32	-0,32	-0,41

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FM<sub>B</sub>: Bodentrockengewicht, WG<sub>B</sub>: volum. Bodenfeuchte, FM<sub>V</sub>: Biomasse Frischgewicht, TM<sub>V</sub>: Biomasse Trockengewicht, WG<sub>V</sub>: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9a:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2001 - Schossen).

Polarisationsindex	$(X_{vv}+X_{hh})^{-2}$	Lhh-Xvv	Lw/Xhh	Lw/Xw	Lhv/Xhh	Xhh/Lhv	Xw/Lhv	Lhv-Xhh	Lhv-Xw	$(L_{hv}+L_{hh}) / (L_{hv}-L_{hh})$		
<b>Testfläche 10.3</b>												
FM <sub>B</sub> [g]	-0,16	0,01	-0,05	-0,08	0,03	-0,43	-0,33	0,43	0,33	0,53 *	0,50	0,73 **
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,71 **	0,77 **	0,79 **	-0,80 **	-0,83 **	-0,72 **	-0,80 **	0,73 **	0,80 **	0,70 **	-0,35	-0,15
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,58 *	0,65 **	0,58 *	-0,61 *	-0,50	-0,64 **	-0,57 *	0,63 **	0,56 *	0,58 *	-0,29	0,08
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,39	0,36	0,30	-0,45	-0,33	-0,47	-0,38	0,45	0,38	0,43	0,01	0,04
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,33	0,53 **	0,52 *	-0,26	-0,29	-0,32	-0,36	0,32	0,35	0,30	-0,55 *	0,13
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,45	0,57 **	0,53 *	-0,46	-0,40	-0,53 *	-0,50 *	0,55 *	0,54 *	0,55 *	-0,18	0,09
BG [%]	-0,21	0,48	0,37	-0,45	-0,30	-0,28	-0,15	0,26	0,16	0,22	0,15	-0,34
<b>Testfläche 10.2</b>												
FM <sub>B</sub> [g]	-0,22	0,08	-0,02	0,29	0,42	-0,19	0,02	0,18	-0,02	0,11	-0,03	0,59
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,20	-0,11	-0,29	0,07	0,30	-0,47	-0,13	0,45	0,09	0,45	0,14	0,45
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,09	0,01	-0,25	0,18	0,42	-0,13	0,35	0,13	-0,35	0,09	-0,33	0,37
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,04	0,06	-0,20	0,17	0,40	-0,11	0,37	0,10	-0,38	0,02	-0,38	0,32
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,22	-0,15	-0,18	-0,04	0,02	-0,12	-0,10	0,17	0,12	0,31	0,22	0,18
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,18	-0,09	-0,28	0,01	0,20	-0,23	0,08	0,24	-0,09	0,32	0,00	0,30
BG [%]	0,54	-0,50	-0,63 *	0,43	0,53	0,37	0,70 *	-0,36	-0,71 *	-0,35	-0,68 *	0,31

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FM<sub>B</sub>: Bodenfrischgewicht, WG<sub>B</sub>: volum. Bodenfeuchte, FM<sub>v</sub>: Biomasse Frischgewicht, TM<sub>v</sub>: Biomasse Trockengewicht, WG<sub>v</sub>: Pflanzenwassergerhalt, Halme: Bestandesgerhalt, BG: Bedeckungsgrad



**Tab. A-9a:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2001 – Schossen).

Polarisationsindex	$(L_{hv} - L_{hh}) / (L_{hv} + L_{vh})$	$(L_{hv} - L_{vw}) / (L_{hv} + L_{vw})$	$(L_{hv} + X_{hh}) / (L_{hv} - X_{hh})$	$(L_{hv} + X_{vw}) / (L_{hv} - X_{vw})$	$(L_{vw} - L_{hh}) / (L_{vw} + L_{hh})$	$(L_{vw} - L_{vh}) / (L_{vw} + L_{vh})$	$(L_{vw} + L_{vh}) / (L_{vw} - L_{vh})$	$(L_{vw} - X_{hh}) / (L_{vw} + X_{hh})$		
<b>Testfläche 10.3</b>										
FM <sub>B</sub> [g]	-0,59 *	-0,68 **	0,45	0,36	-0,43	-0,07	-0,39	0,43	-0,52 *	-0,09
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,35	0,15	0,72 **	0,76 **	-0,73 **	0,23	0,15	-0,49	0,43	-0,81 **
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,28	-0,10	0,60 *	0,53 *	-0,63 **	0,36	0,41	-0,04	-0,06	-0,59 *
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,01	-0,07	0,43	0,36	-0,46	0,07	0,15	0,15	-0,26	-0,43
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,46	-0,13	0,31	0,32	-0,32	0,57 *	0,46	-0,34	0,36	-0,26
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,25	-0,18	0,56 *	0,56 *	-0,54 *	0,39	0,21	-0,03	-0,02	-0,45
BG [%]	0,47	0,34	0,23	0,15	-0,27	0,21	0,37	-0,47	0,40	-0,45
<b>Testfläche 10.2</b>										
FM <sub>B</sub> [g]	-0,02	-0,49	0,15	-0,06	-0,18	0,42	-0,14	0,48	-0,62 *	0,27
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,41	-0,45	0,40	-0,08	-0,46	-0,05	-0,25	0,40	-0,43	0,11
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,07	-0,36	0,13	-0,31	-0,13	0,28	-0,09	0,44	-0,46	0,21
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,00	-0,36	0,08	-0,35	-0,10	0,37	-0,12	0,49	-0,45	0,22
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,23	0,06	0,21	0,18	-0,15	-0,34	0,18	-0,27	0,02	-0,13
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,22	-0,10	0,22	-0,09	-0,23	-0,15	0,15	0,06	-0,28	-0,06
BG [%]	-0,32	-0,31	-0,35	-0,67 *	0,37	-0,05	-0,22	0,37	-0,37	0,42

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9a:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2001 - Schossen).

Polarisations- index	$(L_{vv} + X_{hh}) / (L_{vv} - X_{hh})$	$(L_{vw} + X_{vw}) / (L_{vw} - X_{vw})$	$(L_{hh} + L_{vh}) / (L_{hh} - L_{vh})$	$(L_{hh} + L_{vh}) / (L_{hh} - L_{vh})$	$(L_{hh} - X_{hh}) / (L_{hh} + X_{hh})$	$(L_{hh} - X_{vw}) / (L_{hh} + X_{vw})$	$(L_{hh} + X_{vw}) / (L_{hh} - X_{vw})$	$(L_{vh} - X_{hh}) / (L_{vh} + X_{hh})$	
<b>Testfläche 10.3</b>									
FM <sub>B</sub> [g]	0,16	0,00	0,37	-0,30	-0,04	0,53 *	0,04	-0,29	-0,36
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,59 *	-0,84 **	-0,57 *	0,46	-0,77 **	0,35	-0,79 **	0,02	-0,62 *
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,15	-0,50	-0,36	0,17	-0,66 **	0,27	-0,58 **	0,00	-0,62 **
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,17	-0,33	0,05	-0,27	-0,38	0,23	-0,30	0,05	-0,56 *
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,06	-0,28	-0,78 **	0,85 **	-0,50 *	0,08	-0,50 *	-0,09	-0,09
Halme [m <sup>2</sup> ]	0,07	-0,41	-0,37	0,08	-0,57 *	0,35	-0,53 *	-0,13	-0,49
BG [%]	0,27	-0,31	-0,53 *	0,21	-0,47	-0,09	-0,36	0,12	-0,22
<b>Testfläche 10.2</b>									
FM <sub>B</sub> [g]	0,02	0,38	-0,02	-0,06	-0,09	0,43	0,02	-0,37	-0,16
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,14	0,30	0,42	-0,42	0,15	-0,03	0,32	-0,31	-0,34
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,63 *	0,42	0,12	-0,19	-0,02	0,06	0,17	-0,32	-0,23
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,50	0,42	0,08	-0,16	-0,08	0,06	0,12	-0,26	-0,28
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,67 *	-0,09	0,08	-0,03	0,15	0,13	0,17	-0,21	0,16
Halme [m <sup>2</sup> ]	0,76 **	0,11	0,19	-0,23	0,08	0,18	0,22	-0,39	-0,15
BG [%]	0,61 *	0,52	0,40	-0,50	0,46	-0,03	0,53	-0,56	0,25

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwasseranteil, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9a:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2001 – Schossen).

Polarisationsindex	$(Lvh + Xhh) / (Lvh - Xhh)$	$(Lvh - Xvv) / (Lvh + Xvv)$	$(Lv + Xvv) / (Lv - Xvv)$	$(Xhh + Xvv) / (Xhh - Xvv)$	$(Xhh - Xvv) / (Xhh + Xvv)$	$Lhh + Lvv + Lhv + Lv$	$(Lhh + Lvv + Lhv + Lv) / (Xhh + Xvv)$	$(Xhh + Xvv) / (Lhh + Lvv + Lhv + Lv)$	Lhh / Rcr	Lw / Rcr	Xvv / Rcr	Xhh / Rcr
<b>Testfläche 10.3</b>												
FM <sub>B</sub> [g]	0,45	-0,23	0,34	0,21	0,32	0,26	-0,19	0,22	0,50	0,62 *	0,30	0,42
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,60 *	-0,66 *	0,62	-0,21	-0,07	0,72 **	-0,80 **	0,81 **	-0,47	-0,33	0,74 **	0,69 **
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,53 *	-0,52	0,45	0,13	-0,27	0,51 *	-0,64 **	0,61 *	-0,32	0,05	0,55 *	0,63 **
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,47	-0,44	0,37	0,18	-0,46	0,40	-0,45	0,43	0,04	0,13	0,41	0,50 *
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,11	-0,13	0,14	-0,10	0,43	0,19	-0,33	0,33	-0,67 **	-0,11	0,25	0,22
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,47	-0,44	0,44	0,02	-0,27	0,56 *	-0,52 *	0,54 *	-0,29	0,09	0,50 *	0,53 *
BG [%]	0,12	-0,09	0,03	0,25	-0,32	0,38	-0,30	0,28	-0,49	-0,42	0,12	0,23
<b>Testfläche 10.2</b>												
FM <sub>B</sub> [g]	0,18	0,03	0,06	0,32	-0,40	-0,40	0,09	-0,05	0,04	0,53	-0,03	0,17
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,26	-0,01	-0,10	0,60	-0,61 *	-0,28	-0,01	-0,02	0,44	0,44	0,05	0,41
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,30	0,18	-0,04	0,66 *	-0,64 *	-0,19	0,16	-0,16	0,14	0,41	-0,28	0,19
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,35	0,11	0,01	0,64 *	-0,57	-0,22	0,14	-0,14	0,08	0,41	-0,26	0,20
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,16	0,26	-0,14	0,09	-0,30	0,19	0,07	-0,01	0,15	-0,10	-0,06	0,01
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,17	0,15	-0,07	0,48	-0,54	0,12	0,07	-0,02	0,23	0,13	-0,12	0,20
BG [%]	-0,18	0,55	-0,48	0,32	-0,27	-0,43	0,59	-0,59	0,40	0,34	-0,67 *	-0,31

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9a:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2001 - Schossen).

Polarisationsindex	Rcr / Lhh	Rcr / Lw	Rcr / Xhh	Rcr / Xw	Lhh+Rcr	Lvv-Rcr	Xhh-Rcr	Xw-Rcr	Rcr / (Rcr + (Lvv+Lhh))	(Rcr+Lhh) / (Rcr-Lhh)	(Rcr+Lvv) / (Rcr-Lvv)	(Rcr-Lhh) / (Rcr+Lhh)	(Rcr-Lw) / (Rcr+Lw)
<b>Testfläche 10.3</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	-0,51 *	-0,58 *	-0,38 **	-0,27	-0,59 *	-0,70 **	-0,50 *	-0,40	-0,67 **	0,41	0,68 **	-0,50 *	-0,60 *
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,48	0,35	-0,69 **	-0,76 **	0,33	0,19	-0,65 **	-0,73 **	0,50 *	-0,42	-0,29	0,48	0,34
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,34	-0,03	-0,67 *	-0,57 *	0,21	-0,12	-0,61 *	-0,56 *	0,21	-0,23	0,08	0,33	-0,04
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,00	-0,11	-0,54	-0,43	-0,11	-0,21	-0,52 *	-0,46	-0,07	0,16	0,16	-0,02	-0,12
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,61 *	0,10	-0,21	-0,25	0,60 *	0,12	-0,14	-0,18	0,49	-0,73 **	-0,10	0,65 **	0,11
Halme [m <sup>2</sup> ]	0,36	-0,09	-0,53 *	-0,48	0,17	-0,18	-0,54 *	-0,53 *	0,17	-0,13	0,08	0,32	-0,09
BG [%]	0,55 *	0,45	-0,28	-0,14	0,45	0,38	-0,20	-0,11	0,59 *	-0,29	-0,36	0,52 *	0,43
<b>Testfläche 10.2</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	0,11	-0,40	-0,18	0,03	0,01	-0,48	-0,11	0,04	-0,28	0,14	0,61 *	0,00	-0,49
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,33	-0,39	-0,42	-0,08	-0,45	-0,49	-0,40	-0,09	-0,50	0,47	0,45	-0,42	-0,43
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,05	-0,40	-0,18	0,28	-0,14	-0,41	-0,18	0,25	-0,28	0,22	0,41	-0,09	-0,40
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,12	-0,45	-0,19	0,25	-0,07	-0,40	-0,18	0,24	-0,26	0,18	0,37	-0,03	-0,43
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,20	0,29	0,03	0,10	-0,22	0,01	-0,07	0,02	0,02	0,13	0,10	-0,16	0,16
Halme [m <sup>2</sup> ]	-0,11	0,03	-0,19	0,13	-0,32	-0,24	-0,27	0,05	-0,15	0,29	0,29	-0,20	-0,08
BG [%]	-0,23	-0,34	0,33	0,66 *	-0,33	-0,30	0,29	0,64 *	-0,40	0,47	0,34	-0,36	-0,34

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9a:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2001 – Schossen).

Polarisationsindex	$\frac{(Rcr + Xhh)}{(Rcr - Xhh)}$	$\frac{(Rcr + Xwv)}{(Rcr - Xwv)}$	$\frac{(Rcr - Xhh)}{(Rcr + Xhh)}$	$\frac{(Rcr - Xwv)}{(Rcr + Xwv)}$
<b>Testfläche 10.3</b>				
FM <sub>B</sub> [g]	0,46	0,36	-0,41	-0,29
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,67 **	0,70 **	-0,69 **	-0,75 **
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,57 **	0,50 *	-0,64 **	-0,55 *
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,46	0,37	-0,52 *	-0,42
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,21	0,24	-0,22	-0,25
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,53 *	0,51 *	-0,53 *	-0,49
BG [%]	0,18	0,09	-0,25	-0,13
<b>Testfläche 10.2</b>				
FM <sub>B</sub> [g]	0,16	-0,04	-0,17	0,03
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,36	-0,10	-0,41	-0,06
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,20	-0,24	-0,19	0,28
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,20	-0,25	-0,20	0,26
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,05	0,06	0,01	0,08
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,21	-0,11	-0,20	0,13
BG [%]	-0,31	-0,64 *	0,32	0,67 *

**Tab. A-9b:** Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (09.Juni 2001 – Blüte).

Polarisationsindex	Lvv/Lhh	Lvh/Lhh	Lvh/Lvv	Lhh/Lvh	Lhh/Lvv	Lvv/Lvh	Lhh/Lvv	Lhh-Lvv	Xhh-Xvv	Xhh/Xvv	Lvv / (Lvv+Lhh)	Xvv / (Xvv+Xhh)	(Lhv+Lvh) / ((Lhv+Lvh) + (Lvv+Lhh)) <sup>2</sup>
<b>Testfläche 10.3</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	0,39	0,19	-0,25	-0,10	0,25	-0,38	0,31	-0,08	0,05	0,39	-0,06	-0,12	-0,08
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,23	0,56 *	0,68 **	-0,57 *	-0,66 **	0,28	-0,37	-0,67 **	0,67 **	-0,26	-0,66 **	0,72 **	0,83 **
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,29	0,33	0,56 *	-0,37	-0,52 *	0,29	-0,32	-0,45	0,49 *	-0,29	-0,46	0,56 *	0,53 **
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,30	0,21	0,44	-0,23	-0,43	0,27	-0,32	-0,38	0,43	-0,29	-0,41	0,45	0,36
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,13	0,42	0,52 *	-0,47 *	-0,44	0,17	-0,16	-0,32	0,33	-0,15	-0,30	0,53	0,59 **
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,27	0,32	0,53 *	-0,34 *	-0,50 *	0,28	-0,32	-0,37	0,39	-0,28	-0,37	0,52	0,51 *
BG [%]	-0,13	-0,20	-0,01	0,18	0,04	0,13	-0,03	0,22	-0,17	-0,13	0,19	-0,08	-0,27
<b>Testfläche 10.2</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	0,02	-0,11	-0,18	0,01	0,00	0,02	-0,13	-0,09	0,04	0,00	-0,07	0,00	0,11
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,10	0,06	0,12	-0,03	-0,21	0,11	-0,20	-0,16	0,15	-0,11	-0,15	0,12	0,12
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,00	0,10	0,10	-0,08	-0,16	0,00	-0,06	0,07	-0,09	0,00	0,10	0,13	0,15
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,09	0,10	0,05	-0,13	-0,12	-0,08	0,03	0,22	-0,26	0,08	0,26	0,14	0,19
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,07	0,14	0,20	-0,06	-0,24	0,08	-0,17	-0,06	0,06	-0,07	-0,04	0,16	0,15
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,02	0,07	0,05	-0,05	-0,12	0,00	-0,06	0,01	-0,02	0,01	0,03	0,10	0,11
BG [%]	-0,30	-0,37	-0,26	0,38	0,19	0,31	-0,20	-0,46	0,45	-0,31	-0,45	-0,34	-0,45

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesgehalt, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9b:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (09.Juni 2001 – Blüte).

Polarisationsindex	(X <sub>vv</sub> +X <sub>hh</sub> ) <sup>-2</sup>	Lhh-Xhh	Lhh-Xvv	Lvv/Xhh	Lvv/Xvv	Lhv/Xhh	Lhv/Xvv	Xhh/Lhv	Xvv/Lhv	Lhv-Xhh	Lhv-Xvv	(L <sub>hv</sub> +L <sub>hh</sub> ) / (L <sub>hv</sub> -L <sub>hh</sub> )	(L <sub>hv</sub> +L <sub>vv</sub> ) / (L <sub>hv</sub> -L <sub>vv</sub> )
<b>Testfläche 10.3</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	-0,06	0,21	0,13	0,14	0,23	-0,16	-0,08	0,16	0,07	0,14	0,07	-0,01	0,26
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,76 **	0,48 *	-0,41	-0,61 **	-0,21	-0,08	0,68 **	0,04	-0,66 **	0,22	-0,39	-0,54 *	-0,61 **
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,54 *	0,21	-0,40	-0,39	-0,12	0,17	0,66 **	-0,18	-0,62 **	-0,09	-0,51 *	-0,42	-0,50 *
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,31	0,18	-0,34	-0,37	-0,13	0,13	0,56 *	-0,14	-0,54 *	-0,14	-0,50 *	-0,31	-0,47
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,71 **	0,16	-0,28	-0,24	-0,06	0,25	0,55 *	-0,25	-0,53 *	-0,04	-0,35	-0,48 *	-0,36
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,57 *	0,11	-0,40	-0,34	-0,12	0,21	0,61 **	-0,25	-0,58 *	-0,12	-0,46	-0,38	-0,47 *
BG [%]	-0,09	-0,39	-0,14	0,22	0,10	0,39	0,10	-0,37	-0,12	-0,42	-0,25	0,09	0,01
<b>Testfläche 10.2</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	0,09	0,02	-0,02	-0,08	-0,08	-0,08	-0,02	0,09	0,02	0,13	0,05	-0,02	-0,21
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,61 *	-0,28	-0,27	0,18	0,20	0,47	0,44	-0,46	-0,43	-0,36	-0,35	-0,02	-0,29
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,69 **	-0,34	-0,21	0,33	0,21	0,62 *	0,41	-0,58 *	-0,37	-0,42	-0,29	-0,08	-0,24
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,52	-0,23	-0,07	0,27	0,10	0,51	0,24	-0,46	-0,19	-0,32	-0,13	-0,15	-0,22
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,66 *	-0,31	-0,25	0,21	0,20	0,54	0,43	-0,54	-0,42	-0,40	-0,33	-0,04	-0,28
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,69 **	-0,35	-0,25	0,36	0,27	0,64 *	0,48	-0,58 *	-0,40	-0,46	-0,34	-0,05	-0,23
BG [%]	0,19	-0,35	-0,45	0,31	0,38	0,22	0,39	-0,25	-0,47	-0,37	-0,51	0,37	0,14

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9b:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (09.Juni 2001 – Blüte).

Polarisationsindex	$\frac{(Lhv - Lhh)}{(Lhv + Lhh)}$	$\frac{(Lhv - Lw)}{(Lhv + Lw)}$	$\frac{(Lhv + Xhh)}{(Lhv - Xhh)}$	$\frac{(Lhv + Xvv)}{(Lhv - Xvv)}$	$\frac{(Lhv - Xhh)}{(Lhv + Xhh)}$	$\frac{(Lhv - Xvv)}{(Lhv + Xvv)}$	$\frac{(Lw - Lhh)}{(Lw + Lhh)}$	$\frac{(Lw + Lhh)}{(Lw - Lhh)}$	$\frac{(Lw - Lvh)}{(Lw + Lvh)}$	$\frac{(Lw + Lvh)}{(Lw - Lvh)}$	$\frac{(Lw - Xhh)}{(Lw + Xhh)}$
<b>Testfläche 10.3</b>											
FM <sub>B</sub> [g]	0,10	-0,25	0,16	0,05	-0,16	-0,07	0,39	-0,27	0,25	-0,24	0,14
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,53 *	0,68 **	-0,02	-0,61 **	-0,05	0,67 **	-0,26	-0,18	-0,67 **	0,59 *	-0,66 **
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,38	0,57 *	-0,19	-0,58 *	0,18	0,64 **	-0,29	-0,13	-0,53 *	0,44	-0,43
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,29	0,50 *	-0,14	-0,51 *	0,14	0,55 *	-0,29	0,06	-0,44	0,40	-0,39
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,42	0,48 *	-0,25	-0,49 *	0,25	0,54 *	-0,15	-0,40	-0,47 *	0,32	-0,30
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,35	0,54 *	-0,29	-0,55 *	0,24	0,59 **	-0,28	-0,15	-0,51 *	0,43	-0,37
BG [%]	-0,12	0,01	-0,34	-0,15	0,38	0,11	-0,13	-0,04	0,03	-0,08	0,21
<b>Testfläche 10.2</b>											
FM <sub>B</sub> [g]	0,01	0,04	0,13	0,12	-0,08	-0,02	0,00	0,09	0,05	0,12	-0,05
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,03	0,19	-0,42	-0,35	0,47	0,44	-0,11	0,17	-0,19	0,24	0,17
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,08	0,14	-0,48	-0,25	0,60 *	0,39	0,00	0,11	-0,15	0,17	0,29
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,14	0,12	-0,34	-0,07	0,48	0,21	0,08	-0,02	-0,10	0,15	0,24
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,07	0,22	-0,50	-0,34	0,54	0,43	-0,07	0,20	-0,23	0,23	0,18
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,07	0,13	-0,44	-0,21	0,61 *	0,43	0,01	0,18	-0,10	0,14	0,31
BG [%]	-0,38	-0,22	-0,29	-0,46	0,24	0,45	-0,31	0,24	0,21	-0,15	0,33

Polarisationen: w: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwasseranteil, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad



**Tab. A-9b:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (09.Juni 2001 – Blüte).

Polarisationsindex	$(Lw + Xhh) / (Lvv - Xhh)$	$(Lw - Xvv) / (Lw + Xvv)$	$(Lw + Xvv) / (Lw - Xvv)$	$(Lhh - Lvhh) / (Lhh + Lvhh)$	$(Lhh + Lvhh) / (Lhh - Lvhh)$	$(Lhh - Xhh) / (Lhh + Xhh)$	$(Lhh + Xhh) / (Lhh - Xhh)$	$(Lhh - Xvv) / (Lhh + Xvv)$	$(Lhh + Xvv) / (Lhh - Xvv)$	$(Lvhh - Xhh) / (Lvhh + Xhh)$
<b>Testfläche 10.3</b>										
FM <sub>B</sub> [g]	-0,03	0,23	0,03	-0,13	0,05	-0,22	-0,15	-0,25	0,24	-0,18
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,15	-0,22	-0,35	-0,57 *	0,57 *	-0,55 *	0,49	0,08	-0,25	-0,09
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,43	-0,12	-0,34	-0,36	0,38	-0,24	0,29	0,26	-0,38	0,12
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,51 *	-0,12	-0,44	-0,23	0,23	-0,18	0,24	0,27	-0,40	0,02
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,25	-0,10	-0,01	-0,46	0,50 *	-0,23	0,27	0,07	-0,13	0,27
Halme [m <sup>2</sup> ]	0,42	-0,13	-0,34	-0,34	0,36	-0,17	0,15	0,24	-0,40	0,20
BG [%]	0,44	0,09	0,13	0,19	-0,17	0,40	-0,33	0,31	-0,31	0,37
<b>Testfläche 10.2</b>										
FM <sub>B</sub> [g]	-0,28	-0,03	0,00	0,03	0,02	-0,02	0,02	-0,01	-0,12	-0,15
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,19	0,18	0,02	-0,03	0,02	0,18	-0,08	0,19	-0,27	0,36
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,32	0,18	-0,04	-0,08	0,08	0,20	-0,05	0,14	-0,27	0,45
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,29	0,08	-0,10	-0,13	0,14	0,11	0,07	0,02	-0,11	0,34
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,30	0,16	-0,01	-0,08	0,04	0,17	-0,12	0,16	-0,37	0,42
Halme [m <sup>2</sup> ]	-0,31	0,23	0,11	-0,06	0,04	0,22	-0,13	0,17	-0,34	0,43
BG [%]	0,08	0,40	0,10	0,38	-0,37	0,41	-0,26	0,45	-0,14	0,20

Polarisationen: w: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9b:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (09.Juni 2001 – Blüte).

Polarisations- index	$(Lvh + Xhh) / (Lvh - Xhh)$	$(Lvh - Xvv) / (Lvh + Xvv)$	$(Lv + Xvv) / (Lv - Xvv)$	$(Xhh - Xw) / (Xhh + Xw)$	$(Xhh - Xw) / (Xhh - Xw)$	$Lhh + Lvv + Lhv + Lv$	$(Lhh + Lw + Lhv + Lv) / (Xhh + Xw)$	$Lhh / Rcr$	$Lw / Rcr$	$Xw / Rcr$	$Xhh / Rcr$	
<b>Testfläche 10.3</b>												
FM <sub>B</sub> [g]	0,18	-0,06	0,01	0,06	-0,07	0,00	-0,09	0,09	-0,09	0,25	0,06	0,17
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,03	0,68 **	-0,65 **	0,66 **	0,34	0,74 **	0,12	-0,12	-0,55 *	-0,67 **	-0,67 **	0,06
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,13	0,61 **	-0,52 *	0,46	0,07	0,35	0,31	-0,32	-0,38	-0,54 *	-0,61 **	-0,16
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,03	0,48 *	-0,40	0,41	0,01	0,17	0,23	-0,25	-0,27	-0,47	-0,51 *	-0,09
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,25	0,55 *	-0,49 *	0,30	0,10	0,51 *	0,34	-0,33	-0,46	-0,45	-0,54 *	-0,26
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,25	0,58 *	-0,52 *	0,37	0,40	0,36	0,34	-0,35	-0,35	-0,52 *	-0,58 *	-0,23
BG [%]	-0,31	0,07	-0,04	-0,19	-0,16	-0,39	0,37	-0,37	0,15	0,02	-0,09	-0,37
<b>Testfläche 10.2</b>												
FM <sub>B</sub> [g]	0,32	-0,08	-0,40	0,07	-0,19	0,20	-0,05	0,10	0,00	-0,06	0,08	0,15
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,20	0,36	0,14	0,15	-0,07	0,06	0,38	-0,33	-0,02	-0,22	-0,38	-0,40
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,10	0,32	0,02	-0,10	-0,01	0,12	0,41	-0,34	-0,08	-0,17	-0,32	-0,49
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,05	0,16	-0,13	-0,26	-0,05	0,16	0,27	-0,20	-0,14	-0,14	-0,15	-0,37
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,23	0,36	0,18	0,04	0,03	0,09	0,39	-0,35	-0,06	-0,24	-0,38	-0,47
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,03	0,33	-0,07	-0,03	0,07	0,07	0,46	-0,34	-0,06	-0,14	-0,33	-0,47
BG [%]	-0,27	0,38	0,19	0,45	0,34	-0,51	0,37	-0,40	0,38	0,21	-0,43	-0,24

Polarisationen: v: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwasseranteil, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9b:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (09.Juni 2001 – Blüte).

Polarisationsindex	Rcr / Lhh	Rcr / Lvw	Rcr / Xhh	Rcr / Xvw	Lhh-Rcr	Lvw-Rcr	Xhh-Rcr	Xvw-Rcr	Rcr / (Rcr + (Lvw+Lhh))	(Rcr+Lhh) / (Rcr - Lhh)	(Rcr+Lvw) / (Rcr - Lvw)	(Rcr - Lhh) / (Rcr + Lvw)	
<b>Testfläche 10.3</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	0,18	-0,25	-0,17	-0,08	0,03	-0,24	-0,14	-0,07	-0,12	-0,03	0,25	0,11	-0,25
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,54 *	0,69 **	-0,10	0,69 **	0,13	0,41	-0,26	0,42	0,72 **	-0,56 *	-0,60 **	0,55 *	0,68 **
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,33	0,58 *	0,15	0,65 **	0,24	0,45	0,06	0,51 *	0,56 *	-0,40	-0,47 *	0,37	0,55 *
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,24	0,48 *	0,08	0,54 *	0,24	0,46	0,08	0,48 *	0,45	-0,28	-0,44	0,26	0,47 *
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,40	0,52 *	0,26	0,56 *	0,18	0,28	0,04	0,37	0,53 *	-0,49 *	-0,34	0,44	0,48 *
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,32	0,54 *	0,19	0,60 **	0,20	0,42	0,09	0,47 *	0,53 *	-0,37	-0,45	0,34	0,53 *
BG [%]	-0,18	0,00	0,39	0,09	0,14	0,13	0,43	0,23	-0,08	0,13	0,05	-0,15	-0,01
<b>Testfläche 10.2</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	-0,07	-0,14	-0,09	-0,03	-0,21	-0,11	-0,15	-0,08	-0,03	-0,03	-0,19	-0,01	0,00
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,05	0,12	0,44	0,42	0,06	0,21	0,31	0,32	0,12	-0,02	-0,27	0,03	0,20
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,09	0,09	0,58 *	0,40	0,07	0,12	0,38	0,26	0,12	-0,08	-0,22	0,08	0,15
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,10	0,05	0,49	0,24	0,08	0,06	0,28	0,12	0,13	-0,15	-0,20	0,13	0,12
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,12	0,19	0,50	0,41	0,09	0,21	0,35	0,30	0,17	-0,04	-0,26	0,08	0,23
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,08	0,06	0,60 *	0,46	0,07	0,12	0,39	0,30	0,09	-0,04	-0,20	0,07	0,12
BG [%]	-0,37	-0,28	0,19	0,37	-0,03	0,12	0,32	0,46	-0,34	0,37	0,17	-0,38	-0,23

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwasseranteil, Halmv: Biomasse Halm, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9b:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (09.Juni 2001 – Blüte).

Polarisationsindex	$\frac{(Rcr + Xhh)}{(Rcr - Xhh)}$	$\frac{(Rcr + Xvv)}{(Rcr - Xvv)}$	$\frac{(Rcr - Xhh)}{(Rcr + Xhh)}$	$\frac{(Rcr - Xvv)}{(Rcr + Xvv)}$
<b>Testfläche 10.3</b>				
FM <sub>B</sub> [g]	0,17	0,03	-0,17	-0,07
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,01	-0,64 **	-0,07	0,68 **
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,16	-0,56 *	0,15	0,63 **
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,09	-0,46	0,09	0,52 *
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,25	-0,50 *	0,26	0,55 *
Halme [m <sup>2</sup> ]	-0,27	-0,54 *	0,22	0,59 *
BG [%]	-0,33	-0,10	0,38	0,09
<b>Testfläche 10.2</b>				
FM <sub>B</sub> [g]	0,25	0,29	-0,12	-0,05
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,29	-0,22	0,42	0,40
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,27	-0,11	0,53	0,35
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,12	0,05	0,42	0,19
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,35	-0,24	0,48	0,39
Halme [m <sup>2</sup> ]	-0,21	-0,04	0,52	0,39
BG [%]	-0,27	-0,30	0,22	0,42

**Tab. A-9c:** Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (07. April 2002 – Bestockung).

Polarisationsindex	Lw/Lhh	Lvh/Lhh	Lvh/Lvw	Lhh/Lvh	Lhh/Lvw	Lvw/Lvh	Lhh-Lw	Xhh-Xw	Xhh/Xw	Lvw / (Lvw+Lhh)	Xw / (Xw+Xhh)	(Lhv+Lvh) / ((Lhv+Lvh) + (Lvw+Lhh)) <sup>-2</sup>	
<b>Testfläche 10.3</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	0,18	0,35	0,24	-0,37	-0,18	-0,24	0,24	-0,02	-0,01	0,18	-0,01	0,33	0,30
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,27	-0,17	0,00	0,20	0,30	0,02	-0,29	-0,32	0,33	-0,29	-0,33	-0,09	0,03
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,42 *	0,24	0,48 *	-0,22	0,43 *	-0,48 *	-0,35	-0,09	0,08	-0,43 *	-0,07	0,33	0,46 *
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,46 *	0,25	0,51 **	-0,23	0,47 *	-0,51 **	-0,38	-0,10	0,08	-0,47 *	-0,08	0,34	0,49 *
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,20	0,01	-0,11	-0,01	-0,20	0,10	0,18	0,04	-0,03	0,20	0,05	-0,01	-0,09
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,31	-0,26	-0,06	0,27	0,33	0,07	-0,32	-0,39 *	0,39 *	-0,32	-0,39	-0,16	-0,05
BG [%]	-0,40 *	0,15	0,38	-0,14	0,41 *	-0,39 *	-0,35	-0,08	0,08	-0,41 *	-0,07	0,22	0,31
<b>Testfläche 3.2</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	-0,50	-0,22	0,12	0,28	0,50	-0,11	-0,49	0,11	-0,19	-0,50	0,18	-0,01	-0,15
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,17	0,04	-0,08	-0,08	-0,14	0,03	0,13	-0,31	0,36	0,16	-0,37	-0,04	-0,10
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,19	0,45	0,36	-0,48	-0,19	-0,40	0,23	0,18	-0,10	0,19	0,12	0,39	0,35
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,20	0,47	0,37	-0,50	-0,20	-0,41	0,23	0,20	-0,11	0,20	0,13	0,41	0,33
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,05	-0,22	-0,20	0,24	0,04	0,25	-0,06	-0,07	0,01	-0,04	0,00	-0,24	-0,08
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,12	0,26	0,36	-0,22	0,12	-0,38	-0,09	-0,02	0,12	-0,12	-0,09	0,28	0,31
BG [%]	-0,02	0,12	0,14	-0,15	0,01	-0,19	0,00	0,43	-0,43	-0,01	0,40	0,14	0,03

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9c:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (07. April 2002 – Bestockung).

Polarisationsindex	(Xvv+Xhh) <sup>-2</sup>	Lhh-Xww	Lwv/Xhh	Lwv/Xwv	Lhv/Xhh	Lhv/Xwv	Xhh/Lhv	Xwv/Lhv	Lhv-Xhh	Lhv-Xwv	(Lhv+Lhh)/(Lhv-Lhh)	(Lhv+Lwv)/(Lhv-Lwv)
<b>Testfläche 10.3</b>												
FM <sub>B</sub> [g]	0,04	0,38	-0,14	-0,16	0,06	0,08	-0,03	-0,06	-0,02	-0,04	-0,39	-0,25
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,01	0,03	-0,26	0,05	-0,22	0,12	0,25	-0,09	0,29	0,13	0,21	0,00
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,40 *	0,22	0,16	-0,16	0,13	0,21	-0,07	-0,22	0,29	0,29	-0,07	-0,40 *
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,44 *	0,23	0,16	-0,17	0,13	0,22	-0,07	-0,23	0,33	0,33	-0,07	-0,42 *
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,21	0,04	0,05	-0,04	-0,03	-0,11	0,04	0,10	-0,16	-0,16	-0,06	0,03
Halme [m <sup>2</sup> ]	0,10	-0,10	-0,14	0,26	-0,12	0,30	0,17	-0,28	0,20	-0,03	0,24	0,02
BG [%]	0,24	0,12	-0,20	-0,16	0,02	0,07	0,02	-0,10	0,27	0,27	0,01	-0,31
<b>Testfläche 3.2</b>												
FM <sub>B</sub> [g]	0,36	-0,52	0,40	0,16	0,58 *	0,38	-0,62 *	-0,33	-0,75 **	-0,58	0,20	-0,30
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,16	0,14	-0,22	0,16	-0,30	0,14	0,34	-0,10	0,16	-0,14	-0,02	0,09
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,41	0,53	0,47	-0,44	-0,30	-0,43	0,35	0,45	0,40	0,53	-0,36	-0,19
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,45	0,53	0,47	-0,46	-0,30	-0,44	0,35	0,46	0,34	0,49	-0,38	-0,22
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,30	-0,21	-0,19	0,27	0,12	0,09	-0,13	-0,15	0,08	0,01	0,22	0,25
Halme [m <sup>2</sup> ]	-0,31	0,41	0,28	-0,35	-0,42	-0,30	0,43	0,30	0,50	0,43	-0,12	-0,26
BG [%]	-0,29	0,02	-0,03	-0,38	0,05	-0,37	-0,11	0,38	-0,19	0,22	-0,11	-0,18

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwasseranteil, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9c:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (07. April 2002 – Bestockung).

Polarisationsindex	$(L_{hv} - L_{hh}) / (L_{hv} + L_{hh})$	$(L_{hv} - L_{vv}) / (L_{hv} + L_{vv})$	$(L_{hv} + X_{hh}) / (L_{hv} - X_{hh})$	$(L_{hv} + X_{vv}) / (L_{hv} - X_{vv})$	$(L_{hv} - X_{hh}) / (L_{hv} + X_{hh})$	$(L_{hv} - X_{vv}) / (L_{hv} + X_{vv})$	$(L_{vv} - L_{hh}) / (L_{vv} + L_{hh})$	$(L_{vv} - L_{vh}) / (L_{vv} + L_{vh})$	$(L_{vv} - X_{hh}) / (L_{vv} + X_{hh})$		
<b>Testfläche 10.3</b>											
FM <sub>B</sub> [g]	0,36	0,26	-0,02	-0,05	0,03	0,06	0,18	0,17	-0,24	0,22	-0,15
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,15	0,04	0,26	-0,08	-0,24	0,10	-0,29	0,34	0,01	-0,07	-0,24
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,12	0,43 *	-0,05	-0,22	0,08	0,22	-0,43 *	-0,15	-0,48 *	0,45 *	-0,22
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,11	0,44 *	-0,05	-0,23	0,08	0,23	-0,47 *	-0,08	-0,51 *	0,48 *	-0,23
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,09	-0,04	0,04	0,10	-0,04	-0,10	0,20	-0,28	0,11	-0,06	0,00
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,22	-0,01	0,19	-0,28	-0,16	0,29	-0,32	0,08	0,07	-0,08	-0,13
BG [%]	0,01	0,30	0,03	-0,11	-0,01	0,10	-0,41 *	-0,28	-0,39	0,40 *	-0,22
<b>Testfläche 3.2</b>											
FM <sub>B</sub> [g]	-0,11	0,27	-0,62 *	-0,31	0,61	0,34	-0,50	0,14	-0,11	0,07	0,37
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,02	-0,14	0,35	-0,09	-0,33	0,11	0,16	-0,03	0,05	0,04	-0,19
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,35	0,21	0,36	0,45	-0,34	-0,44	0,19	0,04	-0,38	0,46	-0,47
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,37	0,22	0,36	0,47	-0,34	-0,45	0,20	0,08	-0,40	0,47	-0,48
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,22	-0,19	-0,13	-0,18	0,13	0,13	-0,04	-0,23	0,24	-0,31	0,26
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,18	0,27	0,43	0,30	-0,43	-0,30	-0,12	0,34	-0,37	0,40	-0,62 *
BG [%]	0,11	0,12	-0,14	0,38	0,10	-0,38	-0,01	-0,23	-0,17	0,25	-0,01

Polarisationen: w: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwasseranteil, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9c:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (07. April 2002 – Bestockung).

Polarisationsindex	$\frac{(Lw + Xhh)}{(Lvv - Xhh)}$	$\frac{(Lw - Xvv)}{(Lw + Xw)}$	$\frac{(Lw + Xvv)}{(Lw - Xw)}$	$\frac{(Lhh - Lv)}{(Lhh + Lv)}$	$\frac{(Lhh + Lv)}{(Lhh - Lv)}$	$\frac{(Lhh - Xhh)}{(Lhh + Xhh)}$	$\frac{(Lhh + Xhh)}{(Lhh - Xhh)}$	$\frac{(Lhh - Xw)}{(Lhh + Xw)}$	$\frac{(Lhh + Xw)}{(Lhh - Xw)}$	$\frac{(Lv - Xhh)}{(Lv + Xhh)}$	$\frac{(Lv + Xhh)}{(Lv - Xhh)}$
<b>Testfläche 10.3</b>											
FM <sub>B</sub> [g]	0,16	-0,15	0,13	-0,36	0,37	-0,26	0,28	-0,21	0,21	0,05	0,05
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,18	0,06	-0,07	0,19	-0,26	-0,10	0,05	0,18	-0,17	-0,28	-0,28
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,22	-0,17	0,19	-0,23	0,17	0,00	-0,01	0,06	-0,06	0,18	0,18
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,22	-0,18	0,19	-0,24	0,19	0,01	-0,03	0,08	-0,08	0,20	0,20
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,03	-0,06	0,08	-0,01	0,00	-0,12	0,13	-0,15	0,18	-0,10	-0,10
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,12	0,25	-0,21	0,26	-0,29	0,04	-0,04	0,36	-0,34	-0,21	-0,21
BG [%]	0,25	-0,18	0,21	-0,15	0,12	-0,01	0,01	0,05	-0,05	0,11	0,11
<b>Testfläche 3.2</b>											
FM <sub>B</sub> [g]	-0,32	0,11	0,08	0,26	-0,36	0,58 *	-0,53	0,26	0,00	0,56	0,56
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,13	0,16	-0,21	-0,06	0,11	-0,26	0,28	0,09	-0,16	-0,29	-0,29
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,46	-0,41	0,26	-0,47	0,51	-0,52	0,51	-0,44	0,32	-0,25	-0,25
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,47	-0,43	0,26	-0,49	0,52	-0,53	0,53	-0,46	0,33	-0,26	-0,26
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,23	0,18	-0,09	0,23	-0,23	0,26	-0,26	0,18	-0,14	0,12	0,12
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,61 *	-0,35	0,32	-0,24	0,18	-0,49	0,48	-0,28	0,31	-0,43	-0,43
BG [%]	-0,04	-0,31	0,07	-0,14	0,17	0,01	-0,10	-0,29	0,13	0,13	0,13

Polarisationen: w: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdicke, BG: Bedeckungsgrad



**Tab. A-9c:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (07. April 2002 – Bestockung).

Polarisationsindex	$(Lvh + Xhh) / (Lvh - Xhh)$	$(Lv h - Xvv) / (Lv h + Xvv)$	$(Lv h - Xvv) / (Lv h - Xvv)$	$(Lv h + Xvv) / (Lv h + Xvv)$	$(Xhh - Xvv) / (Xhh + Xvv)$	$(Xhh - Xvv) / (Xhh - Xvv)$	$(Xhh + Xvv) / (Xhh + Xvv)$	$Lhh + Lv v + Lhv + Lv h$	$(Lhh + Lv h) / (Xhh + Xvv)$	$(Lhh + Lv h + Lhv + Lv h) / (Lhh + Lv h + Xhh + Xvv)$	Lhh / Rcr	Lw / Rcr	Xvv / Rcr	Xhh / Rcr	
<b>Testfläche 10.3</b>															
FM <sub>B</sub> [g]	-0,03	0,08	-0,06	0,01	0,29	0,20	-0,02	0,07	-0,37	-0,25	-0,07	-0,04			
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,30	0,05	-0,03	0,33	0,15	0,18	-0,10	0,10	0,19	0,00	-0,06	0,27			
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,16	0,33	-0,35	0,07	0,09	0,54 **	0,14	-0,13	-0,17	-0,46 *	-0,29	-0,12			
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,17	0,36	-0,37	0,08	0,11	0,58 **	0,16	-0,14	-0,17	-0,48 *	-0,30	-0,13			
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,10	-0,17	0,16	-0,05	-0,10	-0,17	-0,13	0,13	-0,05	0,07	0,14	0,07			
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,24	0,20	-0,19	0,39	0,29	0,09	0,09	-0,07	0,25	0,04	-0,24	0,20			
BG [%]	-0,10	0,24	-0,27	0,07	0,03	0,36	0,04	-0,04	-0,08	-0,35	-0,18	-0,05			
<b>Testfläche 3.2</b>															
FM <sub>B</sub> [g]	-0,57	0,24	-0,21	-0,18	-0,42	-0,23	0,49	-0,44	0,21	-0,20	-0,28	-0,59 *			
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,30	0,18	-0,16	0,37	-0,05	-0,16	-0,02	0,04	-0,03	0,08	-0,14	0,32			
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,26	-0,35	0,36	-0,12	0,25	0,25	-0,49	0,50	-0,43	-0,30	0,40	0,31			
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,27	-0,37	0,38	-0,13	0,23	0,20	-0,50	0,52	-0,44	-0,32	0,42	0,31			
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,12	0,12	-0,16	0,00	0,08	0,09	0,16	-0,22	0,23	0,23	-0,14	-0,13			
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,44	-0,26	0,28	0,09	0,08	0,30	-0,47	0,46	-0,20	-0,32	0,29	0,44			
BG [%]	-0,16	-0,36	0,35	-0,40	-0,31	-0,09	-0,21	0,22	-0,13	-0,16	0,37	-0,13			

Polarisationen: w: vertikal ko-polarisiert, hv: horizontal ko-polarisiert, vh: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdicke, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9c:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (07. April 2002 – Bestockung).

Polarisationsindex	Rcr / Lhh	Rcr / Lvw	Rcr / Xhh	Rcr / Xvw	Lhh-Rcr	Lvw-Rcr	Xhh-Rcr	Xvw-Rcr	Rcr / (Rcr + (Lvw+Lhh))	(Rcr+Lhh) / (Rcr - Lhh)	(Rcr+Lvw) / (Rcr - Lvw)	(Rcr-Lhh) / (Rcr + Lvw)	
<b>Testfläche 10.3</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	0,35	0,24	0,08	0,10	0,37	0,27	0,05	0,08	0,33	-0,38	-0,23	0,37	0,25
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,16	0,02	-0,23	0,10	-0,24	-0,09	-0,38	-0,21	-0,09	0,24	0,04	-0,17	0,01
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,19	0,46 *	0,18	0,27	0,07	0,32	-0,18	-0,15	0,33	-0,12	-0,43 *	0,18	0,46 *
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,19	0,49 *	0,19	0,29	0,06	0,33	-0,20	-0,17	0,34	-0,13	-0,45 *	0,18	0,48 *
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,05	-0,08	-0,06	-0,15	0,09	-0,02	0,09	0,07	-0,01	-0,03	0,05	0,05	-0,08
Halme [m <sup>2</sup> ]	-0,24	-0,04	-0,15	0,26	-0,29	-0,12	-0,29	-0,05	-0,16	0,27	0,05	-0,25	-0,04
BG [%]	0,09	0,34	0,08	0,13	0,01	0,26	-0,13	-0,10	0,22	-0,06	-0,36	0,08	0,35
<b>Testfläche 3.2</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	-0,15	0,19	0,56	0,32	-0,14	0,33	0,64 *	0,44	0,00	0,29	-0,19	-0,19	0,20
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,01	-0,12	-0,29	0,18	0,12	0,01	-0,07	0,23	-0,05	-0,07	0,03	0,02	-0,10
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,40	0,28	-0,27	-0,39	0,43	0,32	-0,27	-0,40	0,38	-0,44	-0,33	0,42	0,30
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,42	0,29	-0,27	-0,40	0,48	0,37	-0,21	-0,37	0,40	-0,46	-0,35	0,44	0,31
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,22	-0,19	0,12	0,08	-0,36	-0,39	-0,13	-0,04	-0,23	0,23	0,28	-0,23	-0,21
Halme [m <sup>2</sup> ]	0,23	0,32	-0,43	-0,28	0,14	0,27	-0,47	-0,38	0,28	-0,15	-0,33	0,21	0,32
BG [%]	0,11	0,12	0,07	-0,36	0,23	0,29	0,26	-0,19	0,14	-0,14	-0,22	0,12	0,15

Polarisationen: vw: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9c:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (07. April 2002 – Bestockung).

Polarisationsindex	$(Rcr + Xhh) / (Rcr - Xhh)$	$(Rcr + Xw) / (Rcr - Xw)$	$(Rcr - Xhh) / (Rcr + Xhh)$	$(Rcr - Xw) / (Rcr + Xw)$
<b>Testfläche 10.3</b>				
FM <sub>B</sub> [g]	-0,03	-0,06	0,04	0,07
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,28	-0,05	-0,26	0,07
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,10	-0,29	0,14	0,28
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,12	-0,31	0,14	0,30
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,07	0,13	-0,07	-0,14
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,21	-0,24	-0,19	0,25
BG [%]	-0,04	-0,20	0,05	0,17
<b>Testfläche 3.2</b>				
FM <sub>B</sub> [g]	-0,60 *	-0,26	0,59 *	0,30
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,33	-0,12	-0,31	0,15
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,31	0,41	-0,30	-0,40
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,32	0,43	-0,30	-0,41
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,13	-0,17	0,13	0,13
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,44	0,29	-0,44	-0,28
BG [%]	-0,15	0,37	0,11	-0,37

**Tab. A-9d:** Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2002 – Schossen).

Polarisationsindex	Lvv/Lhh	Lvh/Lhh	Lvh/Lw	Lhh/Lw	Lvh/Lvh	Lw/Lvh	Lhh/Lw	Lhh/Lw	Lhh-Lvv	Xhh-Xw	Xhh/Xw	Lw / (Lvv+Lhh)	Xw / (Xvv+Xhh)	(Lhv+Lvhh) / ((Lhv+Lvhh) + (Lwv+Lhh)) <sup>2</sup>
<b>Testfläche 10.3</b>														
FM <sub>B</sub> [g]	-0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	-0,02	0,01	0,01	-0,01	-0,13	0,14	-0,01	-0,13	-0,01
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,16	0,03	-0,12	-0,04	-0,04	0,09	-0,13	0,13	0,13	-0,04	0,08	0,15	-0,11	-0,09
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,09	-0,23	-0,34	0,24	0,24	0,37	-0,09	0,09	0,09	-0,29	0,32	0,09	-0,31	-0,27
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,00	-0,27	-0,30	0,29	0,29	0,33	0,00	0,01	0,01	-0,25	0,30	0,00	-0,28	-0,29
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,33	0,10	-0,20	-0,13	-0,13	0,18	-0,31	0,32	0,32	-0,19	0,13	0,32	-0,14	-0,01
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,34	-0,06	-0,40 *	0,05	0,05	0,40 *	-0,33	0,34	0,34	-0,31	0,35	0,34	-0,34	-0,19
BG [%]	0,09	-0,08	-0,19	0,09	0,09	0,19	-0,09	0,09	0,09	-0,27	0,37	0,09	-0,36	-0,13
<b>Testfläche 3.2</b>														
FM <sub>B</sub> [g]	-0,20	-0,30	0,02	0,35	0,35	-0,01	0,26	0,26	-0,22	0,16	-0,25	-0,23	0,24	-0,19
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,00	0,20	0,35	-0,24	-0,24	-0,27	0,09	0,09	-0,04	0,00	0,02	-0,05	-0,02	0,33
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,62 **	0,41	-0,47	-0,47	-0,47	0,53 *	-0,60 *	0,66 **	0,66 **	0,39	-0,27	0,61 **	0,28	-0,11
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,51 *	0,30	-0,40	-0,37	-0,37	0,48 *	-0,48	0,56 *	0,56 *	0,35	-0,24	0,50 *	0,24	-0,13
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,57 *	0,53 *	-0,33	-0,57 *	-0,57 *	0,33	-0,59 *	0,58 *	0,58 *	0,25	-0,14	0,58 *	0,15	0,08
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,46	0,31	-0,38	-0,38	-0,38	0,42	-0,50 *	0,54 *	0,54 *	0,41	-0,33	0,49 *	0,35	-0,13
BG [%]	0,54 *	0,50 *	-0,29	-0,54 *	-0,54 *	0,32	-0,54 *	0,55 *	0,55 *	0,20	-0,09	0,54 *	0,10	0,09

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwasseranteil, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9d:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2002 – Schossen).

Polarisationsindex	$(X_{vv}+X_{hh})^{-2}$	Lhh-Xhh	Lhh-Xvv	Lvv/Xhh	Lvv/Xvv	Lhv/Xhh	Lhv/Xvv	Xhh/Lhv	Xvv/Lhv	Lhv-Xhh	Lhv-Xvv	$(L_{hv}+L_{hh}) / (L_{hv}-L_{hh})$	$(L_{hv}+L_{vv}) / (L_{hv}-L_{vv})$
<b>Testfläche 10.3</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	0,00	-0,05	-0,19	-0,01	0,20	0,01	0,19	0,00	-0,18	-0,10	-0,22	0,07	0,00
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,30	0,28	0,31	-0,27	-0,27	-0,37	-0,41 *	0,33	0,39 *	0,42 *	0,44 *	0,06	0,19
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,36	0,22	0,00	-0,20	0,06	-0,31	-0,11	0,36	0,11	0,26	0,06	0,11	0,22
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,42 *	0,20	0,01	-0,23	-0,02	-0,33	-0,18	0,38	0,17	0,28	0,11	0,18	0,20
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,35	0,02	-0,15	0,15	0,48 *	0,06	0,34	-0,13	-0,35	-0,05	-0,21	-0,20	0,14
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,34	0,35	0,14	-0,22	0,13	-0,36	-0,10	0,36	0,10	0,28	0,07	-0,08	0,28
BG [%]	-0,70 **	0,47 *	0,33	-0,47 *	-0,31	-0,55 **	-0,41 *	0,61 **	0,42 *	0,48 *	0,32	0,04	0,12
<b>Testfläche 3.2</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	0,27	-0,38	-0,28	0,15	0,04	0,39	0,21	-0,39	-0,21	-0,35	-0,23	0,30	-0,10
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,13	0,24	0,23	-0,31	-0,36	-0,35	-0,35	0,34	0,31	0,41	0,37	-0,11	-0,09
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,52 *	0,48	0,66 **	0,25	0,10	-0,30	-0,51 *	0,24	0,46	0,24	0,45	-0,50 *	0,58 *
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,47	0,41	0,57 *	0,22	0,09	-0,26	-0,44	0,20	0,40	0,20	0,38	-0,41	0,52 *
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,43	0,51 *	0,62 **	0,12	0,02	-0,37	-0,49 *	0,31	0,45	0,35	0,46	-0,52 *	0,41
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,31	0,25	0,45	0,35	0,18	-0,07	-0,33	0,00	0,27	0,02	0,26	-0,37	0,52 *
BG [%]	-0,37	0,54 *	0,62 **	0,06	-0,02	-0,44	-0,52 *	0,38	0,48	0,45	0,52 *	-0,53 *	0,41

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9d:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2002 – Schossen).

Polarisationsindex	$\frac{(Lhv - Lhh)}{(Lhv + Lhh)}$	$\frac{(Lhv - Lvw)}{(Lhv + Lvw)}$	$\frac{(Lhv + Xhh)}{(Lhv - Xhh)}$	$\frac{(Lhv + Xvw)}{(Lhv - Xvw)}$	$\frac{(Lhv - Xhh)}{(Lhv + Xhh)}$	$\frac{(Lhv - Xvw)}{(Lhv + Xvw)}$	$\frac{(Lvw - Lhh)}{(Lvw + Lhh)}$	$\frac{(Lvw - Lvh)}{(Lvw + Lvh)}$	$\frac{(Lvw + Lvh)}{(Lvw - Lvh)}$	$\frac{(Lvw - Xhh)}{(Lvw + Xhh)}$
<b>Testfläche 10.3</b>										
FM <sub>B</sub> [g]	-0,03	-0,02	0,00	-0,16	0,00	0,18	-0,01	0,08	0,03	0,02
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,05	-0,22	0,28	0,36	-0,34	-0,40 *	0,15	-0,23	-0,06	-0,24
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,11	-0,23	0,37	0,10	-0,35	-0,11	0,09	0,32	-0,40 *	-0,24
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,17	-0,20	0,40 *	0,17	-0,37	-0,17	0,00	0,35	-0,36	-0,27
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,17	-0,15	-0,17	-0,35	0,11	0,35	0,32	-0,22	-0,16	0,17
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,07	-0,31	0,35	0,11	-0,37	-0,10	0,34	0,24	-0,39 *	-0,22
BG [%]	-0,04	-0,15	0,62 **	0,42 *	-0,60 **	-0,42 *	0,09	0,32	-0,20	-0,51 **
<b>Testfläche 3.2</b>										
FM <sub>B</sub> [g]	-0,26	0,12	-0,37	-0,25	0,39	0,21	-0,23	-0,23	0,01	0,15
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,09	0,17	0,34	0,22	-0,34	-0,33	-0,05	-0,08	0,16	-0,35
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,49 *	-0,53 *	0,19	0,36	-0,25	-0,48	0,61 **	0,33	-0,58 *	0,23
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,40	-0,44	0,16	0,31	-0,22	-0,42	0,50 *	0,23	-0,55 *	0,18
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,51 *	-0,44	0,26	0,36	-0,33	-0,46	0,58 *	0,42	-0,31	0,12
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,34	-0,49 *	-0,07	0,17	-0,02	-0,30	0,49 *	0,37	-0,46	0,34
BG [%]	0,51 *	-0,39	0,33	0,42	-0,40	-0,50 *	0,54 *	0,29	-0,35	0,04

Polarisationen: w: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwasseranteil, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9d:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2002 – Schossen).

Polarisationsindex	$(L_{vv} + X_{hh}) / (L_{vv} - X_{hh})$	$(L_{vv} - X_{vv}) / (L_{vv} + X_{vv})$	$(L_{hh} - L_{vh}) / (L_{hh} + L_{vh})$	$(L_{hh} - X_{hh}) / (L_{hh} + X_{hh})$	$(L_{hh} - X_{vv}) / (L_{hh} + X_{vv})$	$(L_{hh} + X_{vv}) / (L_{hh} - X_{vv})$	$(L_{vh} - X_{hh}) / (L_{vh} + X_{hh})$
<b>Testfläche 10.3</b>							
FM <sub>B</sub> [g]	0,00	0,20	0,00	-0,03	0,02	-0,18	0,19
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,03	-0,25	-0,04	0,03	-0,30	-0,02	-0,33
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,20	0,06	0,23	-0,25	-0,26	0,08	-0,01
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,25	-0,03	0,28	-0,30	-0,25	0,05	-0,03
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,23	0,47 *	-0,12	0,16	0,00	0,14	0,18
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,07	0,13	0,05	-0,05	-0,37	-0,03	-0,14
BG [%]	0,38	-0,31	0,09	-0,11	-0,52	0,14	-0,35
<b>Testfläche 3.2</b>							
FM <sub>B</sub> [g]	0,17	0,04	0,34	-0,38	0,37	-0,13	0,30
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,02	-0,37	-0,23	0,26	-0,24	0,10	-0,26
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,11	0,11	-0,45	0,51 *	-0,47	-0,29	-0,62 **
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,07	0,08	-0,35	0,41	-0,39	-0,19	-0,52 *
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,45	0,05	-0,56 *	0,59 *	-0,52 *	-0,36	-0,63 **
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,05	0,19	-0,36	0,43	-0,24	-0,48	-0,41
BG [%]	-0,21	-0,01	-0,53 *	0,57 *	-0,55 *	-0,21	-0,64 **

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwasseranteil, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9d:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2002 – Schossen).

Polarisationsindex	$\frac{(Lvh + Xhh)}{(Lvh - Xhh)}$	$\frac{(Lvh - Xvv)}{(Lvh + Xvv)}$	$\frac{(Lvh + Xvv)}{(Lvh - Xvv)}$	$\frac{(Xhh - Xvv)}{(Xhh + Xvv)}$	$\frac{(Xhh + Xvv)}{(Xhh - Xvv)}$	$\frac{Lhh + Lv + Lvh}{(Xhh + Xw)}$	$\frac{(Lhh + Lv + Lvh)}{(Lhh + Lw + Lvh)}$	$\frac{(Xhh + Xw)}{(Lhh + Lw + Lvh)}$	Lhh / Rcr	Lvv / Rcr	Xvv / Rcr	Xhh / Rcr
<b>Testfläche 10.3</b>												
FM <sub>B</sub> [g]	-0,01	0,21	-0,18	0,13	-0,16	-0,38	0,12	-0,12	0,02	-0,01	-0,20	-0,01
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,24	-0,33	0,27	0,11	0,19	0,36	-0,42 *	0,38	0,00	0,15	0,36	0,31
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,46 *	-0,25	0,27	0,31	-0,17	-0,10	-0,29	0,29	0,18	0,31	0,18	0,40 *
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,49 *	-0,30	0,33	0,28	-0,16	-0,14	-0,33	0,34	0,23	0,28	0,24	0,43 *
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,15	0,31	-0,31	0,14	-0,04	0,21	0,24	-0,25	-0,16	0,17	-0,34	-0,12
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,44 *	-0,21	0,24	0,34	-0,17	-0,02	-0,31	0,31	-0,01	0,36	0,16	0,40 *
BG [%]	0,65 **	-0,48 *	0,49 *	0,36	-0,15	-0,02	-0,62 **	0,63 **	0,06	0,17	0,46 *	0,62 **
<b>Testfläche 3.2</b>												
FM <sub>B</sub> [g]	-0,30	0,08	-0,20	-0,24	0,27	-0,16	0,27	-0,28	0,32	-0,06	-0,16	-0,35
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,10	-0,13	-0,03	0,02	0,03	0,42	-0,35	0,30	-0,17	-0,22	0,21	0,25
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,29	-0,51 *	0,44	-0,28	0,21	0,09	-0,42	0,37	-0,49 *	0,55 *	0,50 *	0,28
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,29	-0,48	0,41	-0,24	0,19	0,06	-0,37	0,33	-0,39	0,48	0,45	0,26
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,22	-0,36	0,31	-0,15	0,08	0,19	-0,42	0,37	-0,55 *	0,39	0,41	0,29
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,05	-0,25	0,20	-0,35	0,21	-0,14	-0,17	0,10	-0,37	0,47	0,26	-0,02
BG [%]	0,32	-0,42	0,40	-0,10	-0,03	0,38	-0,49	0,44	-0,53 *	0,36	0,46	0,38

Polarisationen: v: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwasserhalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad



**Tab. A-9d:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2002 – Schossen).

Polarisationsindex	Rcr / Lhh	Rcr / Lw	Rcr / Xhh	Rcr / Xvv	Lhh-Rcr	Lvv-Rcr	Xhh-Rcr	Xvv-Rcr	Rcr / (Rcr + (Lvv+Lhh))	(Rcr+Lhh) / (Rcr-Lhh)	(Rcr+Lvv) / (Rcr-Lvv)	(Rcr-Lhh) / (Rcr+Lhh)	(Rcr-Lvv) / (Rcr+Lvv)
<b>Testfläche 10.3</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	0,00	0,00	0,02	0,21	0,09	0,10	0,12	0,25	-0,01	0,04	-0,02	-0,01	0,00
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,01	-0,17	-0,35	-0,39	-0,12	-0,24	-0,38	-0,40 *	-0,09	0,02	0,12	0,00	-0,16
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,17	-0,29	-0,35	-0,17	-0,18	-0,27	-0,36	-0,17	-0,27	0,18	0,32	-0,18	-0,30
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,22	-0,26	-0,36	-0,24	-0,22	-0,24	-0,37	-0,21	-0,28	0,25	0,29	-0,23	-0,27
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,13	-0,19	0,04	0,33	0,06	-0,19	0,03	0,19	-0,01	-0,18	0,15	0,15	-0,17
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,00	-0,36	-0,39	-0,15	-0,04	-0,32	-0,37	-0,16	-0,20	-0,01	0,35	0,00	-0,36
BG [%]	-0,06	-0,18	-0,57 **	-0,44 *	-0,08	-0,16	-0,53 **	-0,37	-0,13	0,07	0,17	-0,06	-0,17
<b>Testfläche 3.2</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	-0,27	0,08	0,35	0,14	-0,27	0,10	0,29	0,15	-0,19	0,34	-0,05	-0,30	0,06
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,14	0,28	-0,28	-0,27	0,04	0,09	-0,30	-0,25	0,33	-0,19	-0,13	0,17	0,25
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,45	-0,49 *	-0,32	-0,53 *	0,43	-0,59 *	-0,29	-0,48	-0,11	-0,51 *	0,59 *	0,48	-0,53 *
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,34	-0,41	-0,30	-0,48	0,34	-0,52 *	-0,27	-0,44	-0,13	-0,41	0,54 *	0,38	-0,46
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,53 *	-0,39	-0,33	-0,44	0,47	-0,44	-0,30	-0,40	0,08	-0,56 *	0,36	0,54 *	-0,39
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,31	-0,43	-0,04	-0,30	0,43	-0,42	0,02	-0,23	-0,13	-0,40	0,50 *	0,35	-0,45
BG [%]	0,50 *	-0,34	-0,43	-0,49 *	0,35	-0,49 *	-0,43	-0,49 *	0,09	-0,56 *	0,39	0,52 *	-0,35

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwasserhalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9d:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (08. Mai 2002 – Schossen).

Polarisationsindex	$(Rcr + Xhh) / (Rcr - Xhh)$	$(Rcr + Xvw) / (Rcr - Xvw)$	$(Rcr - Xhh) / (Rcr + Xhh)$	$(Rcr - Xvw) / (Rcr + Xvw)$
<b>Testfläche 10.3</b>				
FM <sub>B</sub> [g]	-0,01	-0,18	0,01	0,20
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,26	0,33	-0,32	-0,37
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,42 *	0,19	-0,39	-0,18
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,45 *	0,25	-0,41 *	-0,24
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,16	-0,34	0,10	0,33
Halme [m <sup>2</sup> ]	0,40 *	0,17	-0,40 *	-0,16
BG [%]	0,64 **	0,46 *	-0,61 **	-0,45 *
<b>Testfläche 3.2</b>				
FM <sub>B</sub> [g]	-0,35	-0,22	0,35	0,15
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,23	0,08	-0,26	-0,23
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,25	0,42	-0,29	-0,51
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,23	0,38	-0,27	-0,46
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,25	0,34	-0,30	-0,42
Halme [m <sup>2</sup> ]	-0,06	0,19	0,00	-0,28
BG [%]	0,33	0,42	-0,39	-0,47

**Tab. A-9e:** Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (05. Juni 2002 – Ährenschieben).

Polarisationsindex	Lw/Lhh	Lvh/Lhh	Lvh/Lvv	Lhh/Lvh	Lhh/Lvv	Lvv/Lvh	Lhh/Lw	Lhh-Lw	Xhh-Xw	Xhh/Xw	Lvv / (Lvv+Lhh)	Xw / (Xw+Xhh)	(Lhv+Lvh) / ((Lhv+Lvh) + (Lvv+Lhh)) <sup>-2</sup>
<b>Testfläche 10.3</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	-0,11	0,07	0,19	-0,03	0,12	-0,19	-0,17	0,28	-0,26	-0,12	0,26	0,13	0,18
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,12	0,04	0,20	-0,06	0,12	-0,20	-0,15	0,28	-0,22	-0,12	0,21	0,15	0,41 *
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,09	0,00	-0,07	-0,05	-0,09	0,07	0,10	-0,11	0,13	0,09	-0,14	0,00	0,20
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,21	0,10	-0,09	-0,12	-0,21	0,09	0,21	-0,10	0,11	0,21	-0,11	0,03	0,13
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,07	-0,13	-0,06	0,07	0,07	0,05	-0,05	-0,12	0,14	-0,07	-0,16	-0,06	0,19
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,05	-0,10	-0,05	0,06	0,05	0,05	-0,02	-0,01	0,05	-0,05	-0,07	-0,03	0,14
BG [%]	-0,22	-0,02	0,24	-0,01	0,21	-0,22	-0,21	-0,17	0,19	-0,22	-0,18	0,16	0,16
<b>Testfläche 3.2</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	0,36	-0,07	-0,52 *	0,00	-0,40	0,51	0,43	-0,14	0,10	0,38	-0,10	-0,32	-0,24
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,02	0,25	0,25	-0,20	-0,01	-0,26	-0,07	0,10	-0,10	0,01	0,09	0,28	0,37
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,08	0,05	0,13	0,03	0,13	-0,15	-0,18	0,19	-0,18	-0,11	0,17	0,07	0,18
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,08	0,21	0,12	-0,14	-0,02	-0,18	-0,02	-0,09	0,12	0,04	-0,12	0,19	0,19
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,21	-0,24	-0,01	0,24	0,19	0,07	-0,19	0,38	-0,40	-0,20	0,39	-0,19	-0,04
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,17	-0,06	0,09	0,12	0,20	-0,14	-0,25	-0,05	0,07	-0,19	-0,06	-0,01	0,13
BG [%]	0,06	0,28	0,27	-0,26	-0,03	-0,27	-0,03	0,01	-0,01	0,04	0,03	0,30	0,38

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesgehalt, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9e:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (05. Juni 2002 – Ährenschieben).

Polarisationsindex	$(X_{vv}+X_{hh})^{-2}$	Lhh-Xhh	Lhh-Xvw	Lvw/Xhh	Lvw/Xvw	Lhv/Xhh	Lhv/Xvw	Lhv/Xvh	Xvh/Lhv	Lhv-Xhh	Lhv-Xvw	$(L_{hv}+L_{hh}) / (L_{hv}-L_{hh})$
<b>Testfläche 10.3</b>												
FM <sub>B</sub> [g]	-0,40	0,23	0,34	-0,31	-0,46 *	-0,27	-0,43 *	0,27	0,39	0,26	0,34	0,00
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,81 **	0,67 **	0,67 **	-0,73 **	-0,73 **	-0,77 **	-0,73 **	0,80 **	0,76 **	0,74 **	0,70 **	-0,09
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,31	0,44 *	0,26	-0,38	-0,17	-0,47 *	-0,21	0,49 *	0,25	0,44 *	0,27	-0,12
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,15	0,31	0,17	-0,18	-0,05	-0,26	-0,09	0,26	0,11	0,24	0,13	-0,16
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,33	0,39	0,22	-0,43 *	-0,19	-0,52 **	-0,22	0,54 *	0,27	0,50 *	0,30	-0,01
Halme [m <sup>2</sup> ]	-0,56 **	0,45 *	0,33	-0,50 *	-0,32	-0,59 **	-0,35	0,62 **	0,41 *	0,48 *	0,35	-0,04
BG [%]	-0,04	0,16	0,02	-0,24	-0,06	-0,10	0,09	0,13	-0,04	0,08	-0,03	-0,11
<b>Testfläche 3.2</b>												
FM <sub>B</sub> [g]	0,31	-0,04	-0,23	0,35	0,57 *	0,10	0,32	-0,10	-0,31	-0,03	-0,24	-0,11
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	-0,13	0,17	0,40	-0,20	-0,37	-0,11	-0,31	0,09	0,28	0,13	0,29	-0,12
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,05	-0,04	0,18	-0,07	-0,25	0,00	-0,30	0,00	0,31	0,06	0,35	0,13
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,39	0,30	0,37	-0,29	-0,28	-0,32	-0,26	0,33	0,26	0,28	0,21	-0,07
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,48	-0,47	-0,28	0,33	0,07	0,44	-0,02	-0,45	0,04	-0,31	0,16	0,26
Halme [m <sup>2</sup> ]	-0,11	0,04	-0,01	-0,19	-0,16	-0,22	-0,19	0,22	0,22	0,30	0,28	0,22
BG [%]	0,02	0,15	0,25	-0,10	-0,21	0,02	-0,08	0,03	0,05	0,06	0,09	-0,20

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergerhalt, Halme: Bestandesgerhalt, BG: Bedeckungsgerd

**Tab. A-9e:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (05. Juni 2002 – Ährenschieben).

Polarisationsindex	$\frac{(Lhv - Lhh)}{(Lhv + Lhh)}$	$\frac{(Lhv - Lv)}{(Lhv + Lv)}$	$\frac{(Lhv + Xhh)}{(Lhv - Xhh)}$	$\frac{(Lhv + Xvv)}{(Lhv - Xvv)}$	$\frac{(Lhv - Xhh)}{(Lhv + Xhh)}$	$\frac{(Lhv - Xww)}{(Lhv + Xww)}$	$\frac{(Lw - Lhh)}{(Lw + Lhh)}$	$\frac{(Lw - Lvh)}{(Lw + Lvh)}$	$\frac{(Lw - Lhh)}{(Lw - Lhh)}$	$\frac{(Lw - Lvh)}{(Lw + Lvh)}$	$\frac{(Lw + Lvh)}{(Lw - Lvh)}$	$\frac{(Lw - Xhh)}{(Lw + Xhh)}$
<b>Testfläche 10.3</b>												
FM <sub>B</sub> [g]	0,05	0,19	0,27	0,36	-0,27	-0,41 *	-0,12	-0,05	-0,19	0,20	0,20	-0,31
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,07	0,21	0,81 **	0,78 **	-0,79 **	-0,75 **	-0,12	0,29	-0,20	0,19	0,19	-0,75 **
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,07	-0,02	0,49 *	0,26	-0,48 *	-0,24	0,09	0,48 *	0,07	-0,07	-0,07	-0,38
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,14	-0,07	0,26	0,11	-0,26	-0,10	0,21	0,48 *	0,09	-0,09	-0,09	-0,18
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,05	0,01	0,55 **	0,30	-0,54 **	-0,26	-0,07	0,36	0,06	-0,05	-0,05	-0,44 *
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,01	0,04	0,63 **	0,44 *	-0,61 **	-0,39	-0,05	0,40	0,05	-0,04	-0,04	-0,52 **
BG [%]	0,06	0,32	0,13	-0,01	-0,12	0,06	-0,22	0,38	-0,23	0,20	0,20	-0,24
<b>Testfläche 3.2</b>												
FM <sub>B</sub> [g]	0,01	-0,50	-0,09	-0,30	0,10	0,32	0,38	-0,49	0,52 *	-0,47	-0,47	0,34
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,19	0,23	0,07	0,20	-0,10	-0,29	0,01	-0,01	-0,26	0,28	0,28	-0,19
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,03	0,12	0,00	0,32	0,00	-0,30	-0,11	0,21	-0,15	0,16	0,16	-0,07
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,17	0,16	0,32	0,24	-0,32	-0,26	0,04	0,07	-0,16	0,26	0,26	-0,28
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,28	-0,09	-0,45	0,07	0,45	-0,03	-0,20	0,17	0,04	-0,17	-0,17	0,31
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,14	0,08	0,21	0,26	-0,22	-0,21	-0,19	0,23	-0,12	0,21	0,21	-0,17
BG [%]	0,23	0,23	0,07	-0,02	-0,01	-0,06	0,04	0,10	-0,27	0,24	0,24	-0,13

Polarisationen: w: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwasseranteil, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9e:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (05. Juni 2002 – Ährenschieben).

Polarisationsindex	$(Lw + Xhh) / (Lw - Xhh)$	$(Lw - Xvv) / (Lw + Xvv)$	$(Lvv + Xww) / (Lw - Xww)$	$(Lhh - Lvhh) / (Lhh + Lvhh)$	$(Lhh + Lvhh) / (Lhh - Lvhh)$	$(Lhh - Xhh) / (Lhh + Xhh)$	$(Lhh + Xhh) / (Lhh - Xhh)$	$(Lhh - Xww) / (Lhh + Xww)$	$(Lhh + Xww) / (Lhh - Xww)$	$(Lvhh - Xhh) / (Lvhh + Xhh)$
<b>Testfläche 10.3</b>										
FM <sub>B</sub> [g]	0,31	-0,44	0,25	-0,04	-0,02	-0,27	0,33	-0,39	0,33	-0,26
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,75 **	-0,76 **	0,74 **	-0,06	0,10	-0,73 **	0,74 **	-0,70 **	0,67 **	-0,76 **
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,39	-0,20	0,27	-0,03	0,11	-0,47 *	0,48 *	-0,24	0,34	-0,49 *
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,17	-0,07	0,07	-0,11	0,17	-0,32	0,30	-0,15	0,21	-0,26
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,46 *	-0,23	0,38	0,09	0,01	-0,44 *	0,46 *	-0,20	0,31	-0,55 **
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,55 *	-0,37	0,48 *	0,08	0,01	-0,53 **	0,55 **	-0,34	0,40	-0,64 **
BG [%]	0,21	-0,06	0,08	0,00	0,06	-0,14	0,07	0,04	-0,11	-0,16
<b>Testfläche 3.2</b>										
FM <sub>B</sub> [g]	-0,05	0,59 *	0,06	0,02	0,08	0,06	0,31	0,20	-0,24	0,06
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,19	-0,36	0,12	-0,21	0,15	-0,19	-0,21	-0,41	0,26	-0,06
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,12	-0,28	-0,11	0,01	-0,10	0,01	0,22	-0,17	-0,15	0,03
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,28	-0,28	0,13	-0,16	0,07	-0,31	0,09	-0,36	0,09	-0,33
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,25	0,05	-0,31	0,24	-0,23	0,45	0,15	0,28	-0,30	0,49
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,04	-0,19	-0,25	0,10	-0,18	-0,04	0,15	0,02	-0,24	-0,18
BG [%]	0,24	-0,22	0,20	-0,27	0,24	-0,16	0,27	-0,29	0,02	0,04

Polarisationen: w: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9e:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (05. Juni 2002 – Ährenschieben).

Polarisationsindex	$(Lvh + Xhh) / (Lvh - Xhh)$	$(Lvh - Xvv) / (Lvh + Xvv)$	$(Lvvh - Xvv) / (Lvvh + Xvv)$	$(Lvvh + Xvv) / (Lvvh - Xvv)$	$(Xhh - Xvv) / (Xhh + Xvv)$	$(Xhh + Xvv) / (Xhh - Xvv)$	$Lhh + Lvv + Lhv + Lvh$	$(Lhh + Lvv + Lhv + Lvh) / (Xhh + Xvv)$	$(Xhh + Xvv) / (Lhh + Lvv + Lhv + Lvh)$	$Lhh / Rcr$	$Lw / Rcr$	$Xvv / Rcr$	$Xhh / Rcr$
<b>Testfläche 10.3</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	0,26	-0,40	0,35	0,77 **	-0,26	0,57 **	0,18	-0,43 *	0,40	-0,03	-0,20	0,39	0,26
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,79 **	-0,74 **	0,77 **	0,11	-0,21	0,11	0,47	-0,86 **	0,87 **	-0,07	-0,20	0,76 **	0,79 **
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,50 *	-0,25	0,28	0,00	0,14	0,00	0,26	-0,36	0,39	-0,06	0,05	0,26	0,49 *
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,26	-0,11	0,12	-0,03	0,11	-0,03	0,15	-0,19	0,20	-0,13	0,08	0,11	0,26
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,57 **	-0,28	0,32	0,47 *	0,16	0,02	0,29	-0,37	0,42 *	0,06	0,02	0,28	0,55 **
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,65 **	-0,42 *	0,47 *	0,11	0,07	0,11	0,21	-0,51 *	0,55 **	0,03	0,01	0,43 *	0,63 **
BG [%]	0,17	0,02	0,02	0,02	0,18	-0,15	0,11	-0,05	0,07	-0,04	-0,27	-0,03	0,14
<b>Testfläche 3.2</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	-0,03	0,24	-0,24	0,46	0,10	0,46	-0,03	0,35	-0,33	-0,02	0,50	-0,28	-0,08
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,03	-0,23	0,15	-0,52	-0,09	-0,52	0,32	-0,32	0,29	-0,18	-0,25	0,24	0,07
FM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,03	-0,24	0,27	-0,36	-0,17	-0,36	0,23	-0,16	0,17	0,04	-0,14	0,28	-0,01
TM <sub>v</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,31	-0,24	0,23	-0,40	0,12	-0,40	0,07	-0,42	0,43	-0,14	-0,18	0,25	0,33
WG <sub>v</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,47	0,02	0,03	0,07	-0,39	0,07	0,19	0,38	-0,38	0,26	0,09	0,01	-0,47
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,18	-0,14	0,20	0,05	0,06	0,05	0,24	-0,21	0,22	0,14	-0,12	0,18	0,20
BG [%]	0,01	0,02	-0,10	-0,23	-0,03	-0,23	0,30	-0,13	0,15	-0,24	-0,25	0,01	0,00

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodentrockengewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad

**Tab. A-9e:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (05. Juni 2002 – Ährenschieben).

Polarisationsindex	Rcr / Lhh	Rcr / Lw	Rcr / Xhh	Rcr / Xw	Lhh-Rcr	Lvv-Rcr	Xhh-Rcr	Xw-Rcr	Rcr / (Rcr + (Lvv+Lhh))	(Rcr+Lvh) / (Rcr-Lvh)	(Rcr-Lhh) / (Rcr+Lhh)	(Rcr - Lw) / (Rcr + Lw)	
<b>Testfläche 10.3</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	0,06	0,19	-0,26	-0,43 *	-0,06	0,09	-0,25	-0,33	0,13	0,01	-0,21	0,05	0,20
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,05	0,21	-0,75 **	-0,72 **	-0,18	-0,07	-0,73 **	-0,69 **	0,14	-0,09	-0,19	0,06	0,21
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,03	-0,05	-0,48 *	-0,21	-0,09	-0,21	-0,46 *	-0,28	0,00	-0,11	0,06	0,05	-0,05
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,11	-0,08	-0,26	-0,09	0,04	-0,15	-0,25	-0,13	0,03	-0,16	0,09	0,12	-0,08
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,10	-0,02	-0,53 **	-0,23	-0,23	-0,22	-0,52 **	-0,32	-0,06	-0,01	0,03	-0,07	-0,02
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,07	0,00	-0,61 **	-0,37	-0,15	-0,15	-0,51 *	-0,37	-0,04	-0,02	0,01	-0,05	-0,01
BG [%]	0,01	0,28	-0,13	0,07	0,03	0,23	-0,12	0,00	0,16	-0,08	-0,24	0,03	0,28
<b>Testfläche 3.2</b>													
FM <sub>B</sub> [g]	-0,05	-0,52 *	0,09	0,28	-0,05	-0,49	0,00	0,20	-0,33	-0,09	0,47	0,00	-0,51
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,24	0,24	-0,09	-0,28	0,13	0,21	-0,10	-0,26	0,28	-0,13	-0,26	0,20	0,25
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,04	0,12	0,01	-0,27	-0,08	0,10	-0,04	-0,32	0,07	0,12	-0,13	-0,02	0,13
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,22	0,13	-0,32	-0,26	0,15	0,17	-0,29	-0,21	0,19	-0,07	-0,24	0,16	0,16
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,26	-0,03	0,47	0,01	-0,31	-0,13	0,36	-0,13	-0,18	0,24	0,18	-0,26	-0,06
Halme [m <sup>-2</sup> ]	-0,08	0,08	-0,20	-0,15	-0,17	0,07	-0,27	-0,24	-0,01	0,20	-0,16	-0,12	0,10
BG [%]	0,26	0,25	0,04	-0,04	0,18	0,21	-0,01	-0,03	0,30	-0,22	-0,21	0,25	0,25

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, FMB: Bodenfrischgewicht, WGB: volum. Bodenfeuchte, FMV: Biomasse Frischgewicht, TMV: Biomasse Trockengewicht, WGV: Pflanzenwassergehalt, Halme: Bestandesdichte, BG: Bedeckungsgrad



**Tab. A-9e:** (Fortsetzung) Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) der linearen Korrelationsanalyse zwischen Polarisationsindizes und den Boden- und Bestandesmerkmalen von Winterweizen auf den Testflächen in Neetzow (05. Juni 2002 – Ährenschieben).

Polarisationsindex	$(Rcr + Xhh) / (Rcr - Xhh)$	$(Rcr + Xw) / (Rcr - Xw)$	$(Rcr - Xhh) / (Rcr + Xhh)$	$(Rcr - Xw) / (Rcr + Xw)$
<b>Testfläche 10.3</b>				
FM <sub>B</sub> [g]	0,26	0,35	-0,26	-0,40
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,80 **	0,78 **	-0,78 **	-0,75 *
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,50 **	0,27	-0,49 *	-0,25
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,26	0,12	-0,26	-0,11
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	0,56 **	0,31	-0,55 **	-0,27
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,65 **	0,46 *	-0,63 **	-0,41 *
BG [%]	0,15	0,00	-0,14	0,04
<b>Testfläche 3.2</b>				
FM <sub>B</sub> [g]	-0,06	-0,27	0,08	0,28
WG <sub>B</sub> [Vol-%]	0,05	0,18	-0,08	-0,26
FM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	-0,02	0,29	0,01	-0,27
TM <sub>V</sub> [g m <sup>-2</sup> ]	0,32	0,24	-0,33	-0,25
WG <sub>V</sub> [% m <sup>-2</sup> ]	-0,47	0,05	0,47	-0,01
Halme [m <sup>-2</sup> ]	0,19	0,23	-0,20	-0,17
BG [%]	0,04	-0,07	0,02	-0,02

**Tab. A-10:** Wilk's Lambda der Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Radarinformation als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Untersuchungsgebiet Neetzow).

Radar- information	L-HH	L-HV	L-VV	L-VH	X-HH	X-VV	R-cr	Lvv/Lhh	Lvh/Lhh	Lvh/Lw	Lhh/Lvh	Lvv/Lvh	Lhh/lw	Lhh-Lw	Xhh-Xvv
08. Mai 2001															
Wilk's	0,650	0,785	0,987	0,941	0,847	0,810	0,834	0,728	0,706	0,979	0,753	0,972	0,749	0,783	0,859
$\alpha$	0,061	0,208	0,918	0,675	0,339	0,255	0,307	0,127	0,104	0,872	0,158	0,833	0,153	0,204	0,373
Wilk's	0,992	0,802	0,994	0,831	0,979	0,905	0,828	0,990	0,989	0,980	0,999	0,989	0,995	0,994	0,883
$\alpha$	0,969	0,413	0,978	0,476	0,919	0,670	0,471	0,960	0,957	0,923	0,998	0,956	0,979	0,976	0,608
09. Juni 2001															
Wilk's	0,735	0,966	0,662	0,910	0,745	0,663	0,943	0,804	0,818	0,638	0,800	0,699	0,809	0,814	0,873
$\alpha$	0,100	0,744	0,045	0,494	0,109	0,046	0,642	0,195	0,222	0,034	0,187	0,068	0,203	0,213	0,362
Wilk's	0,704	0,932	0,358	0,789	0,362	0,453	0,841	0,970	0,712	0,697	0,771	0,667	0,970	0,965	0,657
$\alpha$	0,173	0,704	0,006	0,306	0,006	0,019	0,420	0,857	0,183	0,164	0,273	0,132	0,859	0,838	0,122
07. April 2002															
Wilk's	0,952	0,908	0,948	0,799	0,911	0,807	0,844	0,816	0,905	0,979	0,900	0,971	0,805	0,804	0,853
$\alpha$	0,566	0,330	0,543	0,076	0,344	0,085	0,141	0,097	0,318	0,779	0,298	0,714	0,082	0,081	0,161
Wilk's	0,686	0,600	0,664	0,458	0,691	0,816	0,504	0,999	0,821	0,782	0,862	0,798	0,995	0,993	0,987
$\alpha$	0,184	0,101	0,158	0,030	0,190	0,401	0,046	0,995	0,412	0,331	0,513	0,363	0,980	0,971	0,943
08. Mai 2002															
Wilk's	0,889	0,997	0,890	0,979	0,716	0,973	0,998	0,873	0,919	0,899	0,914	0,900	0,895	0,883	0,811
$\alpha$	0,260	0,969	0,261	0,783	0,021	0,733	0,972	0,209	0,379	0,292	0,357	0,296	0,279	0,238	0,090
Wilk's	0,967	0,928	0,674	0,652	0,896	0,888	0,791	0,886	0,867	0,730	0,859	0,630	0,890	0,833	0,613
$\alpha$	0,789	0,595	0,063	0,050	0,462	0,435	0,193	0,430	0,368	0,111	0,346	0,039	0,441	0,278	0,033
05. Juni 2002															
Wilk's	0,998	0,904	0,990	0,902	0,713	0,843	0,901	0,988	0,939	0,967	0,957	0,967	0,988	0,993	0,999
$\alpha$	0,979	0,345	0,897	0,337	0,029	0,167	0,335	0,877	0,514	0,704	0,630	0,704	0,884	0,926	0,993
Wilk's	0,929	0,795	0,968	0,886	0,983	0,907	0,835	0,975	0,966	0,993	0,932	0,999	0,964	0,959	0,903
$\alpha$	0,643	0,252	0,825	0,485	0,900	0,558	0,340	0,861	0,811	0,956	0,654	0,996	0,802	0,780	0,544

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, grau unterlegt sind alle Werte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit < 10 %

**Tab. A-10:** (Fortsetzung) Wilk's Lambda der Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Radarinformation als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Untersuchungsgebiet Neetzow).

Radar-information	Xhh/Xvv	Lvv / (Lvv+Lhh)	Xvv / (Xvv+Xhh)	(Lhv+Lvh) / ((Lhv+Lvh) + (Lvv+Lhh))	(Xvv+Xhh) <sup>-2</sup>	lhh-xhh	lhh-xvv	Lvv/Xhh	Lvv/Xvv	Lhv/Xhh	Lhv/Xvv	Xhh/Lhv	Xvv/Lhv
08. Mai 2001													
01 Wilks	0,869	0,739	0,867	0,877	0,788	0,710	0,681	0,882	0,848	0,797	0,769	0,768	0,730
10 α	0,400	0,140	0,395	0,425	0,279	0,108	0,082	0,444	0,343	0,228	0,181	0,180	0,129
02 Wilks	0,913	0,997	0,911	0,998	0,993	0,994	0,993	0,997	0,987	0,947	0,888	0,904	0,874
10 α	0,695	0,988	0,688	0,992	0,973	0,977	0,971	0,989	0,948	0,803	0,623	0,669	0,584
09. Juni 2001													
01 Wilks	0,875	0,806	0,881	0,681	0,645	0,972	0,808	0,850	0,956	0,950	0,683	0,924	0,702
10 α	0,366	0,198	0,385	0,056	0,037	0,806	0,201	0,296	0,711	0,682	0,057	0,553	0,070
02 Wilks	0,697	0,970	0,701	0,516	0,518	0,575	0,540	0,328	0,409	0,607	0,654	0,638	0,606
10 α	0,164	0,860	0,169	0,036	0,034	0,063	0,046	0,004	0,011	0,082	0,119	0,106	0,081
07. April 2002													
01 Wilks	0,857	0,810	0,853	0,951	0,965	0,975	0,899	0,974	0,927	0,918	0,879	0,934	0,876
10 α	0,169	0,089	0,161	0,562	0,664	0,747	0,292	0,738	0,419	0,372	0,227	0,455	0,218
02 Wilks	0,965	0,998	0,984	0,794	0,633	0,589	0,823	0,375	0,812	0,628	0,793	0,637	0,796
10 α	0,853	0,989	0,928	0,353	0,128	0,092	0,416	0,012	0,391	0,123	0,352	0,131	0,357
08. Mai 2002													
01 Wilks	0,768	0,884	0,777	0,926	0,893	0,864	0,961	0,880	0,989	0,788	0,991	0,767	0,989
10 α	0,048	0,244	0,055	0,413	0,272	0,185	0,634	0,230	0,881	0,065	0,901	0,047	0,884
02 Wilks	0,622	0,887	0,605	0,594	0,775	0,955	0,980	0,606	0,875	0,910	0,930	0,877	0,908
10 α	0,036	0,434	0,030	0,026	0,168	0,725	0,868	0,030	0,394	0,518	0,601	0,400	0,508
05. Juni 2002													
01 Wilks	0,998	0,988	0,997	0,950	0,994	0,913	0,950	0,843	0,939	0,734	0,898	0,723	0,872
10 α	0,982	0,881	0,969	0,582	0,940	0,384	0,583	0,166	0,515	0,039	0,325	0,033	0,238
02 Wilks	0,913	0,969	0,932	0,970	0,943	0,951	0,996	0,985	0,982	0,907	0,922	0,884	0,907
10 α	0,580	0,827	0,654	0,835	0,703	0,740	0,975	0,916	0,896	0,556	0,615	0,477	0,557

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, grau unterlegt sind alle Werte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit < 10 %

**Tab. A-10:** (Fortsetzung) Wilk's Lambda der Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Radarinformation als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Untersuchungsgebiet Neetzow).

Radar- information	Lhv-Xhh	Lhv-Xvv	$\frac{(Lhv+Lhh)}{(Lhv-Lhh)}$	$\frac{(Lhv+Lvv)}{(Lhv-Lv)}$	$\frac{(Lhv-Lhh)}{(Lhv+Lhh)}$	$\frac{(Lhv-Lvv)}{(Lhv+Lvv)}$	$\frac{(Lhv+Xhh)}{(Lhv-Xhh)}$	$\frac{(Lhv+Xvv)}{(Lhv-Xvv)}$	$\frac{(Lhv-Xhh)}{(Lhv+Xhh)}$	$\frac{(Lhv-Xvv)}{(Lhv+Xvv)}$	$\frac{(Lvv-Lhh)}{(Lvv+Lhh)}$	
08. Mai 2001												
♂	Wilks	0,747	0,714	0,880	0,977	0,819	0,908	0,740	0,777	0,694	0,743	0,739
♀	♂	0,150	0,112	0,435	0,862	0,274	0,533	0,141	0,195	0,093	0,145	0,140
♀	Wilks	0,854	0,862	0,976	0,963	0,986	0,991	0,827	0,921	0,804	0,881	0,997
♂	♀	0,532	0,553	0,909	0,861	0,945	0,966	0,467	0,721	0,418	0,602	0,988
09. Juni 2001												
♂	Wilks	0,993	0,831	0,793	0,762	0,814	0,659	0,889	0,934	0,734	0,694	0,806
♀	♂	0,949	0,249	0,176	0,131	0,214	0,044	0,414	0,598	0,098	0,065	0,198
♀	Wilks	0,783	0,701	0,693	0,264	0,622	0,344	0,715	0,623	0,635	0,619	0,970
♂	♀	0,294	0,169	0,160	0,001	0,093	0,005	0,187	0,094	0,103	0,091	0,860
07. April 2002												
♂	Wilks	0,933	0,996	0,889	0,967	0,908	0,975	0,938	0,931	0,876	0,876	0,810
♀	♂	0,449	0,958	0,259	0,678	0,330	0,744	0,477	0,440	0,217	0,219	0,089
♀	Wilks	0,535	0,671	0,847	0,858	0,813	0,818	0,642	0,634	0,799	0,794	0,998
♂	♀	0,060	0,166	0,474	0,502	0,395	0,406	0,136	0,129	0,364	0,355	0,989
08. Mai 2002												
♂	Wilks	0,869	0,996	0,918	0,954	0,912	0,938	0,771	0,770	0,983	0,990	0,884
♀	♂	0,200	0,954	0,375	0,580	0,349	0,478	0,050	0,049	0,826	0,894	0,244
♀	Wilks	0,905	0,928	0,914	0,609	0,919	0,717	0,853	0,887	0,877	0,916	0,887
♂	♀	0,497	0,592	0,531	0,031	0,555	0,097	0,329	0,433	0,399	0,542	0,434
05. Juni 2002												
♂	Wilks	0,831	0,902	0,969	0,966	0,951	0,975	0,720	0,726	0,857	0,880	0,988
♀	♂	0,144	0,340	0,722	0,698	0,591	0,769	0,032	0,034	0,197	0,260	0,881
♀	Wilks	0,747	0,859	0,895	0,985	0,942	0,990	0,859	0,892	0,876	0,913	0,969
♂	♀	0,173	0,402	0,516	0,915	0,697	0,943	0,402	0,503	0,451	0,580	0,827

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, grau unterlegt sind alle Werte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit < 10 %

**Tab. A-10:** (Fortsetzung) Wilk's Lambda der Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Radarinformation als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Untersuchungsgebiet Neetzow).

Radar-information	$\frac{(Lw + Lhh) / (Lvv - Lhh)}{(Lw - Lv) / (Lvv + Lv)}$	$\frac{(Lw - Lv) / (Lvv + Lv)}{(Lw + Lv) / (Lvv - Lv)}$	$\frac{(Lw - Xhh) / (Lw + Xhh)}{(Lw - Xhh) / (Lw + Xhh)}$	$\frac{(Lw - Xw) / (Lw + Xw)}{(Lw - Xw) / (Lw + Xw)}$	$\frac{(Lw + Xw) / (Lw - Xw)}{(Lw + Xw) / (Lw - Xw)}$	$\frac{(Lh - Lv) / (Lh + Lv)}{(Lh - Lv) / (Lh + Lv)}$	$\frac{(Lh - Xhh) / (Lh + Xhh)}{(Lh - Xhh) / (Lh + Xhh)}$
08. Mai 2001							
Wilks	0,747	0,975	0,958	0,967	0,851	0,733	0,861
$\alpha$	0,150	0,849	0,756	0,802	0,350	0,133	0,379
Wilks	0,755	0,994	0,931	0,567	0,994	0,999	0,993
$\alpha$	0,325	0,975	0,750	0,103	0,977	0,997	0,972
09. Juni 2001							
Wilks	0,915	0,676	0,784	0,792	0,951	0,804	0,790
$\alpha$	0,515	0,053	0,161	0,173	0,687	0,195	0,170
Wilks	0,934	0,669	0,686	0,876	0,383	0,758	0,795
$\alpha$	0,710	0,134	0,152	0,517	0,008	0,250	0,318
07. April 2002							
Wilks	0,990	0,973	0,967	0,982	0,931	0,902	0,888
$\alpha$	0,889	0,733	0,678	0,809	0,442	0,305	0,256
Wilks	0,947	0,793	0,816	0,345	0,798	0,847	0,910
$\alpha$	0,783	0,351	0,400	0,008	0,363	0,475	0,653
08. Mai 2002							
Wilks	0,839	0,899	0,907	0,934	0,989	0,916	0,912
$\alpha$	0,158	0,293	0,325	0,456	0,884	0,364	0,345
Wilks	0,906	0,665	0,518	0,970	0,875	0,861	0,858
$\alpha$	0,503	0,058	0,010	0,822	0,393	0,350	0,342
05. Juni 2002							
Wilks	0,893	0,967	0,966	0,816	0,916	0,950	0,979
$\alpha$	0,321	0,705	0,695	0,118	0,400	0,586	0,801
Wilks	0,955	0,998	0,994	0,961	0,981	0,944	0,892
$\alpha$	0,759	0,987	0,963	0,786	0,893	0,706	0,502

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, grau unterlegt sind alle Werte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit < 10 %

**Tab. A-10:** (Fortsetzung) Wilk's Lambda der Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Radarinformation als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Untersuchungsgebiet Neetzow).

Radar- information	$\frac{(Lhh + Xhh)}{(Lhh - Xhh)}$	$\frac{(Lhh - Xvv)}{(Lhh + Xvv)}$	$\frac{(Lhh + Xvv)}{(Lhh - Xvv)}$	$\frac{(Lvh - Xhh)}{(Lvh + Xhh)}$	$\frac{(Lvh + Xhh)}{(Lvh - Xhh)}$	$\frac{(Lvh - Xvv)}{(Lvh + Xvv)}$	$\frac{(Lvh + Xvv)}{(Lvh - Xvv)}$	$\frac{(Xhh - Xvv)}{(Xhh + Xvv)}$	$\frac{(Xhh + Xvv)}{(Xhh - Xvv)}$	$\frac{Lhh + Lvv + Lvh + Lvh}{Lhh + Lvv + Lvh + Lvh}$
08. Mai 2001										
♂ Wilks	0,823	0,681	0,799	0,851	0,820	0,837	0,805	0,867	0,750	0,775
♀ Wilks	0,281	0,082	0,232	0,350	0,276	0,315	0,245	0,395	0,179	0,190
♂ Wilks	0,858	0,999	0,895	0,971	0,943	0,998	0,943	0,911	0,911	0,938
♀ Wilks	0,541	0,997	0,640	0,890	0,791	0,992	0,790	0,688	0,688	0,773
09. Juni 2001										
♂ Wilks	0,966	0,847	0,840	0,945	0,909	0,695	0,729	0,881	0,827	0,782
♀ Wilks	0,773	0,289	0,271	0,654	0,488	0,066	0,094	0,385	0,240	0,158
♂ Wilks	0,870	0,567	0,871	0,655	0,807	0,570	0,903	0,701	0,886	0,640
♀ Wilks	0,499	0,059	0,502	0,121	0,343	0,060	0,602	0,169	0,545	0,108
07. April 2002										
♂ Wilks	0,954	0,817	0,835	0,919	0,925	0,899	0,899	0,853	0,884	0,938
♀ Wilks	0,585	0,097	0,126	0,377	0,408	0,292	0,294	0,161	0,259	0,477
♂ Wilks	0,496	0,839	0,768	0,647	0,643	0,861	0,851	0,984	0,801	0,518
♀ Wilks	0,043	0,453	0,305	0,141	0,137	0,509	0,483	0,928	0,369	0,052
08. Mai 2002										
♂ Wilks	0,966	0,961	0,929	0,718	0,707	0,968	0,952	0,777	0,904	0,959
♀ Wilks	0,671	0,631	0,430	0,022	0,018	0,687	0,569	0,055	0,315	0,615
♂ Wilks	0,697	0,988	0,946	0,864	0,857	0,790	0,829	0,605	0,752	0,871
♀ Wilks	0,080	0,916	0,679	0,360	0,341	0,193	0,268	0,030	0,136	0,379
05. Juni 2002										
♂ Wilks	0,819	0,937	0,906	0,708	0,704	0,864	0,841	0,997	0,952	0,953
♀ Wilks	0,123	0,506	0,354	0,026	0,025	0,215	0,163	0,969	0,598	0,605
♂ Wilks	0,971	0,995	0,888	0,938	0,901	0,918	0,874	0,932	0,963	0,819
♀ Wilks	0,837	0,972	0,490	0,681	0,533	0,598	0,445	0,654	0,812	0,302

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, grau unterlegt sind alle Werte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit < 10 %

**Tab. A-10:** (Fortsetzung) Wilk's Lambda der Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Radarinformation als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Untersuchungsgebiet Neetzow).

Radar-information	$\frac{(Lhh + Lvv + Xhh + Xvv) / (Lhh + Lvv + Lhv + Lvh)}{(Xhh + Xw)}$	Lhh / Rcr	Lw / Rcr	Xw / Rcr	Xhh / Rcr	Rcr / Lhh	Rcr / Lw	Rcr / Xhh	Rcr / Xw	Lhh-Rcr	Lvv-Rcr	Xhh-Rcr
08. Mai 2001												
♂ Wilks	0,794	0,781	0,949	0,773	0,797	0,741	0,943	0,821	0,797	0,833	0,910	0,783
♀ α	0,222	0,201	0,714	0,188	0,229	0,142	0,684	0,276	0,229	0,304	0,543	0,204
♂ Wilks	0,989	0,997	0,999	0,952	0,949	0,979	0,977	0,971	0,966	0,982	0,982	0,925
♀ α	0,956	0,989	0,997	0,822	0,813	0,918	0,911	0,891	0,871	0,930	0,929	0,732
09. Juni 2001												
♂ Wilks	0,910	0,802	0,687	0,696	0,928	0,825	0,629	0,953	0,680	0,961	0,803	0,996
♀ α	0,492	0,190	0,060	0,066	0,573	0,235	0,031	0,696	0,055	0,740	0,192	0,969
♂ Wilks	0,522	0,702	0,448	0,577	0,660	0,616	0,571	0,599	0,620	0,943	0,857	0,746
♀ α	0,039	0,171	0,018	0,064	0,125	0,089	0,061	0,077	0,092	0,745	0,462	0,231
07. April 2002												
♂ Wilks	0,929	0,900	0,972	0,885	0,926	0,907	0,979	0,910	0,887	0,862	0,969	0,894
♀ α	0,427	0,298	0,717	0,246	0,415	0,326	0,779	0,338	0,253	0,182	0,693	0,277
♂ Wilks	0,590	0,610	0,818	0,828	0,640	0,813	0,796	0,640	0,833	0,949	0,919	0,457
♀ α	0,093	0,473	0,405	0,427	0,134	0,394	0,357	0,134	0,440	0,791	0,683	0,029
08. Mai 2002												
♂ Wilks	0,874	0,914	0,918	0,979	0,737	0,915	0,913	0,766	0,983	0,945	0,942	0,819
♀ α	0,212	0,354	0,372	0,783	0,030	0,361	0,350	0,047	0,821	0,524	0,502	0,100
♂ Wilks	0,964	0,888	0,653	0,848	0,870	0,895	0,742	0,898	0,865	0,705	0,652	0,863
♀ α	0,773	0,434	0,051	0,316	0,379	0,460	0,124	0,472	0,361	0,086	0,050	0,355
05. Juni 2002												
♂ Wilks	0,821	0,956	0,971	0,864	0,713	0,941	0,973	0,721	0,890	0,885	0,898	0,815
♀ α	0,127	0,625	0,734	0,215	0,028	0,528	0,749	0,032	0,295	0,278	0,324	0,116
♂ Wilks	0,963	0,932	0,998	0,911	0,907	0,966	0,991	0,931	0,927	0,924	0,986	0,798
♀ α	0,799	0,654	0,988	0,573	0,558	0,810	0,945	0,652	0,634	0,621	0,917	0,258

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, grau unterlegt sind alle Werte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit < 10 %

**Tab. A-10:** (Fortsetzung) Wilk's Lambda der Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Radarinformation als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Untersuchungsgebiet Neetzow).

Radar- information	X <sub>vv</sub> -Rcr	$\frac{Rcr/(Rcr+(Lvw+Lhh))}{(Rcr-Lhh)}$	$\frac{(Rcr+Lhh)}{(Rcr-Lhh)}$	$\frac{(Rcr+Lw)}{(Rcr-Lw)}$	$\frac{(L Rcr-Lhh)}{(Rcr+Lhh)}$	$\frac{(Rcr-Lw)}{(Rcr+Lw)}$	$\frac{(Rcr+Xhh)}{(Rcr-Xhh)}$	$\frac{(Rcr+Xw)}{(Rcr-Xw)}$	$\frac{(Rcr-Xhh)}{(Rcr+Xhh)}$	$\frac{(Rcr-Xw)}{(Rcr+Xw)}$	
08. Mai 2001											
01	Wilks	0,768	0,876	0,858	0,969	0,765	0,947	0,773	0,743	0,805	0,782
10	$\alpha$	0,180	0,422	0,371	0,814	0,175	0,701	0,188	0,145	0,244	0,202
02	Wilks	0,959	0,996	0,992	0,956	0,996	0,999	0,896	0,859	0,959	0,959
10	$\alpha$	0,847	0,983	0,968	0,837	0,983	0,995	0,645	0,544	0,847	0,845
09. Juni 2001											
01	Wilks	0,816	0,677	0,789	0,772	0,808	0,665	0,896	0,725	0,937	0,690
10	$\alpha$	0,217	0,054	0,169	0,143	0,201	0,047	0,437	0,089	0,616	0,062
02	Wilks	0,643	0,516	0,740	0,413	0,682	0,475	0,772	0,774	0,632	0,582
10	$\alpha$	0,110	0,037	0,222	0,012	0,148	0,024	0,273	0,278	0,101	0,067
07. April 2002											
01	Wilks	0,990	0,952	0,886	0,967	0,903	0,974	0,930	0,885	0,924	0,886
10	$\alpha$	0,890	0,567	0,247	0,676	0,308	0,736	0,435	0,246	0,401	0,247
02	Wilks	0,695	0,790	0,885	0,845	0,835	0,810	0,641	0,827	0,640	0,829
10	$\alpha$	0,194	0,346	0,579	0,468	0,444	0,387	0,135	0,424	0,134	0,430
08. Mai 2002											
01	Wilks	0,985	0,926	0,914	0,928	0,914	0,915	0,736	0,970	0,742	0,981
10	$\alpha$	0,840	0,411	0,357	0,422	0,355	0,362	0,029	0,705	0,032	0,800
02	Wilks	0,840	0,597	0,883	0,552	0,890	0,684	0,853	0,847	0,879	0,854
10	$\alpha$	0,296	0,027	0,420	0,016	0,441	0,070	0,328	0,314	0,404	0,330
05. Juni 2002											
01	Wilks	0,892	0,949	0,975	0,966	0,951	0,972	0,710	0,848	0,714	0,871
10	$\alpha$	0,300	0,574	0,763	0,698	0,588	0,741	0,028	0,178	0,029	0,235
02	Wilks	0,885	0,970	0,894	0,994	0,944	0,996	0,880	0,875	0,916	0,918
10	$\alpha$	0,480	0,834	0,510	0,962	0,706	0,977	0,465	0,450	0,590	0,598

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, grau unterlegt sind alle Werte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit < 10 %



**Tab. A-11:** Klassifikationsgenauigkeit der Diskriminanzfunktion (%) unter Verwendung eines Polarisationsindizes als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Neetzow).

Polarisationsindex	Lvv/Lhh	Lvh/Lhh	Lvh/Lw	Lhh/Lvh	Lw/Lvh	Lhh/lw	Lhh-Lw	Xhh-Xvv	Xhh/Xvv	Lw / (Lvv+Lhh)	Xw / (Xvv+Xhh)
08. Mai 2001											
Original	43,8	56,3	43,8	50,0	43,8	56,3	37,5	37,5	31,3	50,0	31,3
Kreuzvalidierung	18,8	50,0	25,0	43,8	25,0	25,0	12,5	37,5	25,0	18,8	25,0
Original	36,4	36,4	45,5	18,2	45,5	45,5	36,4	45,5	45,5	45,5	45,5
Kreuzvalidierung	18,2	9,1	36,4	0,0	18,2	18,2	18,2	27,3	27,3	27,3	36,4
09. Juni 2001											
Original	61,1	44,4	50,0	44,4	50,0	61,1	55,6	38,9	27,8	66,7	33,3
Kreuzvalidierung	61,1	33,3	50,0	33,3	50,0	55,6	50,0	33,3	16,7	61,1	16,7
Original	30,8	38,5	61,5	38,5	53,8	30,8	38,5	46,2	53,8	30,8	46,2
Kreuzvalidierung	15,4	38,5	53,8	30,8	53,8	23,1	30,8	38,5	38,5	15,4	46,2
07. April 2002											
Original	57,7	30,8	57,7	26,9	53,8	57,7	57,7	38,5	46,2	57,7	38,5
Kreuzvalidierung	53,8	23,1	53,8	23,1	46,2	53,8	57,7	34,6	38,5	53,8	34,6
Original	33,3	41,7	58,3	33,3	50,0	33,3	33,3	33,3	41,7	33,3	41,7
Kreuzvalidierung	0,0	25,0	33,3	16,7	33,3	8,3	8,3	0,0	25,0	0,0	25,0
08. Mai 2002											
Original	46,2	42,3	34,6	50,0	34,6	38,5	42,3	46,2	53,8	42,3	53,8
Kreuzvalidierung	34,6	38,5	30,8	46,2	30,8	26,9	30,8	42,3	50,0	30,8	46,2
Original	35,3	41,2	41,2	41,2	47,1	41,2	47,1	47,1	52,9	41,2	52,9
Kreuzvalidierung	29,4	35,3	29,4	29,4	29,4	29,4	35,3	41,2	47,1	35,3	47,1
05. Juni 2002											
Original	41,7	50,0	41,7	54,2	45,8	41,7	20,8	16,7	16,7	41,7	29,2
Kreuzvalidierung	29,2	50,0	37,5	54,2	37,5	25,0	8,3	4,2	0,0	29,2	8,3
Original	33,0	26,7	20,0	33,3	20,0	26,7	26,7	53,3	53,3	33,3	53,3
Kreuzvalidierung	20,0	13,3	6,7	20,0	6,7	13,3	13,3	53,3	53,3	20,0	53,3

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen,

**Tab. A-II:** (Fortsetzung) Klassifikationsgenauigkeit der Diskriminanzfunktion (%) unter Verwendung eines Polarisationsindizes als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Neetzow).

Polarisationsindex	$\frac{(Lvh+Lv h)}{(Lvh+Lv h) + (Lvw+Lwh)}$	$\frac{(Lvw+Lwh)}{2}$	$\frac{(Xvw+Xwh)}{2}$	Ihh-xhh	Ihh-xvw	Lw/Xhh	Lw/Xvw	Lhv/Xhh	Lhv/Xvw	Xhh/Lhv	Xvw/Lhv
08. Mai 2001											
Original	37,5	37,5	31,3	37,5	56,3	43,8	43,8	37,5	43,8	37,5	43,8
Kreuzvalidierung	31,3	25,0	31,3	31,3	25,0	43,8	18,8	37,5	43,8	37,5	43,8
Original	36,4	36,4	36,4	45,5	36,4	36,4	63,6	36,4	36,4	45,5	36,4
Kreuzvalidierung	9,1	9,1	9,1	0,0	9,1	9,1	36,4	18,2	18,2	18,2	18,2
09. Juni 2001											
Original	50,0	50,0	38,9	38,9	38,9	38,9	33,3	38,9	50,0	44,4	38,9
Kreuzvalidierung	50,0	50,0	38,9	27,8	33,3	33,3	11,1	22,2	38,9	38,9	38,9
Original	53,8	53,8	61,5	53,8	61,5	76,9	61,5	53,8	38,5	46,2	38,5
Kreuzvalidierung	46,2	53,8	53,8	53,8	61,5	69,2	61,5	38,5	38,5	38,5	38,5
07. April 2002											
Original	19,2	61,5	61,5	26,9	30,8	26,9	23,1	57,7	23,1	46,2	19,2
Kreuzvalidierung	15,4	57,7	57,7	23,1	23,1	3,8	23,1	53,8	19,2	46,2	19,2
Original	41,7	66,7	50,0	58,3	41,7	66,7	58,3	58,3	41,7	58,3	41,7
Kreuzvalidierung	16,7	58,3	41,7	50,0	33,3	66,7	41,7	50,0	33,3	50,0	25,0
08. Mai 2002											
Original	61,5	50,0	46,2	53,8	38,5	53,8	34,6	50,0	19,2	57,7	46,2
Kreuzvalidierung	53,8	38,5	42,3	50,0	34,6	46,2	30,8	46,2	11,5	53,8	23,1
Original	47,1	47,1	41,2	35,3	29,4	52,9	52,9	47,1	47,1	47,1	47,1
Kreuzvalidierung	47,1	11,8	41,2	23,5	23,5	52,9	52,9	47,1	41,2	47,1	41,2
05. Juni 2002											
Original	45,8	29,2	58,3	50,0	33,3	54,2	41,7	58,3	45,8	66,7	50,0
Kreuzvalidierung	41,7	16,7	58,3	45,8	25,0	50,0	33,3	54,2	37,5	66,7	45,8
Original	20,0	40,0	33,3	46,7	40,0	46,7	33,3	46,7	46,7	46,7	46,7
Kreuzvalidierung	0,0	33,3	13,3	40,0	20,0	20,0	13,3	46,7	40,0	46,7	33,3

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen.

**Tab. A-11:** (Fortsetzung) Klassifikationsgenauigkeit der Diskriminanzfunktion (%) unter Verwendung eines Polarisationsindizes als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Neetzow).

Polarisationsindex		Lhv-Xhh	Lhv-Xxw	$\frac{(Lhv+Lhh)}{(Lhv-Lhh)}$	$\frac{(Lhv+Lvw)}{(Lhv-Lvw)}$	$\frac{(Lhv-Lhh)}{(Lhv+Lhh)}$	$\frac{(Lhv-Lvw)}{(Lhv+Lvw)}$	$\frac{(Lhv+Xhh)}{(Lhv-Xhh)}$	$\frac{(Lhv+Xvw)}{(Lhv-Xvw)}$	$\frac{(Lhv-Xhh)}{(Lhv+Xhh)}$	$\frac{(Lhv-Xvw)}{(Lhv+Xvw)}$
08. Mai 2001											
0	Original	50,0	50,0	43,8	31,3	37,5	43,8	43,8	56,3	37,5	43,8
1	Kreuzvalidierung	50,0	50,0	37,5	25,0	37,5	37,5	37,5	56,3	37,5	43,8
2	Original	36,4	36,4	54,5	63,6	36,4	54,5	54,5	36,4	36,4	36,4
3	Kreuzvalidierung	18,2	18,2	27,3	36,4	9,1	27,3	36,4	18,2	18,2	18,2
09. Juni 2001											
0	Original	27,8	44,4	33,3	50,0	33,3	50,0	44,4	44,4	44,4	38,9
1	Kreuzvalidierung	5,9	44,4	27,8	50,0	27,8	50,0	38,9	44,4	33,3	38,9
2	Original	53,8	38,5	46,2	76,9	38,5	84,6	46,2	53,8	53,8	38,5
3	Kreuzvalidierung	46,2	30,8	38,5	76,9	38,5	76,9	38,5	53,8	38,5	30,8
07. April 2002											
0	Original	30,8	11,5	26,9	46,2	30,8	53,8	46,2	19,2	46,2	19,2
1	Kreuzvalidierung	23,1	3,8	23,1	42,3	19,2	50	38,5	19,2	46,2	19,2
2	Original	58,3	41,7	33,3	33,3	50,0	41,7	58,3	33,3	58,3	41,7
3	Kreuzvalidierung	50,0	33,3	16,7	25,0	25,0	33,3	41,7	25,0	50,0	33,3
08. Mai 2002											
0	Original	46,2	46,2	38,5	42,3	38,5	38,5	61,5	46,2	53,8	46,2
1	Kreuzvalidierung	42,3	23,1	34,6	38,5	34,6	34,6	53,8	26,9	46,2	19,2
2	Original	52,9	47,1	47,1	52,9	47,1	52,9	52,9	41,2	47,1	47,1
3	Kreuzvalidierung	52,9	41,2	35,3	29,4	35,3	41,2	52,9	35,3	47,1	47,1
05. Juni 2002											
0	Original	62,5	41,7	50,0	20,8	45,8	25,0	66,7	50,0	62,5	50,0
1	Kreuzvalidierung	58,3	33,3	16,7	16,7	37,5	20,8	66,7	45,8	58,3	45,8
2	Original	53,3	40,0	40,0	33,3	26,7	33,3	40,0	40,0	46,7	46,7
3	Kreuzvalidierung	53,3	33,3	33-3	13,3	20,0	13,3	40,0	33,3	46,7	40,0

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen,

**Tab. A-11:** (Fortsetzung) Klassifikationsgenauigkeit der Diskriminanzfunktion (%) unter Verwendung eines Polarisationsindizes als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Neetzow).

Polarisationsindex	$\frac{(Lw - Lhh) / (Lw + Lhh)}{(Lw - Lhh)}$	$\frac{(Lw + Lhh) / (Lw - Lhh)}{(Lw + Lhh)}$	$\frac{(Lw - Lv) / (Lw + Lv)}{(Lw + Lv)}$	$\frac{(Lw + Lv) / (Lw - Lv)}{(Lw - Lv)}$	$\frac{(Lw - Xhh) / (Lw + Xhh)}{(Lw + Xhh)}$	$\frac{(Lw + Xhh) / (Lw - Xhh)}{(Lw - Xhh)}$	$\frac{(Lw - Xvv) / (Lw + Xvv)}{(Lw + Xvv)}$	$\frac{(Lw + Xvv) / (Lw - Xvv)}{(Lw - Xvv)}$	$\frac{(Lh - Lv) / (Lh + Lv)}{(Lh + Lv)}$
	08. Mai 2001								
Original	50,0	62,5	43,8	43,8	50,0	43,8	43,8	56,3	62,5
Kreuzvalidierung	18,8	62,5	25,0	25,0	43,8	37,5	12,5	37,5	43,8
Original	45,5	54,5	36,4	54,5	45,5	54,5	45,5	45,5	27,3
Kreuzvalidierung	27,3	45,5	27,3	36,4	36,4	36,4	27,3	27,3	0,0
09. Juni 2001									
Original	66,7	22,2	50,0	50,0	44,4	50,0	33,3	38,9	44,4
Kreuzvalidierung	61,1	5,6	50,0	38,9	38,9	44,4	11,1	33,3	33,3
Original	30,8	30,8	53,8	53,8	76,9	53,8	61,5	38,5	46,2
Kreuzvalidierung	15,4	23,1	46,2	53,8	76,9	38,5	53,8	30,8	38,5
07. April 2002									
Original	57,7	26,9	53,8	50	38,5	38,5	15,4	15,4	26,9
Kreuzvalidierung	53,8	23,1	50	46,2	0	26,9	15,4	11,5	23,1
Original	33,3	50,0	50,0	41,7	66,7	75,0	58,3	58,3	41,7
Kreuzvalidierung	0,0	0,0	33,3	25,0	66,7	66,7	50,0	50,0	16,7
08. Mai 2002									
Original	42,3	54,2	35,6	42,3	53,8	46,2	34,6	53,8	50,0
Kreuzvalidierung	30,8	50,0	30,8	38,5	50,0	38,5	26,9	46,2	46,2
Original	41,2	35,3	47,1	47,1	52,9	37,5	52,9	41,2	41,2
Kreuzvalidierung	35,3	29,4	23,5	29,4	52,9	31,3	52,9	35,3	35,3
05. Juni 2002									
Original	41,7	43,5	41,7	45,8	54,2	54,2	45,8	50,0	54,2
Kreuzvalidierung	29,2	43,5	37,5	41,7	50,0	50,0	41,7	41,7	54,2
Original	33,3	20,0	26,7	26,7	46,7	40,0	33,3	26,7	33,3
Kreuzvalidierung	20,0	13,3	13,3	6,7	33,3	33,3	13,3	20,0	20,0

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen

**Tab. A-11:** (Fortsetzung) Klassifikationsgenauigkeit der Diskriminanzfunktion (%) unter Verwendung eines Polarisationsindizes als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Neetzow).

Polarisationsindex		$\frac{(Lvh + Lvh) / (Lhh - Xhh) / (Lhh + Xhh)}{(Lhh - Lvhh) / (Lhh + Xhh)}$	$\frac{(Lhh - Xww) / (Lhh + Xww)}{(Lhh - Xww) / (Lhh + Xww)}$	$\frac{(Lvh - Xhh) / (Lvh + Xhh)}{(Lvh - Xhh) / (Lvh + Xhh)}$	$\frac{(Lvh - Xvv) / (Lvh + Xvv)}{(Lvh - Xvv) / (Lvh + Xvv)}$				
08. Mai 2001									
Original	37,5	37,5	62,5	56,3	31,3	50,0	43,8	31,3	31,3
Kreuzvalidierung	31,3	31,3	56,3	12,5	31,3	43,8	37,5	18,8	25,0
Original	45,5	27,3	45,5	27,3	36,4	54,5	45,5	18,2	36,4
Kreuzvalidierung	9,1	9,1	36,4	0,0	36,4	45,5	36,4	0,0	27,3
09. Juni 2001									
Original	44,4	38,9	38,9	38,9	50,0	38,9	33,3	50,0	50,0
Kreuzvalidierung	38,9	22,2	22,2	38,9	50,0	33,3	33,3	50,0	44,4
Original	38,5	53,8	38,5	61,5	46,2	53,8	69,2	53,8	46,2
Kreuzvalidierung	30,8	53,8	30,8	46,2	38,5	38,5	53,8	46,2	38,5
07. April 2002									
Original	30,8	42,3	38,5	50	38,5	50	50	19,2	65,4
Kreuzvalidierung	23,1	42,3	38,5	38,5	38,5	50	34,6	7,7	42,3
Original	25,0	58,3	58,3	50,0	41,7	58,3	58,3	50,0	41,7
Kreuzvalidierung	16,7	58,3	58,3	41,7	33,3	50,0	50,0	25,0	33,3
08. Mai 2002									
Original	50,0	61,5	58,8	38,5	38,5	61,5	61,5	23,1	50,0
Kreuzvalidierung	46,2	57,7	46,2	34,6	34,6	53,8	57,7	19,2	23,1
Original	52,9	41,2	47,1	41,2	29,7	52,9	41,2	52,9	52,9
Kreuzvalidierung	29,4	35,3	41,2	23,5	17,6	41,2	41,2	52,9	52,9
05. Juni 2002									
Original	54,2	58,3	54,2	33,3	45,8	58,3	58,3	58,3	54,2
Kreuzvalidierung	45,8	58,3	54,2	33,3	12,5	58,3	58,3	58,3	54,2
Original	33,3	46,7	26,7	26,7	26,7	46,7	40,0	33,3	33,3
Kreuzvalidierung	20,0	33,3	13,3	6,7	20,0	46,7	40,0	20,0	13,3

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen

**Tab. A-11:** (Fortsetzung) Klassifikationsgenauigkeit der Diskriminanzfunktion (%) unter Verwendung eines Polarisationsindizes als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Neetzow).

Polarisationsindex	$\frac{(X_{hh} - X_{vv}) / (X_{hh} + X_{ww})}{(X_{hh} + X_{ww})}$		$\frac{L_{hh} + L_{ww}}{L_{hv} + L_{vh}}$		$\frac{(L_{hh} + L_{vv} + (X_{hh} + X_{ww})) / (L_{hh} + L_{ww} + (X_{hh} + X_{ww}))}{(L_{hh} + L_{vv} + (X_{hh} + X_{ww})) / (L_{hh} + L_{ww} + (X_{hh} + X_{ww}))}$		Lw / Rcr	Xw / Rcr	Xhh / Rcr	Rcr / Lhh
	$\frac{(X_{hh} - X_{vv}) / (X_{hh} + X_{ww})}{(X_{hh} + X_{ww})}$	$\frac{L_{hh} + L_{ww}}{L_{hv} + L_{vh}}$	$\frac{(L_{hh} + L_{vv} + (X_{hh} + X_{ww})) / (L_{hh} + L_{ww} + (X_{hh} + X_{ww}))}{(L_{hh} + L_{vv} + (X_{hh} + X_{ww})) / (L_{hh} + L_{ww} + (X_{hh} + X_{ww}))}$	$\frac{(L_{hh} + L_{vv} + (X_{hh} + X_{ww})) / (L_{hh} + L_{ww} + (X_{hh} + X_{ww}))}{(L_{hh} + L_{vv} + (X_{hh} + X_{ww})) / (L_{hh} + L_{ww} + (X_{hh} + X_{ww}))}$						
08. Mai 2001										
Original	31,3	46,7	50,0	37,5	43,8	43,8	50,0	43,8	43,8	43,8
Kreuzvalidierung	25,0	33,3	50,0	37,5	43,8	43,8	31,3	43,8	43,8	37,5
Original	45,5	36,4	54,5	36,4	36,4	36,4	45,5	36,4	54,5	36,4
Kreuzvalidierung	36,4	9,1	54,5	18,2	27,3	9,1	18,2	18,2	18,2	18,2
09. Juni 2001										
Original	33,3	44,4	33,3	50,0	50,0	33,3	44,4	50,0	33,3	44,4
Kreuzvalidierung	16,7	44,4	33,3	50,0	50,0	27,8	44,4	38,9	33,3	33,3
Original	46,2	38,5	61,5	53,8	69,2	46,2	69,2	46,2	53,8	46,2
Kreuzvalidierung	46,2	23,1	61,5	53,8	46,2	38,5	61,5	30,8	38,5	38,5
07. April 2002										
Original	38,5	32	46,2	50	50	30,8	53,8	26,9	46,2	34,6
Kreuzvalidierung	34,6	24	46,2	46,2	42,3	23,1	50	19,2	42,3	30,8
Original	41,7	50,0	58,3	58,3	58,3	50,0	25,0	33,3	58,3	58,3
Kreuzvalidierung	25,0	41,7	58,3	50,0	58,3	33,3	0,0	25,0	58,3	16,7
08. Mai 2002										
Original	53,8	61,5	30,8	30,8	26,9	46,2	38,5	23,1	57,7	38,5
Kreuzvalidierung	46,2	53,8	26,9	23,1	23,1	42,3	30,8	19,2	53,8	34,6
Original	52,9	52,9	47,1	41,2	47,1	47,1	58,8	58,8	58,8	35,3
Kreuzvalidierung	47,1	47,1	47,1	41,2	47,1	23,5	11,8	52,9	52,9	23,5
05. Juni 2002										
Original	29,2	37,5	41,7	70,8	66,7	54,2	45,8	54,2	62,5	50,0
Kreuzvalidierung	8,3	25,0	33,3	58,3	66,7	50,0	41,7	45,8	62,5	50,0
Original	53,3	42,9	60,0	40,0	40,0	33,3	26,7	40,0	46,7	26,7
Kreuzvalidierung	53,3	28,6	53,3	13,3	20,0	20,0	0,0	20,0	46,7	6,7

Polarisationen: w: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen

**Tab. A-11:** (Fortsetzung) Klassifikationsgenauigkeit der Diskriminanzfunktion (%) unter Verwendung eines Polarisationsindizes als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Neetzow).

Polarisationsindex	Rcr / Lw	Rcr / Xhh	Rcr / Xw	Lhh-Rcr	Lvw-Rcr	Xhh-Rcr	Xw-Rcr	Rcr/(Rcr+ (Lvw+Lhh))	(Rcr + Lhh) / (Rcr - Lhh)	(Rcr + Lvw) / (Rcr - Lvw)
<b>08. Mai 2001</b>										
Original	50,0	37,5	37,5	50,0	56,3	43,8	37,5	37,5	43,8	50,0
Kreuzvalidierung	31,3	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	31,3	31,3	31,3	37,5
Original	36,4	45,5	36,4	45,5	36,4	54,5	27,3	36,4	54,5	45,5
Kreuzvalidierung	9,1	36,4	18,2	0,0	9,1	45,5	0,0	9,1	18,2	27,3
<b>09. Juni 2001</b>										
Original	55,6	33,3	50,0	38,9	44,4	27,8	44,4	50,0	33,3	50,0
Kreuzvalidierung	55,6	22,2	44,4	33,3	33,3	5,6	44,4	44,4	27,8	38,9
Original	69,2	58,8	38,5	38,5	46,2	46,2	46,2	53,8	38,5	76,9
Kreuzvalidierung	69,2	46,2	30,8	30,8	38,5	38,5	30,8	46,2	30,8	53,8
<b>07. April 2002</b>										
Original	57,7	57,7	23,1	34,6	26,9	34,6	19,2	15,4	30,8	46,3
Kreuzvalidierung	53,8	57,7	23,1	30,8	23,1	26,9	11,5	11,5	23,1	42,2
Original	25,0	58,3	41,7	33,3	33,3	58,3	50,0	41,7	50,0	50,0
Kreuzvalidierung	0,0	58,3	33,3	8,3	25,0	25,0	16,7	16,7	25,0	16,7
<b>08. Mai 2002</b>										
Original	30,8	50,0	19,2	38,5	46,2	42,3	23,1	61,5	42,3	46,2
Kreuzvalidierung	26,9	46,2	15,4	34,6	42,3	38,5	19,2	57,7	38,5	42,3
Original	64,7	52,9	52,9	58,8	47,1	58,8	52,9	47,1	47,1	41,2
Kreuzvalidierung	35,3	47,1	47,1	58,8	47,1	52,9	47,1	47,1	35,3	5,9
<b>05. Juni 2002</b>										
Original	41,7	58,3	54,2	50,0	50,0	66,7	45,8	45,8	54,2	45,8
Kreuzvalidierung	37,5	50,0	41,7	45,8	45,8	58,3	37,5	45,8	41,7	37,5
Original	20,0	46,7	33,3	33,3	33,3	53,3	26,7	20,0	40,0	33,3
Kreuzvalidierung	6,7	46,7	20,0	13,3	13,3	53,3	20,0	0,0	26,7	6,7

Polarisationen: w: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen

**Tab. A-11:** (Fortsetzung) Klassifikationsgenauigkeit der Diskriminanzfunktion (%) unter Verwendung eines Polarisationsindizes als diskriminierende Variable und der Gruppenzugehörigkeit der Clusteranalyse (3 Klassen) basierend auf der Gruppierungsvariablen Bestandesdichte von Winterweizen als abhängige Variable (Neetzow).

Polarisationsindex	$(L\text{Rcr} - L\text{hh}) / (R\text{cr} + L\text{hh})$	$(R\text{cr} - L\text{vv}) / (R\text{cr} + L\text{vv})$	$(R\text{cr} + X\text{hh}) / (R\text{cr} - X\text{hh})$	$(R\text{cr} + X\text{vv}) / (R\text{cr} - X\text{vv})$	$(R\text{cr} - X\text{hh}) / (R\text{cr} + X\text{hh})$	$(R\text{cr} - X\text{vv}) / (R\text{cr} + X\text{vv})$
	08. Mai 2001					
Original	37,5	50,0	50,0	37,5	43,8	37,5
Kreuzvalidierung	37,5	31,3	37,5	31,3	37,5	37,5
Original	36,4	54,5	36,4	36,4	54,5	36,4
Kreuzvalidierung	9,1	27,3	18,2	18,2	27,3	18,2
09. Juni 2001						
Original	33,3	50,0	38,9	44,4	33,3	44,4
Kreuzvalidierung	22,2	44,4	33,3	44,4	27,8	44,4
Original	46,2	69,2	69,2	38,5	53,8	30,8
Kreuzvalidierung	38,5	69,2	53,8	38,5	46,2	30,8
07. April 2002						
Original	34,6	53,8	46,2	23,1	50	23,1
Kreuzvalidierung	26,9	50	38,5	19,2	50	23,1
Original	58,3	25,0	58,3	41,7	58,3	41,7
Kreuzvalidierung	33,3	0,0	58,3	33,3	58,3	25,0
08. Mai 2002						
Original	42,3	38,5	62,5	50,0	61,5	23,1
Kreuzvalidierung	38,5	30,8	57,7	34,4	50,0	15,4
Original	47,1	58,8	58,8	58,8	58,8	52,9
Kreuzvalidierung	23,5	11,8	58,8	52,9	52,9	52,9
05. Juni 2002						
Original	54,2	45,8	62,5	50,0	62,5	58,3
Kreuzvalidierung	45,8	41,7	62,5	50,0	62,5	54,2
Original	26,7	33,3	40,0	33,3	46,7	33,3
Kreuzvalidierung	13,3	13,3	40,0	26,7	46,7	20,0

Polarisationen: vv: vertikal ko-polarisiert, hh: horizontal ko-polarisiert, vh, hv: kreuz-polarisiert, Rcr: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen



## 9 Glossar

Das Glossar erklärt fachspezifische Begriffe der Radarfernerkundung und Abkürzungen, für die eine deutsche Wiedergabe des Ausdrucks nicht eindeutig ist. Die Auflistung orientiert sich an den von der NASA verwendeten Definitionen (NASA 2003).

### **Antenna Gain**

Der Antennengewinn der verwendeten Richtantenne ist das Verhältnis der maximalen Leistungsdichte zur Leistungsdichte einer isotropen Antenne.

### **Azimuth-Richtung**

Bewegungsrichtung des Sensors, senkrecht zur Blickrichtung.

### **Corner-Reflektor**

Corner-Reflektoren sind dihedrale oder trihedrale Winkelreflektoren, die exakt in Richtung des einfallenden Radarstrahls ausgerichtet sind, um die maximale Reflexion des Signals zu ermöglichen.

### **Depressionswinkel**

Winkel zwischen der Blickrichtung (ca. parallel zur Oberfläche) und dem ausgesendeten Richtstrahl.

### **Dopplereffekt**

Generell ist die Frequenz gleich dem Quotienten aus Lichtgeschwindigkeit und Wellenlänge  $f = c\lambda^{-1}$ . Bewegen sich Sender und Empfänger relativ zueinander, so nimmt der Empfänger eine andere Frequenz wahr, als die vom Sender abgestrahlte. Entfernt sich der Empfänger vom Sender, so verringert sich die Relativgeschwindigkeit  $c$  um die Geschwindigkeit des Empfängers. Bewegt sich der Sender auf den Empfänger zu, so wird die Wellenlänge um den Weg verkürzt, den der Sender während der Dauer einer Schwingung zurücklegt.

### **Double-bounce-scattering**

Der einfallende Radarstrahl wird von zwei meist orthogonal zueinander angeordneten Objekten reflektiert.

### **Einfallswinkel (nominal)**

Winkel zwischen der einfallenden Radarstrahlung und der Orthogonalen auf eine imaginäre horizontale Erdoberfläche.

### **Far-range**

Bezieht sich auf den Bereich des Aufnahmestreifens, der am weitesten vom Aufnahmesensor entfernt liegt.

### **Ground-range**

Die Projektion der Rückstreuwerte der Schrägaufnahme auf die als kugelförmig angenommene Erdoberfläche. Die Entfernungen der Objekte entsprechen der Realität und die Geometrien in dem Ground-Range-Bild sind über die Entfernung zum Sensor (near-range zu far-range) konstant.

### **Interferenz**

Interferenzen sind nur bei kohärenter Strahlung möglich. Sie führen zu einer Addition oder Subtraktion der Amplituden (Verstärkung bzw. Abschwächung des Signals)

### **Ko-Polarisation**

Gleichartige lineare Polarisierung (HH oder VV) bei der Transmission und beim Empfang der elektromagnetischen Welle.

### **Kreuz-Polarisation**

Um 90° gedrehter Empfang der linear polarisierten elektromagnetischen Welle relativ zur Transmission (HV und VH).

### **Leaf Area Index (LAI)**

Fläche an Blattmasse über einer definierten Bodenfläche.

### **Lokaler Einfallswinkel**

Winkel zwischen der einfallenden Radarstrahlung und der Orthogonalen auf die Geländeoberfläche unter Berücksichtigung der lokalen Hangneigung.

### **Look**

Die verfügbare Bandbreite eines SAR-Systems wird in *Azimuth*- oder *Range*-Richtung in  $n$  statistisch unabhängige fortlaufende Segmente unterteilt. Jedes Segment stellt ein Single-Look-Bild der aufgenommenen Erdoberfläche dar.

### **Multi-Look-Prozessierung**

Durch spezielle Mittelungsverfahren der Pixelwerte gleicher geografischer Lage aus  $n$  Single-Look-Bildern werden sogenannte Multi-Look-Bilder generiert, die einen geringeren Speckle-Effekt aufweisen.

### **Multiple-scattering**

Vielfachstreuung einer Radarwelle innerhalb eines Mediums an dessen zufällig orientierten Bestandteilen. Dieser Streumechanismus ist hauptverantwortlich für die Depolarisation kohärenter elektromagnetischer Strahlung.

### **Nadirdistanz**

Die Nadirdistanz ist die Entfernung vom Objekt zur Lotrechten des Sensors.

### **Near-range**

Bezieht sich auf den Bereich des Aufnahmestreifens, der am nächsten zum Aufnahmesensor liegt.

### **Oberflächenstreuung**

Winkelabhängige Streuung an der Oberfläche eines Objektes in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit.

### **Polarisation**

Schwingungsrichtung des elektrischen Feldvektors einer elektromagnetischen Welle.

### **Range-Richtung**

Richtung in die der Sensor die Radarstrahlung aussendet. Sie ist orthogonal zur Flugrichtung.

### **Slant-range**

Schrägentfernung eines Objektes zum Aufnahmesensor. In Slant-Range-Bildern liegen die Objekte an Positionen entsprechend ihrer Entfernung zum Aufnahmesensor. Die Distanzen zwischen einzelnen Objekten entsprechen somit nicht der Realität am Erdboden.

### **Sigma naught ( $\sigma^0$ )**

Normalisierter Rückstreuquerschnitt in [dB] Er gibt die Rückstreuintensität einer Fläche an.

### **Synthetic Aperture Radar (SAR)**

Radar system das eine höhere Azimuth-Auflösung erzielt, indem der Dopplereffekt ausgenutzt wird. Auf diese Weise wird die Antennenlänge künstlich verlängert.

### **Volumenstreuung**

Volumenstreuung tritt in einem in seinen dielektrischen Eigenschaften inhomogenen Medium auf.

232	Kerstin Panten (2002) <b>Ein Beitrag zur Fernerkundung der räumlichen Variabilität von Boden- und Bestandesmerkmalen</b>	7,00€
233	Jürgen Krahl (2002) <b>Rapsölmethylester in dieselmotorischer Verbrennung — Emmissionen, Umwelteffekte, Optimierungspotenziale</b>	10,00€
234	Roger J. Wilkins and Christian Paul (eds.) (2002) <b>Legume Silages for Animal Production — LEGSIL</b>	7,00€
235	Torsten Hinz . Birgit Rönnpagel and Stefan Linke (eds.) (2002) <b>Particulate Matter in and from Agriculture</b>	7,00€
236	Mohamed A. Yaseen (2002) <b>A Molecular Biological Study of the Preimplantation Expression of Insulin-Like Growth Factor Genes and Their Receptors in <i>In Vitro</i> Produced Bovine Embryos to Improve <i>In Vitro</i> Culture Systems and Embryo Quality</b>	8,00€
237	Mohamed Ali Mahmoud Hussein Kandil (2002) <b>The effect of fertilizers for conventional and organic farming on yield and oil quality of fennel (<i>Foeniculum vulgare</i> Mill.) in Egypt</b>	7,00€
238	Mohamed Abd El-Rehim Abd El-Aziz Hassan (2002) <b>Environmental studies on coastal zone soils of the north Sinai peninsula (Egypt) using remote sensing techniques</b>	7,00€
239	Axel Munack und Jürgen Krahl (Hrsg.) (2002) <b>Biodiesel — Potenziale, Umweltwirkungen, Praxiserfahrungen —</b>	7,00€
240	Sylvia Kratz (2002) <b>Nährstoffbilanzen konventioneller und ökologischer Broilerproduktion unter besonderer Berücksichtigung der Belastung von Böden in Grünausläufen</b>	7,00€
241	Ulf Prübe and Klaus-Dieter Vorlop (eds.) (2002) <b>Practical Aspects of Encapsulation Technologies</b>	9,00€
242	Folkhard Isermeyer (Hrsg.) (2002) <b>Milchproduktion 2025</b>	9,00€
243	Franz-Josef Bockisch und Siegfried Kleisinger (Hrsg.) (2003) <b>13. Arbeitswissenschaftliches Seminar</b>	8,00€
244	Anja Gassner (2003) <b>Factors controlling the spatial specification of phosphorous in agricultural soils</b>	9,00€
245	Martin Kücke (Hrsg.) (2003) <b>Anbauverfahren mit N-Injektion (CULTAN) — Ergebnisse, Perspektiven, Erfahrungen</b>	7,00€
246	Jeannette van de Steeg (2003) <b>Land evaluation for agrarian reform. A case study for Brazil</b>	7,00€
247	Mohamed Faisal b. Mohd Noor (2003) <b>Critical assessment of a ground based sensor technique for adressing the nitrogen requirements of cereals</b>	7,00€
248	Esmat W. A. Al-Karadsheh (2003) <b>Potentials and development of precision irrigation technology</b>	8,00€
249	Andreas Siegfried Pacholsky (2003) <b>Calibration of a Simple Method for Determining Ammonia Volatilisation in the Field — Experiments in Henan, China, and Modelling Results</b>	9,00€
250	Asaad Abdelkader Abdalla Derbala (2003) <b>Development and evaluation of mobile drip irrigation with center pivot irrigation machines</b>	9,00€

251	Susanne Freifrau von Münchhausen (2003) <b>Modellgestützte Analyse der Wirtschaftlichkeit extensiver Grünlandnutzung mit Mutterkühen</b>	8,00€
252	Axel Munack, Olaf Schröder, Hendrik Stein, Jürgen Krahl und Jürgen Bünger (2003) <b>Systematische Untersuchungen der Emissionen aus der motorischen Verbrennung vom RME, MK1 und DK</b>	5,00€
253	Andrea Hesse (2003) <b>Entwicklung einer automatisierten Konditionsfütterung für Sauen unter besonderer Berücksichtigung der Tierleistung</b>	8,00€
254	Holger Lilienthal (2003) <b>Entwicklung eines bodengestützten Fernerkundungssystems für die Landwirtschaft</b>	8,00€
255	Herwart Böhm, Thomas Engelke, Jana Finze, Andreas Häusler, Bernhard Pallutt, Arnd Verschwele und Peter Zwerger (Hrsg.) (2003) <b>Strategien zur Regulierung von Wurzelunkräutern im ökologischen Landbau</b>	10,00€
256	Rudolf Artmann und Franz-Josef Bockisch (Hrsg.) (2003) <b>Nachhaltige Bodennutzung — aus technischer, pflanzenbaulicher, ökologischer und ökonomischer Sicht</b>	9,00€
257	Axel Munack und Jürgen Krahl (Hrsg.) (2003) <b>Erkennung des RME-Betriebes mittels eines Biodiesel-Kraftstoffsensors</b>	5,00€
258	Martina Brockmeier, Gerhard Flachowsky und Ulrich von Poschinger-Camphausen (Hrsg.) (2003) <b>Statusseminar Welternährung Beiträge zur globalen Ernährungssicherung</b>	9,00€
259	Gerold Rahmann und Hiltrud Nieberg (Hrsg.) (2003) <b>Ressortforschung für den ökologischen Landbau 2002</b>	8,00€
261	Katja Hemme-Seifert (2003) <b>Regional differenzierte Modellanalyse der Erzeugung von Biomasse zur energetischen Nutzung in Deutschland</b>	7,00€
262	Folkhard Isermeyer (Hrsg.) (2003) <b>Fleisch 2025</b>	9,00€
263	Ernst-Jürgen Lode und Franz Ellendorff (Hrsg.) (2003) <b>Perspektiven in der Tierproduktion</b>	7,00€
264	Johannes Holzner (2004) <b>Eine Analyse der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der Milcherzeugung an ausgewählten Standorten in Ostdeutschland, der Tschechischen Republik und Estland</b>	10,00€
265	Tarek Abd Elaziz Wahba Shalaby (2004) <b>Genetical and nutritional influences on the spear quality of white asparagus (<i>Asparagus officinalis</i> L.)</b>	7,00€
266	Erik Zillmann (2004) <b>Einsatz multi-dimensionaler Radardaten zur Erfassung der räumlichen Variabilität von Bestandesmerkmalen</b>	9,00€
267	Sergiy Parkhomenko (2004) <b>International competitiveness of soybean, rapeseed and palm oil production in major producing regions</b>	11,00€

Viele frühere Sonderhefte sind weiterhin lieferbar.

Bei Interesse setzen Sie sich bitte mit Frau Röhm unter 0531-596-1403 oder [landbauforschung@fal.de](mailto:landbauforschung@fal.de) in Verbindung.