

Charakterisierung von Getreidearten aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten auf der Basis von 4D-Bestandsmodellen

vorgelegt von
Dipl.-Geogr.
Daniel Spengler
aus Potsdam

von der Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Naturwissenschaften
- Dr. rer. nat. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. Ingo Kowarik
Erstgutachterin: Prof. Dr. Birgit Kleinschmit
Zweitgutachter: Prof. Dr. Hermann Kaufmann

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 18. Dezember 2013

Berlin 2014
D83

für

Jari & Milo

Dank

Die vorliegende Dissertation entstand am Deutschen GeoForschungsZentrum Potsdam in der Sektion Fernerkundung. Mein besonderer Dank gilt daher dem Leiter der Sektion, Prof. Dr. Hermann Kaufmann, der mir ausgezeichnete Rahmenbedingungen für die Durchführung dieser Arbeit geschaffen hat und mir die Präsentation der Forschungsergebnisse auf nationaler und internationaler Ebene ermöglichte. Großen Dank schulde ich ihm weiterhin für seine fortwährende Unterstützung und die Betreuung während der Promotionszeit, sowie die Begutachtung dieser Arbeit

Frau Prof. Dr. Birgit Kleinschmidt von der Technischen Universität Berlin danke ich für ihre fortwährende Unterstützung und Motivation. Des Weiteren sei ihr sehr für die Übernahme des Erstgutachtens gedankt.

In der Fernerkundung ist man wie in kaum einer anderen Disziplin auf gute Daten angewiesen. Für die Bereitstellung der *HyMap* Daten des Gebietes Demmin danke ich Dr. Erik Borg vom DLR Neustrelitz. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Jürgen Frenzel von der Agrar-GbR Frenzel-Schmidt und Prof. Dr. Frank-M. Chmielewski von der HU Berlin für den Zugang zu ihren Flächen im Rahmen der zahlreichen Feldmessungen. In diesem Zusammenhang möchte ich allen Kollegen, studentischen Hilfskräften und Praktikanten danken, die mich während der zahlreichen Messkampagnen unterstützt haben.

Mein herzlicher Dank gilt Dr. Sibylle Itzerott. Durch sie bin ich erst von der Thematik der Fernerkundung landwirtschaftlicher Flächen begeistert und jederzeit unterstützt worden. Darüber hinaus danke ich ihr für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und das Korrekturlesen der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Theres Küster, die mir während unserer gemeinsamen Promotionszeit und darüber hinaus stets mit Rat und Tat zur Seite stand. Überdies danke ich ihr für die fortwährende Unterstützung bei der Umsetzung meiner mitunter kläglichen Programmiersuche, sowie die Möglichkeit ihre zahlreichen Programme zu nutzen.

Ein herzlicher Dank gilt all meinen Kollegen der Sektion Fernerkundung, die mit ihrer Hilfs- und Diskussionsbereitschaft sowie der fantastischen Atmosphäre wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen. Dr. Karl Segl und Dr. Christian Rogaß danke ich im

Speziellen für Ihre zahlreichen programmtechnischen Umsetzungen und inhaltlichen Diskussionen.

Ich möchte mich bei allen Korrekturlesern für die aufgebrauchte Zeit und Nerven bedanken: Dr. Henryk Dobslaw & Julia Neelmeijer für die Durchsicht aller Kapitel und die Hinweise zur logischen Struktur, Dr. Theres Küster & Dr. Sibylle Itzerott für die Durchsicht aller Kapitel, Dr. Christian Rogaß für die Hinweise zum Theorieteil, Sandra Spengler für die sprachliche „Optimierung“.

Meinen Eltern danke ich ebenfalls für Ihre Orthografie- und Grammatikkontrolle der Arbeit. Darüber hinaus danke ich Ihnen für ihre vielseitige Unterstützung, ihren Rückhalt und ihr Vertrauen auf dem gesamten Weg meiner schulischen und universitären Ausbildung.

Meiner Frau Sandra danke ich für ihre fortwährende moralische Unterstützung und die wunderbare Zeit abseits der Wissenschaft. Du bist für mich viel mehr, als ich mit Worten ausdrücken kann!

Zusammenfassung

Eine Hauptaufgabe der fernerkundlichen Analyse von Ackerflächen ist die Charakterisierung von Pflanzenbeständen nach Arten und Bewuchseigenschaften. Dazu kommen häufig optische Fernerkundungsdaten zum Einsatz, die mittels überwachter Klassifizierungsverfahren ausgewertet werden. Diese Verfahren benötigen Trainingsdaten, die aus den zu analysierenden Bilddaten selektiert bzw. in zuvor aufgebauten spektralen Datenbanken vorgehalten werden. Das erfordert in der Regel einen hohen Aufwand zur Gewinnung von In-situ-Informationen über die Verteilung und den Zustand der Arten, was die Anwendbarkeit und regionale Übertragbarkeit dieser Verfahren einschränkt. Deshalb gibt es seit längerem Bestrebungen, Auswerteverfahren zu entwickeln, die auf der Basis unabhängiger Trainingsdaten arbeiten.

Zu diesem Zweck wurde im Rahmen dieser Arbeit erstmals die Eignung simulierter Bestandsreflexionsdaten für die Verwendung als unabhängige Eingabetrainingsdaten für die Klassifizierung von Fernerkundungsdaten unterschiedlicher spektraler Auflösung untersucht. Hierfür wurde ein spektrales, räumliches und zeitliches Simulationsmodell zur Modellierung der Bestandsreflexion der in Deutschland flächenmäßig am häufigsten angebaute Getreidearten Winterweizen, Wintergerste und Winterroggen entwickelt. Das System zeichnet sich durch die Integration detaillierter, virtueller 4D Pflanzenmodelle aus, wobei deren phänologische Entwicklung vollständig abgebildet und mit den entsprechenden spektralen Informationen verknüpft wurde. Die Einbeziehung der sensor-spezifischen Aufnahmegeometrien sowie der solaren Einstrahlungswinkel ermöglicht eine realitätsnahe Simulation der Bestandsreflexion in Abhängigkeit des zu klassifizierenden Fernerkundungsdatensatzes.

Die Definition der Simulationsparameter für die Erzeugung der Trainingsdaten erfordert außerdem eine spezifische Analyse der spektralen Einflüsse weiterer bestandsoptischer und bestandsstruktureller Parameter, da das Reflexionssignal neben der Pflanzenart und deren phänologischer Entwicklung auch von zahlreichen anderen Parametern wie z.B. der Pflanzdichte und dem Reihenabstand abhängig ist. Zur Einbeziehung all dieser Parameter wurden insgesamt über 50.000 verschiedene Getreidebestände mit variierenden Bestandsstrukturmerkmalen und optischen Eigenschaften simuliert. Auf Grundlage der Analyseergebnisse und unter Berücksichtigung der schlaginternen Heterogenität eines Getreidebestandes erfolgte die Definition der Simulationsparameter zur Erzeugung der synthetischen Trainingsdaten.

Für die anschließende Klassifizierung wurde ein paarweiser-*Maximum-Likelihood*-Ansatz für die Integration synthetischer Trainingsdaten adaptiert und auf vier Untersuchungsgebiete zu insgesamt sechs Aufnahmezeitpunkten angewendet, wobei die Fernerkundungsdaten sowohl von hyperspektralen (*HyMap*, *AISADual* und *HySpec*) als auch daraus simulierten multispektralen Aufnahmesystemen (*Landsat-TM7*, *RapidEye*, *Sentinel-2* und *WorldView-2*) stammen. Im Fall der Hyperspektraldaten konnten bei optimaler Merkmalsauswahl und repräsentativer Simulation der Bestandsspektren die besten Klassifizierungsergebnisse erzielt werden (Gesamtklassifizierungsgenauigkeit 94%, mittlere Klassifizierungsgenauigkeit 96%, Cohens-Kappa-Koeffizient 0,92). Dabei gelang auch eine kombinierte Bestimmung von Pflanzenart und deren phänologischer Entwicklung. Die Klassifizierungsergebnisse der multispektralen Daten erreichen bei gleichen Voraussetzungen zwar nicht diese Genauigkeiten, sind für Aussagen für einen Gesamt-schlag jedoch ausreichend. Bei der Übertragung des Klassifizierungsansatzes ergaben sich zumeist geringere Klassifizierungsgenauigkeiten, die in erster Linie durch starken Aufwuchs an Begleitvegetation und einen höheren Einfluss des Bodensignals bedingt sind. Für eine standortunabhängige Anwendung der Methode ist daher eine Erweiterung der Simulationsdatenbasis um weitere Fruchtarten sowie Bodeneigenschaften und Begleitvegetation erforderlich.

Die Arbeit zeigt das große Potenzial synthetischer Trainingsdaten auf der Basis detaillierter 4D-Bestandsmodelle für die in-situ-Daten unabhängige Klassifizierung von Fernerkundungsdaten auf. Dem einmaligen recht hohen Simulationsaufwand steht ein breites und universales Anwendungsspektrum gegenüber, wodurch die Auswertung der Daten zukünftiger Fernerkundungsmissionen wie *Sentinel-2* oder *EnMAP* im Hinblick auf die Charakterisierung von Ackerflächen erleichtert werden kann.

Abstract

One of the main goals of agricultural remote sensing is the determination of the crop type and the characteristics of the canopies. For that purpose often optical remote sensing data are used, that are analysed by supervised classification. These methods require trainings samples that have to be selected in the image data or must be provided by previously built up spectral databases. The information about land use and crop status is typically gathered by extensive in-situ-acquisitions. Therefore, the usability and transferability of these methods is generally limited. Currently, various research activities concentrate on classification methods using independent trainings samples.

For this purpose, in the context of this thesis the suitability of simulated canopy reflectance data as independent trainings samples for the classification of remote sensing data of differing spectral resolution is investigated for the first time. Therefore, a spectral, spatial and temporal canopy reflectance simulation system was developed for the most commonly grown grains in Germany - winter wheat, winter barley and winter rye. The system is characterized by the integration of detailed 3-D virtual plant models whereby their phenological development has been completely mapped and linked to the corresponding spectral information. The inclusion of sensor-specific acquisition geometries and of solar radiation angle geometries allows a realistic simulation of the canopy reflectance in dependence of the remote sensing data set to be classified.

The definition of the simulation parameters for the generation of training data also requires a specific analysis of the spectral influences of other optical and structural canopy parameters. Besides of the species and the phenological development the canopy reflectance data are influenced by many other parameters such as seeding density, and the seeding row distance. Over 50,000 different canopy configurations were simulated with varying canopy structure characteristics and optical properties for the integration of all these parameters. Based on the analysis results and considering the impact of internal heterogeneity of a natural grain canopy the definition of the simulation parameters for the generation of synthetic training data was established.

For the subsequent classification, a pairwise maximum likelihood approach is adapted for the integration of synthetic training data and is applied on six data sets of four different test sites. Besides hyperspectral image data (*HyMap*, *AISADual* and *HySpex*), simulated multispectral data (*Landsat-TM7*, *RapidEye*, *Sentinel-2* and *WorldView-2*) are used for the classification. With optimal feature selection and representative simulation

of the canopy reflectance spectra, the best classification results are obtained by hyperspectral data (overall classification accuracy of 94 %, average classification accuracy of 96 %, Cohens-Kappa-Coefficient 0.92). A combined determination of plant species and their phenological development is also achieved. Although the classification results of the multispectral data do not achieve these accuracies, but are sufficient enough for statements about the overall canopy characteristics. Transfer of the classification method mostly gave lower classification accuracies, which are caused by strong grow up of accompanying vegetation and a higher influence of the soil signal. For a location-independent application of the method, therefore an extension of the simulation data base to more crops and integration location specific soil properties and accompanying vegetation is required.

The work demonstrates the great potential of synthetic training data on the basis of detailed 4D canopy models for in-situ-data independent classification of remote sensing data. The simulation effort is quite high, but has to be done only one time. On the other hand the method enables a broad and universal range of applications facilitating the characterization of arable land by future remote sensing data missions like *Sentinel-2* or *EnMAP*.

Inhalt

Dank	v
Zusammenfassung	vii
Abstract	ix
Inhalt	xi
Abbildungsverzeichnis	xv
Tabellenverzeichnis	xxi
Abkürzungsverzeichnis	xxv
Formelverzeichnis	xxix
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielstellung	1
1.2 Struktur der Arbeit	4
2 Theoretische Grundlagen der Fernerkundung	7
2.1 Der Weg der Strahlung von der Sonne zum Fernerkundungssensor	7
2.1.1 Strahlungsquelle	7
2.1.2 Interaktion der elektromagnetischen Strahlung mit der Atmosphäre	8
2.1.3 Strahlungskomponenten	9
2.1.4 Interaktion der elektromagnetischen Strahlung mit der Oberfläche	11
2.2 Abbildende Spektrometer	12
2.2.1 Aufnahmeprinzip	13
2.2.2 Abbildende Spektrometer	14

2. 3	Prozessierung von Fernerkundungsdaten	16
2.3.1	Korrektur des Sensoreinflusses	16
2.3.2	Korrektur des Atmosphäreneinflusses	17
2.3.3	Geometrische Korrektur	18
<hr/>		
3	Vegetationsfernerkundung	21
<hr/>		
3. 1	Phänologische Entwicklung von Getreide	21
3. 2	Blattoptische Eigenschaften	22
3.2.1	Blattstruktur	22
3.2.2	Biochemische Inhaltsstoffe	23
3. 3	Bestandsoptische Eigenschaften	24
<hr/>		
4	Untersuchungsgebiete und Felddaten	29
<hr/>		
4. 1	Berlin / Brandenburg	30
4. 2	Demmin	31
4. 3	Fichtwald	31
4. 4	Aufnahmen im Feld	32
4.4.1	Spektrale Messdaten	33
4.4.2	Vegetationsdaten	34
4.4.3	Bodendaten	35
<hr/>		
5	Reflexionsmodellierung von Getreidebeständen	37
<hr/>		
5. 1	Modellierung von blattoptischen Eigenschaften	37
5. 2	Modellierung von bestandsoptischen Eigenschaften	38
5.2.1	Strahlungstransfermodelle	38
5.2.2	Geometrisch optische Modelle	39
5.2.3	Computersimulationsmodelle	40
5.2.4	Auswahl des Modellierungsverfahrens	43
5. 3	Generierung von 4D-Pflanzenmodellen mit der Software AmapSim	44
5.3.1	Prozedurale Modellierung	44
5.3.2	Grundlagen des AmapSim Modells	45
5.3.3	Biologischer, topologischer und geometrischer Aufbau der Pflanzenmodelle	49
5.3.4	Wachstumsmodellierung	53
5.3.5	Optimierung der Pflanzenmodelle für das Raytracing	59
5. 4	Modellierung des Strahlungsverhaltens von Getreidebeständen	60
5.4.1	Generierung von 4D-Getreidebeständen auf der Basis von Felddaten	60
5.4.2	aDvanced Radiometric rAyTracer (<i>drat</i>)	62

6	Bewertung des Einflusses struktureller Parameter auf die Bestandsreflexion	71
6. 1	Struktureller Einfluss der Phänologie auf die Bestandsreflexion	72
6. 2	Einfluss der Verteilung der Pflanzen – Reihenabstand	76
6. 3	Einfluss der relativen Reihenorientierung	80
6. 4	Einfluss der Verteilung der Pflanzen – Pflanzendichte	83
6. 5	Einfluss des Bodensignals am Beispiel Bodenfeuchte	88
6. 6	Einfluss der Beleuchtungs- und Aufnahmegeometrie	90
6.6.1	Einfluss des Sensorblickwinkels	92
6.6.2	Einfluss der Aufnahmezeit	93
6. 7	Bedeutung der analysierten Parameter auf das Reflexionssignal von Pflanzenbeständen und deren Relevanz für die Klassifizierung	95
7	Klassifizierung optischer Fernerkundungsdaten auf der Basis modellierter Reflexionsdaten	97
7. 1	Simulation von Trainingsdaten für die Klassifizierung	97
7. 2	Anwendung klassischer Klassifizierungsverfahren in Kombination mit modellierten Trainingsdaten auf hyperspektrale Bilddaten	99
7. 3	Verfahren zur Reduzierung des Merkmalsraumes	104
7. 4	Paarweise-Maximum-Likelihood-Klassifizierung mit wissensbasierter Merkmalsauswahl	104
7.4.1	Klassifizierungsablauf	105
7.4.2	Simulation multispektraler Bilddaten	108
7.4.3	Klassifizierungsergebnisse	109
8	Diskussion	115
8. 1	Evaluierung des Potenzials synthetischer Trainingsdaten auf der Basis von 4D-Bestandsmodellen zur Bestimmung von Getreidearten und deren Phänologie	115
8.1.1	Bewertung der Klassifizierungsergebnisse	115
8.1.2	Bedeutung der Merkmalsselektion	119
8.1.3	Interpretation der Fehlklassifikationen	122
8. 2	Einfluss der spektralen Auflösung auf die Klassifizierungsgenauigkeit	125
9	Schlussfolgerung und Ausblick	127

Literaturverzeichnis	131
Anhang A Phänologieabbildung	145
Anhang B Datengrundlage	149
Anhang C AmapSim Eingabeparameter	151
Anhang D Bedeckungsgradanalyse - Modell vs. Realität	155
Anhang E Einfluss des Reihenabstands	157
Anhang F Einfluss der Reihenorientierung bei einem Reihenabstand von 13 - 17 cm	163
Anhang G Einfluss der Reihenorientierung bei einem Reihenabstand von 22-26 cm	169
Anhang H Einfluss der Pflanzendichte	175
Anhang I Einfluss der Bodenfeuchte	181
Anhang J Klassifizierungsergebnisse	187
Eigenständigkeitserklärung	197

Abbildungsverzeichnis

2-1:	Vergleich der Energie der Sonneneinstrahlung am Rand der Atmosphäre, der Erdoberfläche und eines schwarzen Körpers ($T=5250^{\circ}\text{C}$). Zusätzlich sind die atmosphärisch bedingten Hauptabsorptionsbanden gekennzeichnet.....	8
2-2:	Wege der elektromagnetischen Strahlung zum Sensor.....	9
2-3:	Vergleich der spektralen Auflösung a) hyper- und b) multispektraler Fernerkundungsdaten eines Vegetations- und Bodenspektrums.....	13
2-4:	Aufnahmeprinzip eines Whiskbroom (a) und Pushbroom (b) Scanners.....	14
2-5:	Ausschnitt der <i>AISA Dual</i> -Szene des UG-Fichtwald vom 30.04.2011 in original überführten Radianzwerten und den entsprechenden mit ROME-korrigierten Daten, sowie ein Graph des Mittelwertes dieses Ausschnitts	17
3-1:	Schematische Darstellung der Interaktion elektromagnetischer Strahlung mit einem dikotylen Blatt im VNIR.	23
3-2:	Absorptionsspektrum der hauptsächlichen Blattpigmente (Blackburn 2006).....	24
3-3:	BRDF eines Winterroggenbestandes im Stadium der Fruchtentwicklung bei 550 nm (VIS) und 800 nm (NIR) mit einem Sonnenzenit von 30° (<i>Hotspot</i>).....	25
3-4:	Einfluss mehrerer Blattschichten auf das Reflexionsverhalten	26
3-5:	Einfluss der sortenspezifischen Blatthaltung auf den Bedeckungsgrad eines Weizenbestandes bei 24 cm Reihenabstand.....	27
3-6:	Orientierung der Ähren in eine Hauptausrichtung im Testgebiet Wittbrietzen.	27
4-1:	Lage der Untersuchungsgebiete und der hyperspektralen Flugzeugscannerdaten innerhalb der Testgebiete.	30
4-2:	Lage der Testflächen und der Beprobungstransekte der Jahres 2007 und 2008 für die Testgebiete Wittbrietzen und Groß Kreutz	32
5-1:	Strahlungstransfermodelle aus trüben Medien	39
5-2:	einfache geometrische Modelle	40
5-3:	Hybridmodelle.....	40
5-4:	Komplexe geometrische Modelle	40

5-5:	Schematische Darstellung der axialen Aufteilung und dessen Aufgliederung.	46
5-6:	Einfluss des zulässigen Verzweigungsgrades auf den Modellaufbau.....	47
5-7:	Einbindungsmöglichkeit externer Module in das Programm AmapSim	49
5-8:	Topologischer Aufbau des "Wurzelsystems".....	50
5-9:	Aufbau einer AmapSim modellierten Getreidepflanze mit physiologischem Alter der Pflanzenbestandteilen und Krümmungsschema durch Gewichtszunahme der Ähre.....	51
5-10:	Beispielhafte Darstellung genutzter Blattgeometrie von der Seite (a) und von oben (b) gerendert mit Blender.....	52
5-11:	Ährengeometrie von Gerste (a), Roggen (b) und Weizen (c) im BBCH Makrostadium 8 mit Blick von der Seite (oben) und von oben (unten).	53
5-12:	Einteilung des Entwicklungszyklus von Getreidepflanzen in Makro- und Mikrostadien nach BBCH Skala (verändert nach Meier 2001) und der entsprechenden Simulationsstadien.	55
5-13:	Modellierungsergebnisse für Winterroggen in den gewählten Simulationsstadien (oben - Seitenansicht, unten - Draufsicht).....	56
5-14:	Modellierungsergebnisse für Wintergerste in den gewählten Simulationsstadien (oben - Seitenansicht, unten - Draufsicht).....	57
5-15:	Modellierungsergebnisse für Winterweizen in den gewählten Simulationsstadien (oben - Seitenansicht, unten - Draufsicht).....	58
5-16:	Schematischer Aufbau des Simulationsweges der Bestandsreflexion.	60
5-17:	Variation der Reihenorientierung (oben) und des Reihenabstandes (unten).....	61
5-18:	Modellierungsergebnis für Wintergerste in unterschiedlichen phänologischen Entwicklungsstadien (BBCH) in Schräg- (oben) und Nadirsicht (unten).	63
5-19:	Gegenüberstellung von Feldfotos (a), klassifizierten Feldfotos (b), Simulationsergebnissen (c) und klassifizierten Simulationsergebnissen (d) für Winterroggen.....	67
5-20:	Entwicklung des Bedeckungsgrades der Feldmessungen und der modellierten Bestände für a) Wintergerste b) Winterroggen und c) Winterweizen.....	68
5-21:	Entwicklung des LAI der modellierten Pflanzenbestände a) Wintergerste, b) Winterroggen und c) Winterweizen.....	68
5-22:	Übersicht der spektralen Validierungsergebnisse in Bezug auf <i>HyMap</i> Bilddaten des UG-Wittbrietzen (20.06.2007).	70
6-1:	Entwicklung der trockenen Biomasse im Laufe einer Vegetationsperiode basierend auf Feldmessungen der Jahre 2007 u. 2008 im UG-Wittbrietzen.....	72

6-2:	Reflexionsverhalten von Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen bei konstanten optischen Pflanzeigenschaften in den unterschiedlichen BBCH Wachstumsstadien.	74
6-3:	Einfluss variierender optischer Pflanzeigenschaften auf das Reflexionsverhalten (Nadir) von Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen in den unterschiedlichen BBCH Wachstumsstadien.....	75
6-4:	Einfluss des Reihenabstands auf das Reflexionsverhalten (Nadir) von Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen.....	77
6-5:	Einfluss des Reihenabstands auf die Reflexion von Wintergerste in den Stadien a) Bestockung b) Schossen, c) Ährenschieben, d) Vollreife.	78
6-5:	Einfluss des Reihenabstands auf die Reflexion von Winterroggen in den Stadien a) Bestockung b) Schossen, c) Ährenschieben, d) Vollreife.	79
6-6:	Einfluss des Reihenabstands auf die Reflexion von Winterweizen in den Stadien a) Bestockung b) Schossen, c) Ährenschieben, d) Vollreife.	79
6-7:	Einfluss der Reihenorientierung auf die Varianz der Bestandsreflexion in Abhängigkeit des Reihenabstands.	81
6-8:	Einfluss der Reihenorientierung auf die Bestandsreflexion (Nadir) bei einem Reihenabstand von 13 - 17 cm (links) und 22 - 26 cm (rechts).....	82
6-9:	Einfluss der Reihenorientierung auf die Reflexion (gemittelt über alle Kanäle) bei einem Reihenabstand von 22 - 26 cm.	83
6-10:	Änderung des Reflexionsverhaltens (linke Spalte) und Regressionsanalyse des Einflusses der Pflanzendichte auf das Reflexionsverhalten bei Wellenlängen von 480 nm, 554 nm, 686 nm und 980 nm von Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen zum Ende der Bestockung, Stadium 3 (rechte Spalte).	86
6-11:	Änderung des Reflexionsverhaltens (linke Spalte) und Regressionsanalyse des Einflusses der Pflanzendichte auf das Reflexionsverhalten bei Wellenlängen von 480 nm, 554 nm, 686 nm und 868 nm von Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen zum Ende der Frucht und Samenreife, Stadium 9 (rechte Spalte).	87
6-12:	Optische (links) und spektrale (rechts) Veränderung der für die Simulation verwendeten Bodenprobe mit zunehmender Bodenfeuchte.....	88
6-13:	Einfluss der Bodenfeuchte auf die Bestandsreflexion in Abhängigkeit von der phänologischen Entwicklung (BBCH).	89
6-14:	Einfluss der Bodenfeuchte auf die Bestandsreflexion von Wintergerste für die Wachstumsstadien Bestockung (Stadium 2) und Ende Ährenschieben (Stadium 7).	90

6-15:	Veränderung des Sonnenstands für das UG-Wittbrietzen in Abhängigkeit von Aufnahme­datum und Uhrzeit (UTC), Angabe des Zenitwinkels (ϕ_s) und des Azimutwinkels (θ_s) der Sonne.	91
6-16:	Veränderung des Variationskoeffizienten bei variierendem Sensorzenitwinkel für Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen.	92
6-17:	Einfluss des Sensorzenitwinkels auf das Reflexionsverhalten am Beispiel von Winterroggen in den Stadien Bestockung (02), Schossen (04), Beginn der Frucht- und Samenreife (09) und Absterben (12) bei einem Sonnenstand vom 21.06.2012 für das UG-Wittbrietzen.	93
6-18:	Einfluss von Aufnahmezeit und Sensorblickwinkel auf die Reflexion von Winterroggen und Winterweizen im Schossen.	94
6-19:	Einfluss von Aufnahmezeit und Sensorblickwinkel auf die Reflexion von Wintergerste und Winterweizen in der Frucht- und Samenreife.	95
7-1:	Darstellung der für die Aufnahmezeitpunkte der Bilddaten möglichen Entwicklungsstadien für Winterroggen, Winterweizen und Wintergerste.	98
7-2:	Statistische Verteilung der modellierten Daten im Vergleich zu den <i>HyMap</i> Daten der Testflächen des Untersuchungsgebietes Wittbrietzen.	103
7-3:	Ablauf der iterativen Merkmalsselektion.	106
7-4:	Anwendung des <i>pMLK</i> zur Klassifizierung eines Pixels mit drei möglichen Zielklassen (verändert nach Bochow 2009).	107
7-5:	Ablaufdiagramm der Klassifizierung bei Verwendung des <i>pMLKsim</i> (links) und des <i>pMLKsim+</i> (rechts).	108
7-6:	Klassifizierungsergebnisse des <i>pMLKsim</i> (<i>a</i> , <i>b</i>) und des <i>pMLKsim+</i> (<i>c</i> , <i>d</i>) für die gemeinsame Bestimmung der Pflanzenart und der Phänologie (<i>a</i> , <i>c</i>), sowie nur der Pflanzenart (<i>b</i> , <i>d</i>) für einen Ausschnitt der <i>HyMap</i> Daten des UG-Wittbrietzen (20.06.2007).	112
8-1:	Statistische Verteilung der modellierten Daten im Vergleich zu den <i>AISA</i> Daten der Testflächen des UG Fichtwald am 30.04.2011.	118
8-2:	Statistische Verteilung der modellierten Daten im Vergleich zu den <i>AISA</i> Daten der Testflächen des UG Fichtwald am 28.06.2011.	118
8-3:	Statistische Verteilung der modellierten Daten im Vergleich zu den <i>HySpex</i> Daten der Testflächen des UG Demmin am 25.05.2012.	119
8-4:	Durchsetzung von Teilflächen der Bestände von Wintergerste (links) und Winterroggen (rechts) des UG Wittbrietzen am 20.06.2007 mit Begleitvegetation.	122
8-5:	Gegenüberstellung des <i>pMLKsim+</i> Klassifizierungsergebnisses des <i>HyMap</i> Datensatzes (links) und der Mähdrescher basierten Ertragsmessungen (rechts) für das UG Wittbrietzen im Jahr 2007.	123

8-6:	Durchsetzung der Bestände von Wintergerste (links) und Winterweizen (rechts) des UG Fichtwald am 30.04.2011 mit Begleitvegetation.	123
8-7:	Bestände von Wintergerste (links) und Winterweizen (rechts) des UG Fichtwald am 28.06.2011.....	124
8-8:	Bestände von Wintergerste (links) und Winterweizen (rechts) des UG Demmin am 25.05.2012 ohne Begleitvegetation.....	124
A-1:	Einteilung des Entwicklungszyklus von Getreidepflanzen in Makro- und Mikrostadien nach BBCH Skala und der entsprechenden Simulationsstadien. ..	147

Tabellenverzeichnis

2-1: Übersicht der Sensorparameter.....	15
2-2: Überblick notwendiger Prozessierungsschritte von hyperspektralen Fernerkundungsdaten.	16
5-1: Reduzierung der Polygonzahl eines Pflanzenmodells am Beispiel der Wintergeste.....	59
5-2: Validierungsergebnisse: ++ sehr gute Form und sehr gute Albedo, + gute Form und sehr gute Albedo, ** sehr gute Form und abweichende Albedo, * gute Form und abweichende Albedo, - ausreichende Form und sehr gute Albedo.	66
6-1: Einflussparameter auf das Reflexionsverhalten von Pflanzenbeständen.....	71
6-2: Konstantes Reflexionsverhalten der Szenenelemente für die Analyse des Einflusses der Bestandsstruktur auf die Gesamtreflexion.....	73
6-3: Variables Reflexionsverhalten der Szenenelemente für die Analyse des Einflusses der Bestandsstruktur auf die Gesamtreflexion.....	73
6-4: LAI Werte der modellierten Getreidetestflächen, unterschieden in realen LAI und unter Einbeziehung der Ähren.....	74
6-5: LAI der zur Untersuchung des Einflusses des Reihenabstands auf das Reflexionsverhalten verwendeten simulierten Bestände von Winterroggen, Winterweizen und Wintergerste.	77
6-6: Simulationskonfiguration zur Analyse des Einflusses der Reihenorientierung....	80
6-7: Simulationskonfiguration für die Analysen des Einflusses der Pflanzdichte.	84
6-8: Übersicht verwendeter Funktionen zur Beschreibung des Reflexionsverhaltens ausgewählter Wellenlängen.	84
6-9: Simulationskonfiguration für die Analysen des Einflusses des Bodens.....	89
6-10: Simulationskonfiguration für die Analysen des Einflusses der Beleuchtungs- und Aufnahmegeometrie.....	91
7-1: Parametervariation für die Generierung modellierter Trainingsdaten.....	99

7-2:	Klassifizierungsgenauigkeiten unterschiedlicher Klassifizierungsmethoden und Eingabedatensätze für das Untersuchungsgebiet Wittbrietzen.	101
7-3:	Bandkonfiguration der simulierten Sensoren.	109
7-4:	Güteeinteilung der Klassifizierungsergebnisse	110
7-5:	Gesamtgenauigkeiten (oAcc), mittlere Genauigkeiten (aAcc) und Kappawerte der Ergebnisse der <i>pMLKsim</i> Klassifizierungen für die Arten- und Phänologiebestimmung.....	111
7-6:	Gesamtgenauigkeiten (oAcc), mittlere Genauigkeiten (aAcc) und Kappawerte der Ergebnisse der <i>pMLKsim</i> Klassifizierungen für die Arten- und Phänologiebestimmung.....	113
7-7:	Gesamtgenauigkeiten (oAcc), mittlere Genauigkeiten (aAcc) und Kappawerte der Ergebnisse der <i>pMLKsim</i> Klassifizierungen für die Artenbestimmung.	113
7-8:	Gesamtgenauigkeiten (oAcc), mittlere Genauigkeiten (aAcc) und Kappawerte der Ergebnisse der <i>pMLKsim+</i> Klassifizierungen für die Arten- und Phänologiebestimmung.....	114
7-9:	Gesamtgenauigkeiten (oAcc), mittlere Genauigkeiten (aAcc) und Kappawerte der Ergebnisse der <i>pMLKsim+</i> Klassifizierungen für die Artenbestimmung....	114
8-1:	Konfusionsmatrix der <i>pMLKsim</i> Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des <i>HyMap</i> Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.	116
8-2:	Veränderung der Genauigkeiten der <i>pMLKsim</i> Klassifizierung durch Einbeziehung benachbarter phänologischer Entwicklungsphasen für die Arten- und Phänologiebestimmung der Datensätze der UG Wittbrietzen und Groß Kreuz.	117
8-3:	Mittlere Änderung der Klassifizierungsgenauigkeiten zwischen den <i>pMLKsim</i> und den <i>pMLKsim+</i> Klassifizierungsergebnissen für die Bestimmung der Art und der Phänologie.....	120
8-4:	Unterschiede in der Merkmalsselektion zwischen <i>pMLKsim</i> und <i>pMLKsim+</i> für die <i>HyMap</i> Daten Wittbrietzen.	121
B-1:	Übersicht der Datengrundlagen und Aufnahmeparameter der hyperspektralen Flugzeugscannerdaten	149
D-1:	Vergleich des Bedeckungsrades basierend auf Feldfotos und der Auswertung modellierter Daten. Jedes Stadium wurde durch mehrere, zu einem Mittelwert mit Standardabweichung zusammengefasste Datensätze abgedeckt. (Mittelwert \pm Standardabweichung in [%]).....	155
J-1:	Konfusionsmatrix der <i>pMLKsim</i> Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des <i>HyMap</i> Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.	187

J-2:	Konfusionsmatrix der <i>pMLKsim+</i> Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten <i>HyMap</i> Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.....	188
J-3:	Konfusionsmatrix der <i>pMLKsim</i> Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten <i>Sentinel-2</i> Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.....	189
J-4:	Konfusionsmatrix der <i>pMLKsim+</i> Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten <i>Sentinel-2</i> Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.....	190
J-5:	Konfusionsmatrix der <i>pMLKsim</i> Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten <i>WorldView-2</i> Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.....	191
J-6:	Konfusionsmatrix der <i>pMLKsim+</i> Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten <i>WorldView-2</i> Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.....	192
J-7:	Konfusionsmatrix der <i>pMLKsim</i> Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten <i>Landsat TM7</i> Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.....	193
J-8:	Konfusionsmatrix der <i>pMLKsim+</i> Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten <i>Landsat TM7</i> Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.....	194
J-9:	Konfusionsmatrix der <i>pMLKsim</i> Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten <i>RapidEye</i> Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.....	195
J-10:	Konfusionsmatrix der <i>pMLKsim+</i> Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten <i>RapidEye</i> Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.....	196

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
4D	vierdimensional
6S	Strahlungstransfermodell (engl. <i>Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum</i>)
Abb.	Abbildung
AMAP	botAnique et bioinforMatique de l'Architecture des Plantes
AMAPsim	3D-Modellierungssoftware auf der Basis des AMAP Modells
AOT	optische Dichte der Atmosphäre (engl. <i>aerosol optical thickness</i>)
APDA	<i>Atmospheric Pre-corrected Differential Absorption</i> Algorithmus
ASD	Feldspektrometer von <i>Analytic Spectral Devices</i>
BRDF	bidirektionale Verteilungsfunktion (engl.: <i>bidirectional reflectance distribution function</i>)
bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
ca.	circa
CAI	Zellulose Absorptions Index (engl. <i>cellulose absorption index</i>)
CCD	Detektoreinheit (engl. <i>charge-coupled device</i>)
CIR	Color-Infrarot
cm	Zentimeter
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DGM	Digitales Geländemodell
DN	Grauwert (engl. <i>digital number</i>)
DC	Dunkelstrom (engl. <i>dark current</i>)
drat	<i>aDvanced Radiometric rAy Tracer</i>
engl.	englisch
EnMAP	<i>Environmental Mapping and Analysis Program</i>
et al.	Latein: und andere
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
FLAIR	Strahlungstransfermodell (engl. <i>Four-Scale Linear Model for Anisotropic Reflectance</i>)
FOV	Blickfeld (engl. <i>field of view</i>)
FWHM	Halbwertsbreite (engl. <i>full width at half maximum</i>)

GIFOV	im Blickfeld befindlichen Ausschnittes der Erdoberfläche (engl. <i>Ground-projected Instantaneous Field Of View</i>)
GFZ	Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
GPS	Globales Satellitennavigationssystem (engl. <i>Global Positioning System</i>)
ha	Hektar
HyMap	Hyperspektralscanner der Firma HyVista
INS	Trägheitsnavigationssystem, auch inertiales Navigationssystem
Jaxa	Japanische Raumfahrtagentur (engl. <i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>)
Ka	Kalium
Kap.	Kapitel
Kl.	Klasse
kg	Kilogramm
LAI	Blattflächenindex (engl. <i>leaf area index</i>)
LSN	normalisierte kleinste Quadrate (engl. <i>least square normalised</i>)
m	Meter
Mg	Magnesium
MCRT	Monte-Carlo-Ray-Tracing
Mio.	Million(en)
MODTRAN	Strahlungstransfermodell (engl. <i>Moderate Resolution Transmittance</i>)
MOMO	Strahlungstransfermodell
Mrd.	Milliarde(n)
N	Stickstoff
NASA	Amerikanische Raumfahrtagentur (engl. <i>National Aeronautics and Space Administration</i>)
NDVI	Vegetationsindex (engl. <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)
NIR	nahes Infrarot (engl. <i>near infrared</i>)
nm	Nanometer
oAcc	Gesamtgenauigkeit (engl. <i>overall accuracy</i>)
P	Phosphor
Pol.	Polynom
PpM	Anzahl von Pflanzen pro Meter
pMLK	Paarweiser Maximum Likelihood Klassifizierer
PMLKsim	Paarweiser Maximum Likelihood Klassifizierer auf der Basis simulierter Trainingsdaten
pMLKsim+	Paarweiser Maximum Likelihood Klassifizierer auf der Basis simulierter Trainingsdaten mit wissensbasierter Merkmalsselektion
RMSE	mittlere quadratische Abweichung (engl. <i>root mean square error</i>)
ROME	Enstreifungsroutine (<i>Reduction of Radiometric Miscalibration</i>)
SAIL	Strahlungstransfermodell (engl. <i>light Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves</i>)
SFS	engl. <i>sequential forward selection</i>
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis (engl. <i>signal-to-noise-ratio</i>)

SWIR	kurzwelliges Infrarot (engl. <i>short wave infrared</i>)
Tab.	Tabelle
u.a.	und andere
UG	Untersuchungsgebiet
UV	ultraviolette Strahlung
VIS	sichtbarer Bereich des elektromagnetischen Spektrums (engl. <i>visual radiance</i>)
VNIR	sichtbares und nahes Infrarot (engl. <i>visual and near infrared</i>)
Vs.	versus
WA	Weißabgleich
WG	Wintergerste
WR	Winterroggen
WVL	Wellenlänge
WW	Winterweizen
z.B.	zum Beispiel

Formelverzeichnis

α	Absorptionsgrad
dA_s	Fläche der Sonnenscheibe
c	Lichtgeschwindigkeit
C_{LSN}	Kostenfunktion nach der Methode der kleinsten Quadrate
D	Abstand zwischen Erde und Sonne
DN_{OF}	Grauwert der Zieloberfläche in DN
DN_{WS}	Grauwert der Weißstandards in DN
E_{λ}^E	Extraterrestrische spektrale Einstrahlung
E_{λ}^{dif}	diffuse Himmelsstrahlung (engl. <i>skylight</i>)
E_{λ}^{dir}	direkte Einstrahlung an der Erdoberfläche
h	Plancksches Wirkungsquantum
k	Boltzmannkonstante
κ	Cohens Kappa Koeffizient
θ_R	Zenitwinkel der Ausstrahlungsrichtung
θ_S	Zenitwinkel der Einstrahlrichtung
L_{λ}^{dif}	diffuse spektrale Ausstrahlung
L_{λ}^{dir}	direkte spektrale Ausstrahlung
$L_{\lambda}^{\text{sens}}$	am Sensor eintreffende Strahlung
L_{λ}^{sky}	Diffuses Luftlicht (engl. <i>path radiance</i>)
m	Meter
μm	Mikrometer
M_{λ}	Emission der elektromagnetischen Strahlung der Sonne
π	Pi
σ	Standardabweichung
T	Oberflächentemperatur
ρ	Reflexionsgrad
ρ_{λ}	spektraler Reflexionsgrad
τ_s	Transmissionsgrad entlang der Einstrahlrichtung
θ_S	Einstrahlrichtung
θ_R	Rückstrahlrichtung
v	Variationskoeffizient
\bar{x}	Arithmetischer Mittelwert
λ	Wellenlänge

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielstellung

Der Bedeutungszuwachs der Landwirtschaft und damit verbundener Wirtschaftssektoren ist, aufgrund des stetigen Bevölkerungsanstieges, für die weltweiten Betriebs- und Volkswirtschaften sowie für die Umwelt enorm. Aktuelle Schätzungen gehen von einer derzeitigen Weltbevölkerung von rund 7 Mrd. Menschen aus und prognostizieren einen Anstieg auf 9,2 Mrd. Menschen für das Jahr 2050 (U.S. Census Bureau 2010). Im Zuge dieser Entwicklung vergrößerte sich während der letzten vier Jahrzehnte die landwirtschaftlich genutzte Fläche um fast 500 Mio. ha. Nach aktueller Einschätzung wird dieser Trend in der Zukunft auch weiterhin anhalten (Tilman et al. 2002). Alexandratos & Bruinsma (2012) gehen von einer Ausweitung der Fläche für den Nahrungsmittelanbau um 120 Mio. ha bis zum Jahr 2020 aus. Aufgrund geographisch limitierter Ressourcen, die sowohl geeignete Böden als auch das benötigte Wasser umfassen, ist dieser Prozess jedoch nicht beliebig fortführbar.

Eine besondere Position unter den landwirtschaftlichen Erzeugnissen nimmt das Getreide ein. Dieses stellt mit einem Anteil von 50% am gesamten Nahrungskonsum die weltweit wichtigste Nahrungsmittelgruppe dar. In den neunziger Jahren erreichte der direkte Pro-Kopf Konsum von Getreide zwar seinen Höhepunkt und ist seitdem stetig rückläufig. Betrachtet man jedoch alle Verwendungszwecke, die neben der direkten Nutzung als Nahrung auch Futtermittel und Saatgut, sowie die Gewinnung von Bioethanol und Stärke umfassen, so prognostizieren Alexandratos & Bruinsma (2012) einen Anstieg des tatsächlichen Pro-Kopf Verbrauchs von 309 kg Getreide im Jahr 2000 auf 339 kg im Jahr 2050.

An einem gezielten Monitoring landwirtschaftlicher Anbauflächen auf klein- und großräumiger Ebene besteht somit großes Interesse um den aktuellen Zustand und Wandel dieser Ökosysteme zu erfassen. Einen der wichtigsten zu dokumentierenden Parameter stellt die Oberflächennutzung dar. Neben der flächenhaften Erfassung der aktuellen landwirtschaftlichen Nutzung für statistische Erhebungen (z.B. Landnutzungskartierung-

gen) und administrative Aufgaben (z.B. Anbau- oder Subventionskontrollen) lassen sich anhand dieser Kenngröße verschiedenste weitere Parameter ableiten, welche die Grundlage für die Modellierung ökosystemarer Prozesse bilden (Oenema et al. 1998; Bastiaanssen et al. 2000; Martínez-Casasnovas et al. 2005). Methoden zur Abschätzung biophysikalischer Bestands- oder Pflanzenparameter (Darvishzadeh et al. 2008; Wei et al. 2008), zu Ertragsabschätzungen (Yang 2009), zur Präzisionslandwirtschaft (Haboudane et al. 2004) oder der Erfassung von Wasser- und Stoffflüssen (Itzerott & Kaden 2008) sind meist artenspezifisch optimiert, sodass Kenntnisse über die Verteilung der angebauten Arten eine Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit dieser Verfahren sind.

Fernerkundungsdaten stellen seit vielen Jahren eine der wesentlichen Datengrundlagen für die Erfassung flächenhafter Nutzungsinformationen dar. Hierbei werden je nach Datenbasis sehr unterschiedliche methodische Ansätze angewendet. Typischerweise basieren die meisten Klassifizierungsansätze auf der Definition von Trainingsgebieten innerhalb eines Bilddatensatzes, was wiederum detaillierte Feldkenntnisse zum Zeitpunkt der Datenaufnahme voraussetzt. Im Gegensatz dazu verwenden Itzerott & Kaden (2006) in ihrem für multispektrale Daten erprobten Ansatz definierte NDVI-Normkurven für verschiedene Ackerkulturen, welche die Basis für eine multitemporale Analyse der NDVI Entwicklung eines Schlags darstellen, sodass keine Trainingsflächen im Bilddatensatz nötig sind. Die Definition der Normkurven ist notwendig, da auf der Grundlage eines einzelnen NDVI Wertes keine Artenklassifizierung möglich ist und setzt damit multitemporale Fernerkundungsdaten im Laufe einer phänologischen Periode voraus. Darüber hinaus müssen die Normkurven auf der Basis von externen Beobachtungsdaten (z.B. phänologische Datenbank des DWD) korrigiert werden.

Da die Reflexion einer Oberfläche diese intrinsisch repräsentiert, lassen sich mit Hilfe hyperspektraler Fernerkundungsdaten, bei denen die von der Erdoberfläche reflektierte Strahlung der Sonne in sehr vielen schmalen spektralen Bändern aufgezeichnet wird, sehr detaillierte Rückschlüsse auf die an der Erdoberfläche befindlichen Materialien ziehen. Dieser im Vergleich zu multispektralen Daten wesentlich höhere Informationsgehalt eröffnet völlig neue Möglichkeiten der Oberflächendifferenzierung. Qualitativ hochwertige Daten, welche den gesamten Wellenlängenbereich von 450 - 2400 nm erfassen und dabei ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis (engl. *Singal to Noise Ratio*, SNR) aufweisen, können derzeit lediglich mit flugzeuggetragenen Systemen (z.B. *HyMap*, *AISA-DUAL* oder *HySpex*) aufgezeichnet werden. Dadurch entsteht zum einen eine starke räumliche und zeitliche Einschränkung und zum anderen ist der Einsatz dieser Systeme sehr kostenintensiv. Zukünftige hyperspektrale Satellitenmissionen, wie z.B. *EnMAP* (Deutschland - GFZ/DLR), *HISUI* (Japan - JAXA), *HyspIRI* (USA - NASA) und *PRISMA* (Italien - ASI) eröffnen mit ihrer größeren räumlichen Abdeckung und den potenziell regelmäßigen Wiederholungsaufnahmen völlig neue Möglichkeiten für das langfristige Monitoring landwirtschaftlicher Flächen.

Die hyperspektrale Satellitenmission *EnMAP* (*Environmental Mapping and Analysis Program*), deren Start für 2017 avisiert ist und im Rahmen deren Vorbereitungsphase diese Arbeit entstand, stellt eines dieser neuen Systeme dar. Mit 242 spektralen Bändern bei Bandbreiten von 5-15 nm im Wellenlängenbereich von 420-2450 nm wird ein SNR von 1:500 bei 495 nm und von 1:150 bei 2200 nm, bei einer Bodenauflösung von 30 m, angestrebt. Die maximal an einem Tag erfassbare Fläche umfasst 150.000 km². Durch Schwenken des Satelliten um $\pm 30^\circ$ aus der Nadirbeobachtung heraus, kann eine Reduzierung der Wiederholungsrate von 21 Tagen auf bis zu 5 Tage erreicht werden. Diese technischen Voraussetzungen ermöglichen damit eine großräumige Erfassung temporär sehr dynamischer landwirtschaftlicher Kenngrößen, welches eines der Kernziele der Mission darstellt.

In dieser Arbeit wird das Potenzial untersucht, die von der Anbaufläche her bedeutendsten Wintergetreidearten Deutschlands - *Triticum aestivum* (Winterweizen - WW), *Hordeum vulgare* (Wintergerste - WG) und *Secale cereale* (Winterroggen - WR) auf der Grundlage hyperspektraler Daten eines einzigen Aufnahmezeitpunktes ohne die Einbeziehung von Zusatzinformationen (z.B. terrestrische Erhebungen) zu kartieren. Diese Ergebnisse sollen sodann Klassifizierungen auf der Basis von multispektralen Daten gegenübergestellt werden und deren jeweilige Möglichkeiten evaluiert werden. Die klassische Ausweisung von Trainingsgebieten innerhalb eines zu klassifizierenden Bilddatensatzes wird damit unnötig. Die Simulation des Reflexionsverhaltens der zu trennenden Pflanzenbestände, wobei die Pflanzen- und Bestandsparameter nahezu beliebig variiert werden können, stellt dabei eine vielversprechende Möglichkeit zur Generierung dieser Trainingsdaten dar. Es stehen eine Vielzahl von Simulationsverfahren zur Wahl, die in Kapitel 5. 2 näher erläutert werden. Modellierte Daten eröffnen darüber hinaus die Möglichkeit, Untersuchungen des Einflusses einzelner Bestandsparameter auf das Reflexionsverhalten des Bestandes durchzuführen und deren Relevanz für die Klassifizierung von Arten zu beurteilen.

Die Hauptfragestellung fügt sich in aktuelle Forschungsfelder der Sektion Fernerkundung des Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ) im Rahmen der *EnMAP* Vorbereitungsphase ein. Das gemeinsam mit T. Küster entwickelte Verfahren zur Simulation des Reflexionsverhaltens von Getreidebeständen (Kuester et al. 2013) bildet dabei die Kernmethode für die Untersuchungen dieser Arbeit, wobei der Entwicklungsschwerpunkt auf die Modellierung von realitätsnahen vierdimensionalen (4D) Pflanzenmodellen gelegt wurde. Dem gegenüber fokussierte T. Küster ihre Arbeit auf die Implementierung der Pflanzenmodelle in die Modellierungssoftware. Einen weiteren Schwerpunkt dieser Arbeit stellt die Nutzung simulierter Daten als Eingabetrainingsdaten für eine Klassifizierung von Fernerkundungsdaten dar. Hierfür wurde der in der Sektion ursprünglich für urbanes Gebiet entwickelte paarweise Klassifizierungsansatz von K. Segl und M. Bochow (Bochow 2009) auf natürliche Vegetationsbestände adaptiert. Eine weitere Entwicklung innerhalb der vorliegenden Studie stellt die Optimierung der Prozessierung hyperspektraler Flugzeugscannerdaten dar, die innerhalb der *EnMAP* Mission als Grundlage für Methodenentwicklung, Datensimulation und Validierung dienen.

Zusammenfassend werden drei Kernfragen aufgeführt, mit denen sich diese Dissertation beschäftigt:

1. *Welchen Einfluss besitzen ausgewählte strukturelle Parameter eines Getreidebestandes auf dessen Reflexionssignal?*
2. *Wie groß ist das Potenzial auf der Grundlage modellierter Trainingsdaten aus 4D-Bestandsmodellen, Getreidearten und deren phänologische Entwicklungsphase mittels optischer Fernerkundungsdaten eines einzelnen Aufnahmezeitpunktes zu bestimmen?*
3. *Welchen Vorteil bringen hyperspektrale Fernerkundungsdaten im Vergleich zu multispektralen Daten für die Bestimmung der Art und Phänologie von Getreide?*

1. 2 Struktur der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in drei Blöcke. In den ersten drei Kapiteln (zwei bis vier) werden als wissenschaftliche Basis die theoretischen Grundlagen der Fernerkundung und speziell der Vegetationsfernerkundung sowie die Untersuchungsgebiete (UG) und die im Feld erhobenen Datengrundlagen erläutert. Der zweite Block (Kap. 5) beschreibt das in dieser Studie entwickelte Verfahren zur Simulation realitätsnaher Getreidebestandsreflexion. Das Heranziehen der simulierten Daten für die Bewertung bestandsstruktureller Einflüsse sowie für die Klassifizierung von Fernerkundungsdaten und die daraus resultierende Diskussion der Ergebnisse sind Bestandteil des dritten Blocks (Kap. 6 - 9).

Im Einzelnen werden in Kap. 2 die notwendigen Grundlagen der Spektroskopie erläutert. Neben den grundlegenden Strahlungsgesetzen zählen dazu ausgewählte Interaktionen der Strahlung mit der Atmosphäre und der Erdoberfläche. Im Anschluss werden die Aufnahmeprinzipien und Kenngrößen der verwendeten abbildenden Spektrometer, sowie die Korrektur der äußeren Einflüsse auf die Daten beschrieben. In Kap. 3 wird ein botanischer Kurzexkurs zur phänologischen Entwicklung von Getreide gegeben. Daran schließt sich eine umfassende Darstellung der spektralen Charakteristika von Vegetation auf Blatt- und Bestandsebene an. Die in der Arbeit genutzten Untersuchungsgebiete, mit deren geographischen Eigenschaften, sowie deren Relevanz für die Datenerhebung, und -auswertung werden in Kap. 4 dargestellt. Anschließend werden die in dieser Studie verwendeten Feldmessdaten erläutert.

Das Kap. 5 hat die spektrale Simulation zum Thema. Nach der Vorstellung grundlegender Modelle der Reflexionsmodellierung von Vegetationsbeständen sowie der Modellierung komplexer 4D-Pflanzemodelle wird die Entwicklung eines Verfahrens zur Modellierung realitätsnaher Bestandsreflexion auf der Basis von virtuellen Getreidebeständen (Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen) aufgezeigt.

In Kap. 6 werden mit dem vorgestellten Simulationssystem generierte Daten für die Analyse verschiedener Einflüsse der Bestandsstruktur auf das Reflexionsverhalten von Getreidebeständen genutzt. Auf der Basis der zuvor gewonnenen Ergebnisse werden Trainingsdaten mit unterschiedlichen bestandsstrukturellen Eigenschaften für die Klassifizierung von Fernerkundungsdaten simuliert. Kap. 7 beschreibt den Einsatz dieser Daten für die Klassifizierung multi- und hyperspektraler Fernerkundungsdaten verschiedener Untersuchungsgebiete und Aufnahmezeitpunkte. Die Diskussion und Beantwortung der Kernfragen dieser Arbeit im Hinblick auf die Ergebnisse der Analysen von Bestandsparametern und der Klassifizierungen beinhaltet Kap. 8. Eine zusammenfassende Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse schließt die Arbeit in Kap. 9 ab. Dabei wird ebenfalls ein Ausblick zu potenziellen Erweiterungen und künftigen Anwendungsmöglichkeiten des vorgestellten Simulationsverfahrens gegeben.

Der Anhang umfasst den Anh. A, mit einer ausklappbaren Abbildung zu phänologischen Stadien und den entsprechenden Simulationsstadien, die Anhänge B, C und D, welche zusätzliche Informationen zur Datenaufnahme und Pflanzenmodellierung enthalten, die Anhänge E, F, G, H und I, welche die Visualisierung der erzeugten Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Bestandsstruktur beinhalten, sowie den Anh. J mit ausgewählten Klassifizierungsergebnissen.

2 Theoretische Grundlagen der Fernerkundung

Zum besseren Verständnis der Arbeit werden im folgenden Kapitel die Grundlagen der Fernerkundung im Allgemeinen und der abbildenden Spektroskopie im Speziellen, auch als hyperspektrale Fernerkundung bezeichnet, beschrieben. Dazu gehören die physikalischen Grundlagen des Strahlungstransfers von der Sonne zur Erdoberfläche und zurück zum Sensor, sowie die Funktionsweise abbildender Spektrometer und die Korrektur der äußeren Einflüsse auf die am Sensor gemessenen Daten.

2.1 Der Weg der Strahlung von der Sonne zum Fernerkundungssensor

2.1.1 Strahlungsquelle

Die natürliche Strahlungsquelle für die optische Fernerkundung ist die Sonne. Die Emission der elektromagnetischen Strahlung M_λ erfolgt in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur eines Strahlers T und kann als Funktion der Wellenlänge λ mit dem Planck'schen- Strahlungsgesetz für die Ausstrahlung in den gesamten Halbraum nach Rees (2001) wie folgt beschrieben werden:

$$M_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \left[\frac{W}{m^2 sr m} \right] \quad 2-1$$

Plancksches Wirkungsquantum $h = 6,626\ 069\ 57 \times 10^{-34}$ Js

Boltzmannkonstante $k = 1,380\ 650\ 4 \times 10^{-23}$ Wm⁻² K⁻⁴

Lichtgeschwindigkeit $c = 2,997\ 924\ 58 \times 10^8$ ms⁻¹

Auf dem Weg zur Erde wird diese Strahlung mit dem Quadrat zur Entfernung abgeschwächt, sodass sich die extraterrestrische Einstrahlung E_λ^E am Rand der Atmosphäre wie folgt ergibt:

$$E_{\lambda}^E = \frac{M_{\lambda} dA_s}{D^2} \left[\frac{W}{m^2 \mu m} \right], \quad 2-2$$

wobei dA_s der Fläche der Sonnenscheibe ($d = 1.3927 \times 10^9$ m) und D ($1,496 \times 10^{11}$ m) dem Abstand zwischen Sonne und Erde entspricht.

2.1.2 Interaktion der elektromagnetischen Strahlung mit der Atmosphäre

Ein Teil der Strahlung wird am Rand der Erdatmosphäre direkt in den Weltraum reflektiert. Der andere Teil durchdringt die Atmosphäre und unterliegt verschiedenen wellenlängenspezifischen Absorptions- und Streuungsmechanismen die an den gas- und partikelförmigen Luftbestandteilen (z.B. Ozon, Sauerstoff, Stickstoff, Wasserdampf, Kohlendioxid und Staub) hervorgerufen werden. Dieser Prozess der Strahlungsabschwächung, auch als Extinktion bezeichnet, wird durch den Transmissionsgrad der Atmosphäre entlang des Strahlungsweges $\tau_s(\lambda)$ quantifiziert.

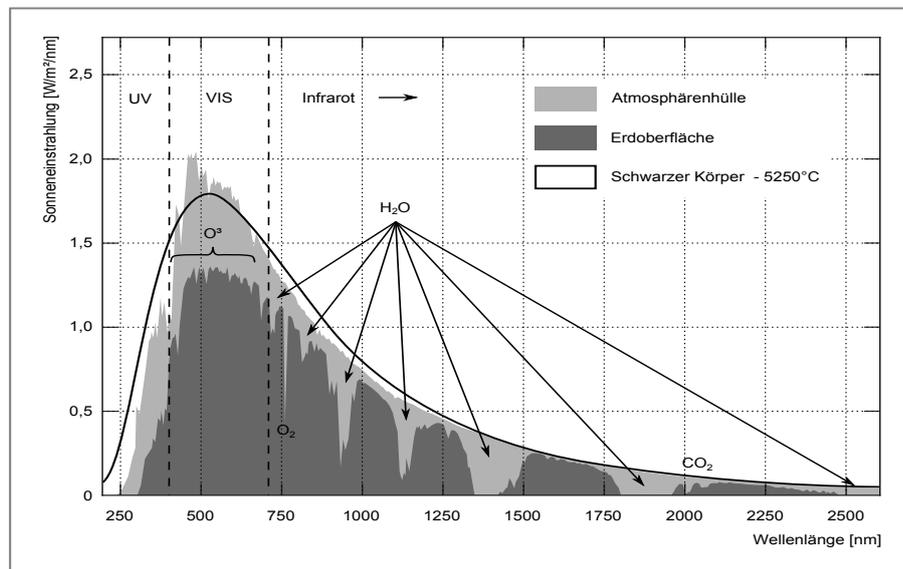


Abb. 2-1: Vergleich der Energie der Sonneneinstrahlung am Rand der Atmosphäre, der Erdoberfläche und eines schwarzen Körpers ($T=5250^\circ$ C). Zusätzlich sind die atmosphärisch bedingten Hauptabsorptionsbanden gekennzeichnet (verändert nach Schowengerdt 2006: 51).

Bestimmte Wellenlängen der Strahlung werden dabei durch die Atmosphäre so stark absorbiert, dass nur ein sehr geringer Teil der Strahlung die Erdoberfläche erreicht. Die Bereiche des Spektrums, in denen die elektromagnetische Strahlung weitgehend ungehindert die Erdatmosphäre durchdringt, können in der optischen Fernerkundung genutzt werden. Man spricht hierbei von atmosphärischen Fenstern. Abb. 2-1 zeigt die Abschwächung der solaren Strahlung durch die Atmosphäre im Vergleich zur Strahlungsenergie an der Atmosphärenhülle auf. Der Anteil der Strahlung der die Erdoberfläche auf direktem Weg erreicht, ergibt sich wie folgt:

$$E_{\lambda}^{dir} = \tau_s(\theta_s, \lambda) E_{\lambda}^E \cos \theta_s \left[\frac{W}{m^2 \mu m} \right], \quad 2-3$$

wobei der Zenitwinkel der Einstrahlungsrichtung durch θ_s angegeben wird (nach Rees 2001).

In Abhängigkeit der spektralen Eigenschaften (Reflexionsgrad ρ) des beobachteten Objekts, gelangt der reflektierte Teil der Strahlung als gerichtete Ausstrahlung L_{λ}^{dir} zum Sensor:

$$L_{\lambda}^{dir} = \rho(\lambda) \frac{E_{\lambda}^{dir}}{\pi}, \quad 2-4$$

2.1.3 Strahlungskomponenten

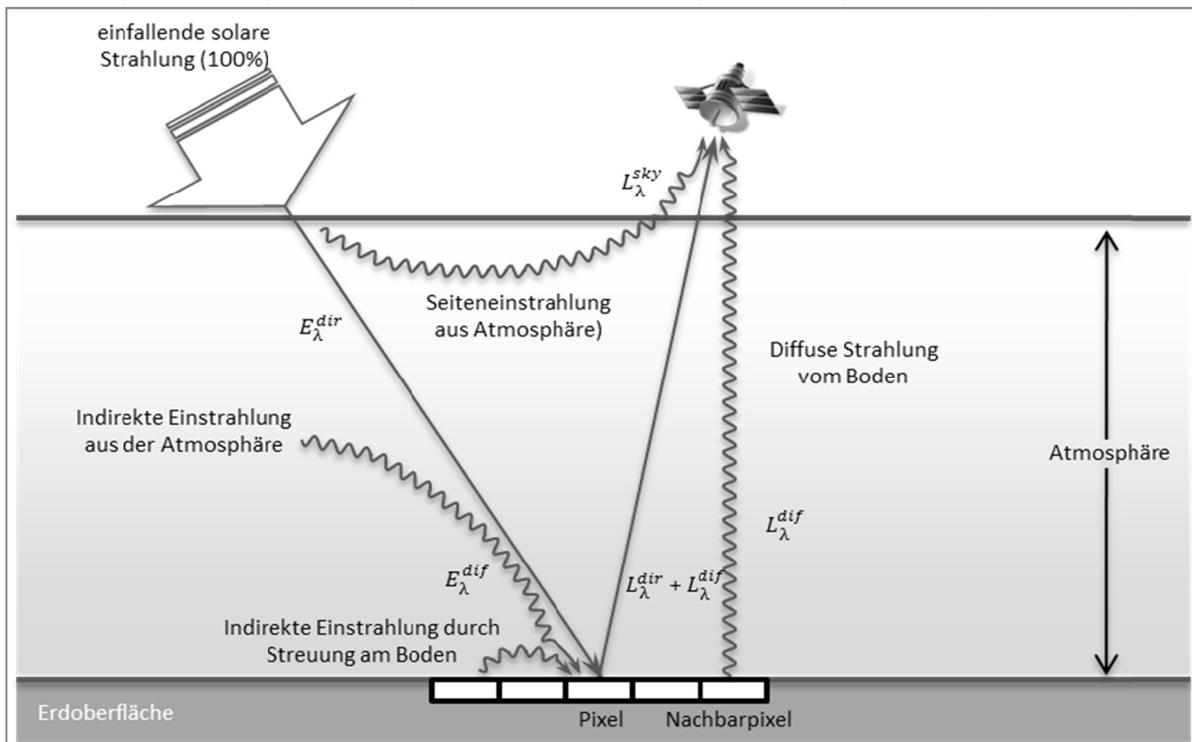


Abb. 2-2: Wege der elektromagnetischen Strahlung zum Sensor (verändert nach Richards & Jia 2005: 40)

An der Erdoberfläche trifft die Strahlung auf das zu beobachtende Objekt und wird teilweise von diesem absorbiert, gestreut oder reflektiert und bei Transluzenz transmittiert. Die in der Atmosphäre stattfindenden Streuungseffekte führen dazu, dass sich die an einem Fernerkundungssensor gemessene Strahlung L_{λ}^{sensor} neben der direkt an der Erdoberfläche reflektierten Strahlung L_{λ}^{dir} aus zusätzlichen Strahlungskomponenten zusammensetzt (Abb. 2-2). Hierzu zählt neben der von der beobachteten Oberfläche reflektierten diffusen Himmelsstrahlung L_{λ}^{dif} auch die in der Atmosphäre durch Streuung

zum Sensor gelangende und als Luftlicht bezeichnete Strahlung L_λ^{sky} (engl. *path radiance*), welche zudem die indirekte Einstrahlung aus der Nachbarschaft der beobachteten Oberfläche enthält (Abb. 2-2).

$$L_\lambda^{sensor} = L_\lambda^{dir} + L_\lambda^{dif} + L_\lambda^{sky} \quad 2-5$$

Lewis (1999) definiert die reflektierte Strahlungsenergie $L_{\lambda, \theta_R}^{sensor}$ (angegeben als spektrale Radianz z.B. in $\text{mWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) einer Oberfläche δA , ausgehend von einer Beleuchtungsquelle in Abhängigkeit der Wellenlänge λ und der Einstrahlrichtung θ_S auf einen Empfänger in Rückstrahlrichtung θ_R wie folgt:

$$L_{\lambda, \theta_R}^{sensor} = \int_{2\pi+} L_{\lambda, \theta_S}^{total} \rho(\lambda, \theta_R, \theta_S) |N \cdot \theta_S| d\theta_S \quad 2-6$$

wobei $L_{\lambda, \theta_S}^{total}$ die Rückstrahlung der Oberfläche, N der Normalenvektor der Fläche δA und $\rho(\lambda, \theta_S, \theta_R)$ der Reflexionsgrad in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ , sowie der Einstrahlungs- θ_S und Ausstrahlungsrichtung θ_R ist, und die bidirektionale Verteilungsfunktion (*BRDF* – engl. *bidirectional reflectance distribution function*) der Oberfläche repräsentiert. Die Gleichung wird oft als Reflexionsgleichung (Cohen & Wallace 1993) bezeichnet.

$L_{\lambda, \theta_S}^{total}$ setzt sich dabei aus der direkt von der Oberfläche reflektierter Strahlung L_λ^{dir} und aus einem diffus gestreuten Anteil L_λ^{dif} zusammen. Der direkt an der Oberfläche reflektierte Anteil der Strahlung wird in Abhängigkeit von den spektralen Eigenschaften des Objektes modifiziert:

$$L_\lambda^{dir} = \rho(\lambda) \frac{E_\lambda^{dir}}{\pi} |N \cdot \theta_S| \quad 2-7$$

Der diffuse Anteil der Strahlung L_λ^{dif} ist richtungsunabhängig und wird als eine Funktion der diffusen Himmelsstrahlung $E_{\lambda, \theta_S}^{sky}$ berechnet:

$$L_\lambda^{dif} = \pi^{-1} \int_{2\pi+} E_{\lambda, \theta_S}^{sky} |N \cdot \theta_S| d\theta_S \quad 2-8$$

Mehrfachstreuungen zwischen Oberfläche und Atmosphäre, die als Adjazenzeffekt bezeichnet werden, können auf diesem Weg in $E_{\lambda, \theta_S}^{sky}$ ebenfalls enthalten sein. Die Substitution der Strahlungskomponente $L_{\lambda, \theta_S}^{total}$ durch L_λ^{dir} und L_λ^{dif} , sowie die Einbindung des Luftlichts L_λ^{sky} , in die Reflexionsgleichung 2-6 beschreibt die am Sensor eintreffende Gesamtstrahlung wie folgt:

$$L_{\lambda, \theta_R}^{sensor} = \int_{2\pi+} \frac{E_{\lambda}^{dir}}{\pi} \rho(\lambda, \theta_R, \theta_S) |N \cdot \theta_S| d\theta_S + E_{\lambda, \theta_S}^{sky} \rho(\lambda, \theta_R, \theta_S) |N \cdot \theta_S| d\theta_S + L_{\lambda}^{sky}, \quad 2-9$$

wobei für ρ lambertsche Reflexion angenommen wird.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Atmosphäre die am Sensor gemessene Strahlung wesentlich beeinflusst. Die Ursache hierfür ist die Zusammensetzung der Atmosphäre, wobei vor allem der Wasserdampfgehalt eine entscheidende Kenngröße darstellt. Räumliche und zeitliche hoch dynamische Änderungen der Atmosphärenzusammensetzung aufgrund wetterbedingter und lokaler Einflüsse ziehen damit stetige Variationen des am Sensor erfassten Signals nach sich. Eine Bestimmung des Reflexionsvermögens des Zielobjekts erfordert daher eine Korrektur der atmosphärischen Einflüsse. Die Verwendung von Strahlungstransfermodellen (z.B. MODTRAN (Anderson et al. 2009), MOMO (Fischer & Grassl 1984), 6S (Vermote et al. 1997; Kotchenova et al. 2006; Kotchenova & Vermote 2007)) oder empirischen Beziehungen zwischen dem Sensorsignal und in situ gemessenen Referenzdaten (engl. *Empirical Line Method*) sind die derzeit gebräuchlichsten Methoden für hyperspektrale Fernerkundungsdaten. Die atmosphärische Korrektur hyperspektraler Fernerkundungsdaten unter Verwendung des Strahlungstransfermodells MODTRAN wird im Abschnitt 2.3.2 ausführlich beschrieben.

2.1.4 Interaktion der elektromagnetischen Strahlung mit der Oberfläche

Die spektralen Eigenschaften von Materialien werden durch vier Prozesse bestimmt. Die temperaturabhängige Abgabe von Strahlungsenergie, die als Emission bezeichnet wird, kann aufgrund anderer Wellenlängenbereiche für die folgenden Betrachtungen negiert werden. Die für die optische Fernerkundung bedeutsamen Prozesse sind die Absorption, die Transmission und die Reflexion. Die Absorption ist die Aufnahme der Strahlungsenergie durch einen Stoff und ist durch den atomaren Aufbau und den damit verbundenen elektronischen und chemischen Prozessen (z.B. Photosynthese) des Materials bestimmt. Zum einen kann die auftreffende Strahlung zu einer Erhöhung des Energieniveaus von Elektronen und einem Ladungstransfer zwischen Atomen bzw. Molekülen führen und zum anderen Vibrations- bzw. Rotationsprozesse initiieren (Clark 1999). Transmission bezeichnet den Prozess, wenn Strahlungsenergie auf der anderen Seite des Stoffes wieder austritt, wobei ebenso Interaktionen auf atomarer Ebene stattfinden, die hier aber nicht näher betrachtet werden. Die Reflexion beschreibt Prozesse, bei denen die Einstrahlungsrichtung verändert wird und es nicht zur Aufnahme oder Abgabe von Energie kommt.

Für die reflektiven Wellenlängenbereiche, ohne thermische Emission ergibt sich nach dem Energieerhaltungssatz:

$$E_{\lambda} = L_{\lambda}^{reflektiert} + L_{\lambda}^{transmittiert} + L_{\lambda}^{absorbiert} \quad 2-10$$

Die Division durch die Bestrahlungsstärke E_λ ergibt für die Summe aller Teilprozesse 1, sodass Bestrahlungsstärke unabhängige maßeinheitlose Materialeigenschaften definiert werden können:

$$1 = \rho_\lambda + \tau_\lambda + \alpha_\lambda , \quad 2-11$$

wobei ρ_λ den spektralen Reflexionsgrad, τ_λ den spektralen Transmissionsgrad und α_λ den spektralen Absorptionsgrad eines Stoffes beschreibt.

Neben den einzelnen Materialeigenschaften haben besonders in Gemischen weitere Parameter der Oberfläche, wie z.B. der Wassergehalt oder die Rauheit der Oberfläche einen Einfluss auf das reflektierte Signal. Eine Erhöhung des Wassergehaltes führt speziell im Bereich der Wasserbanden zu einer erhöhten Absorption. Die daraus resultierenden Veränderungen des Reflexionssignals können wiederum zu einer Quantifizierung für Bodenwasser- (Ben-Dor et al. 2008; Haubrock et al. 2008) oder Pflanzenwassergehalte (Champagne et al. 2003; Sims & Gamon 2003; Cheng et al. 2006) genutzt werden. Die Oberflächenrauigkeit besitzt einen Einfluss auf die Art der Rückstreuung der Strahlung. Die Verteilung der Reflexion von Oberflächen eines Materials unter beliebigen Einfallswinkeln der Strahlung wird als bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion (BRDF) bezeichnet, welche eine Folge der geometrischen, atomaren und chemischen Materialheterogenität darstellt. Nach Rees (2001) werden prinzipiell die spiegelnde, quasi spiegelnde, diffuse und gemischte Reflexion unterschieden. Über die optischen Eigenschaften lassen sich sowohl Oberflächenarten bestimmen, als auch quantitative Aussagen zu bestimmten Inhaltsstoffen, wie z.B. über die Pigmente von Pflanzen (Gitelson & Merzlyak 2004; Gitelson et al. 2005; Blackburn 2006), über den Carbonat- und Eisengehalt von Böden (Ben-Dor 2002; Richter et al. 2009) oder über Wasserinhaltsstoffe (Frauendorf 2002; Heim et al. 2005) treffen.

2.2 Abbildende Spektrometer

Bei der solar-optischen Fernerkundung wird die von der Erdoberfläche reflektierte Solarstrahlung im Bereich des sichtbaren Lichts (VIS: 400 - 700 nm), sowie des nahen (NIR: 700 -1000 nm) und kurzwelligen Infrarots (SWIR: 1000 - 2500 nm) gemessen und zählt somit zu den passiven, optischen Verfahren. Innerhalb dieser Systeme kann anhand ihrer spektralen Auflösung in multi- (z.B. *Daedalus*, *Landsat*, *Ikonos*, *Spot* und *ALOS/AVNIR-2*) und hyperspektrale Systeme (z.B. *HyMAP*, *AISA*, *HySpex*, *Chris* und *EnMAP*) differenziert werden. Hyperspektrale Sensoren (Anzahl der Kanäle i.d.R. > 40) zeichnen sich durch eine hohen Anzahl schmaler, aneinandergrenzender und sich überlappender Kanäle aus, was zu einer diskreten Repräsentation der kontinuierlichen, spektralen Signatur von Objekten der Erdoberfläche führt. Dabei können die Sensoren auf spezielle Wellenlängenbereiche (z.B. *Chris* -VIS/NIR, *AISAEagle* - VIS/NIR, *AISAHawk* - SWIR) beschränkt sein oder den gesamten Bereich

VIS/NIR/SWIR (*HyMap*) abdecken. Die spektral hoch aufgelöste Erfassung der an der Erdoberfläche reflektierten Strahlung ermöglicht die Detektion objektspezifischer Reflexionsmerkmale wie z.B. Absorptionsbanden oder Reflexionsmaxima und erlaubt dadurch eine sehr gute Differenzierung verschiedener Oberflächenmaterialien. Im Gegensatz dazu ist der Informationsgehalt multispektraler Daten, bei denen die reflektierte, solare Strahlung in wenigen, breiten Kanälen aufgezeichnet wird, deutlich reduziert. Die Unterschiede zwischen hyperspektraler und multispektraler Auflösung sind anhand eines Vegetations- und eines Bodenspektrums in der Abb. 2-3 dargestellt.

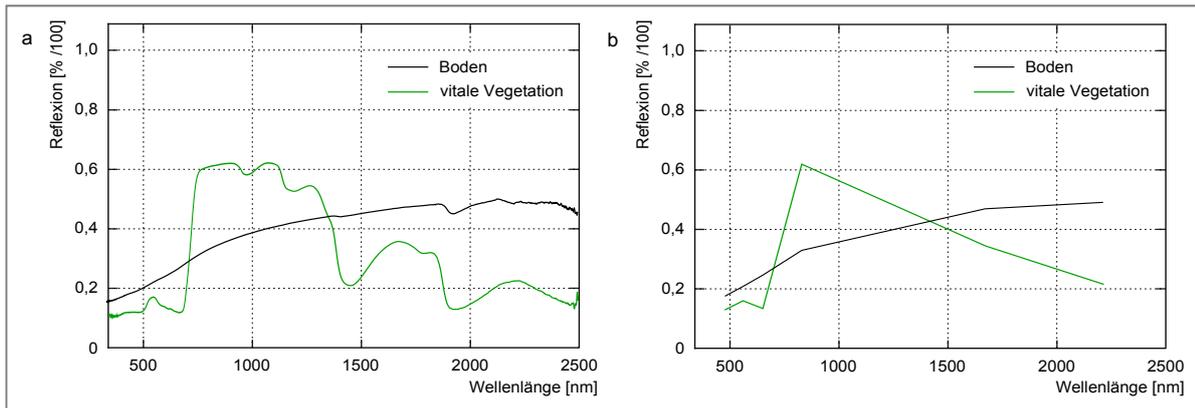


Abb. 2-3: Vergleich der spektralen Auflösung a) hyper- und b) multispektraler Fernerkundungsdaten eines Vegetations- (grün) und Bodenspektrums (schwarz).

2.2.1 Aufnahmeprinzip

Hyperspektrale Systeme arbeiten meist nach dem Scanner Prinzip und zeichnen die Daten Zeile für Zeile quer zur Flugrichtung auf. Hierbei unterscheidet man grundsätzlich zwei Bauarten: optomechanische (*Whiskbroom*) Scanner und optoelektronische (*Pushbroom*) Scanner (Abb. 2-4). Whiskbroom Systeme tasten die Erdoberfläche quer zur Flugrichtung mittels eines rotierenden Spiegels ab, der die einfallende Strahlung des im Blickfeld befindlichen Ausschnittes der Erdoberfläche (*GIFOV* - engl. *Ground-projected Instantaneous Field of View*) über optische Elemente und ein Dispersionselement auf die Detektoreinheit (*CCD* - engl. *charge-coupled device*) lenkt. Bei der Aufspaltung und räumlichen Trennung der Strahlung nach ihrer Wellenlänge lassen sich zwei Arten unterscheiden, Prismenspektrometer und Gitternetzspektrometer. Während ein dispersives Prisma die einfallende Strahlung entsprechend ihrer Wellenlängen ablenkt, wird die Strahlung an Gittern gebeugt damit jedes Detektorelement einen bestimmten Wellenlängenbereich erfasst. Die dabei entstehenden Interferenzen realisieren die räumliche Trennung der Wellenlängen auf den Detektor (Warner et al. 2009).

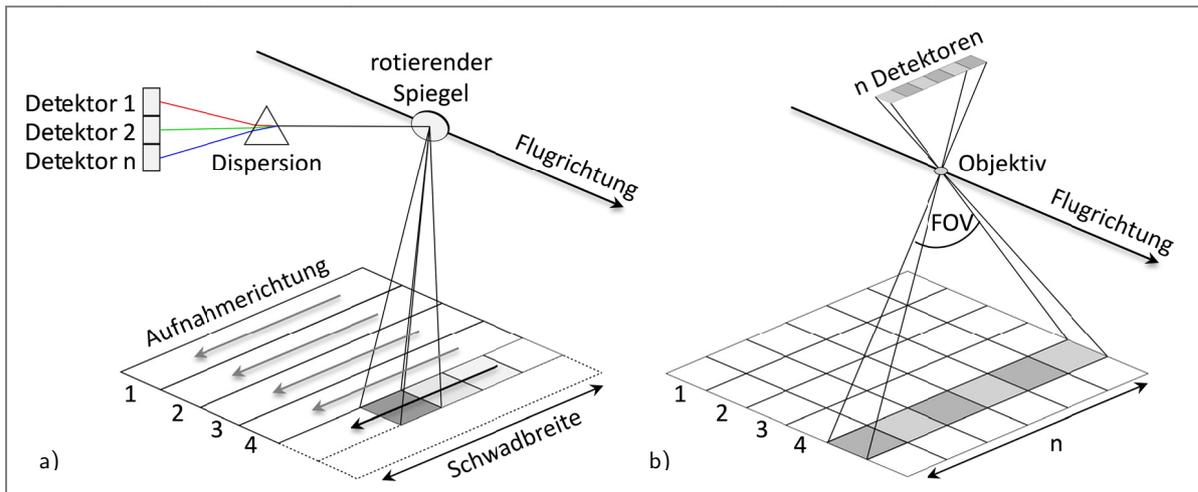


Abb. 2-4: Aufnahmeprinzip eines Whiskbroom (a) und Pushbroom (b) Scanners (verändert nach Gibson 2000: 45).

In Pushbroom Systemen stellt jedes Pixel eine separate Detektoreinheit (Abb. 2-4, rechts) dar. Dies resultiert in einer potenziellen Erhöhung der Aufnahmezeit und führt dann zu einem verbesserten SNR. Einen der wichtigsten Vorteile zu Whiskbroom Systemen stellt hierbei die potenzielle Verwendung unterschiedlicher Verstärkungs-Modi (engl. *gain*) dar. Dies ermöglicht eine optimale Anpassung des Sensors an die Albedo der Oberfläche. Auf dem zweidimensionalen Detektorfeld (engl. *array*) kann es bei Pushbroom Systemen zu Aufnahme Fehlern kommen, die auf Abweichungen der Projektion des Lichts auf das Detektorarray zurückzuführen sind. Daraus resultieren spektrale (engl. *spectral smile/frown*) und räumliche (engl. *keystone*) Abweichungen (Mouroulis et al. 2000; Guanter et al. 2007).

2.2.2 Abbildende Spektrometer

In diesem Abschnitt werden die abbildenden Spektrometer vorgestellt, deren Daten in dieser Arbeit genutzt werden. Die technischen Parameter der unterschiedlichen Systeme sind in der Tab. 2-1 zusammengefasst.

HyMap

Der *HyMap*-Sensor ist ein flugzeuggetragenes, abbildendes Spektrometer der Firma HyVista. Die Funktionsweise beruht auf dem opto-mechanischen Whiskbroom-Scanprinzip mit einem Öffnungswinkel von $61,3^\circ$ und 512 Pixel pro Bildzeile. Vier separate Spektrometer (VIS, NIR, SWIR-I und SWIR-II), mit jeweils 32 Kanälen erfassen die am Boden reflektierte Strahlung nahezu kontinuierlich in 128 Bändern im Wellenlängenbereich von 440 nm - 2500 nm. Die spektralen Bandbreiten, auch als Halbwertsbreite (*FWHM* – engl. *full width at half maximum*) bezeichnet, sowie die spektralen Abtastintervalle liegen zwischen 15 - 20 nm (Cocks et al. 1998).

Tab. 2-1: Übersicht der Sensorparameter (Cocks et al. 1998; Spectral Imaging Ltd. 2010; Norsk Elektro Optikk 2012).

Sensor	HyMap	AISA <i>Eagle</i>	AISA <i>Hawk</i>	HySpex <i>VNIR-1600</i>	HySpex <i>SWIR-320me</i>
Scansystem	Whiskbroom	Pushbroom	Pushbroom	Pushbroom	Pushbroom
Detektor(en)	Si, InSb	Si - CCD	MCT	Si - CCD	HgCdTe
Spektraler Bereich [nm]	450 - 2480	400 - 970	970 - 2450	416 - 992	968 - 2498
Spektrale Auflösung [nm]	15 - 20	2,9	8,5	3,7	6,0
Binning Optionen	-	1, 2, 4	1, 2, 4	2, 4, 8	-
Anzahl Bänder	bis zu 128	244	254	160	256
Spektrales Sampling	13 - 17	2,3	5,8	3,7	6
Anzahl Pixel / Zeile	512	320	320	1600	320
FOV [°]	61,3	24	24	17/34(*)	13,5/27(*)
Digitale Auflösung	16 bit	12 bit	14 bit	12 bit	14 bit

(*) Field of View kann durch FOV-Expander um den Faktor 2 erhöht werden

AISA-DUAL

Das *AISA-DUAL* System der finnischen Firma Specim kombiniert zwei abbildende Spektrometer, wobei der Wellenlängenbereich des VNIR durch das *AISA Eagle* System und der SWIR durch den *AISA Hawk* abgedeckt wird. Die separaten, nach dem Pushbroom-Prinzip aufzeichnenden Scanner, werden mittels einer Sensorplattform aufeinander ausgerichtet, sodass die Systeme annähernd die gleiche Oberfläche aufzeichnen. Die geometrischen Abweichungen der zwei Sensoren belaufen sich in den analysierten Bilddaten auf < 2 Pixel und können während der Datenvorprozessierung korrigiert werden. Die aufgezeichneten Daten beider Systeme werden während des Aufnahmeprozesses zu einem Datensatz zusammengeführt, wobei die räumliche Auflösung des *AISA Eagles* (1024 Pixel) durch ein Binning (Zusammenfassen benachbarter Pixel) reduziert und auf den überlappenden Bildbereich des *AISA Hawk* (320 Pixel) angepasst wird. Die Daten beider Systeme weisen damit die gleiche räumliche Auflösung auf und decken gemeinsam einen spektralen Wellenlängenbereich von 400 - 2450 nm ab (Spectral Imaging Ltd. 2010).

HySpex

HySpex ist ein hyperspektrales Kamerasystem, das von der norwegischen Firma Norsk Elektro Optikk AS entwickelt wurde. Das System besteht aus zwei abbildenden Pushbroom-Einzelspektrometern (*VNIR-1600* und *SWIR-320me*), deren Einzeldatensätze im Rahmen der Prozessierung zu einem gemeinsamen Datensatz zusammengeführt werden. Es zeichnet im Wellenlängenbereich von 416 - 2500 nm mit bis zu 316 spektralen Bändern auf (Norsk Elektro Optikk 2012).

2.3 Prozessierung von Fernerkundungsdaten

Im Vorfeld der thematischen Auswertung hyperspektraler Fernerkundungsdaten müssen die zuvor beschriebenen atmosphärischen und systembedingten Einflüsse korrigiert und eine Orthorektifizierung der Daten vorgenommen werden. Ein Überblick über die Prozessierungsschritte wird in Tab. 2-2 gegeben

Tab. 2-2: Überblick notwendiger Prozessierungsschritte von hyperspektralen Fernerkundungsdaten.

<i>Einfluss</i>	<i>Faktoren</i>	<i>Korrekturmethode</i>	<i>Ergebnis</i>
<i>Sensor</i>	SNR Off-Set	Sensor Modell System Korrektur	Radianz am Sensor
<i>Atmosphäre</i>	Absorption Reflexion Transmission	Atmosphärenmodell Ground-Truth-Daten	Oberflächenreflexion
<i>Aufnahmeplattform</i>	Innere Orientierung Äußere Orientierung (Länge, Breite, Höhe, Nick-, Roll- und Gierwinkel)	Orientierungsdaten Geokorrektur	Georeferenzierte Reflexion

2.3.1 Korrektur des Sensoreinflusses

Spektrale Überführung

In einem ersten Schritt findet eine Überführung, der in DN (Grauwert) gespeicherten Werte in Strahldichtewerte (engl. *at-sensor-radiance*) statt. Hierfür sind im Labor bzw. während des Fluges ermittelte Kalibrierungskoeffizienten notwendig, um Detektorunterschiede (*Gainwerte*) und den Einfluss des Dunkelstroms (*Offsetwerte*) auszugleichen. Speziell bei dem AISA Sensor können äußere Einflüsse (z.B. mechanische oder thermische) minimale Änderungen des Systems nach sich ziehen, sodass die Überführung der DN-Werte in Strahldichten auf der Grundlage der im Labor ermittelten Kalibrierungskoeffizienten fehlerhafte Ergebnisse liefern. Diese Unzulänglichkeiten spiegeln sich in streifenförmigen Mustern wider.

Korrektur radiometrischer Miskalibrierung

Im Rahmen der AISA-Datenprozessierung wurde ein vollautomatisches Verfahren zur Reduktion radiometrischer Miskalibrierung für Pushbroom Scanner „ROME“ entwickelt, das eine deutliche Reduzierung der Verstreifung ermöglicht. Das Verfahren basiert auf spezifischen Minimierungs- und Maximierungsroutinen und vereint Verfahren der Bild-

prozessierung, wie die Minkowski Metrik und die Faltung (Rogaß et al. 2011). Die Abb. 2-5 zeigt exemplarisch zwei Ausschnitte der auf der Grundlage der Kalibrierungskoeffizienten überführten Originaldaten (links), sowie der entsprechenden *ROME*-korrigierten Ergebnisse (rechts) der *AISADual* Daten des Untersuchungsgebietes Fichtwald vom 30.04.2011.

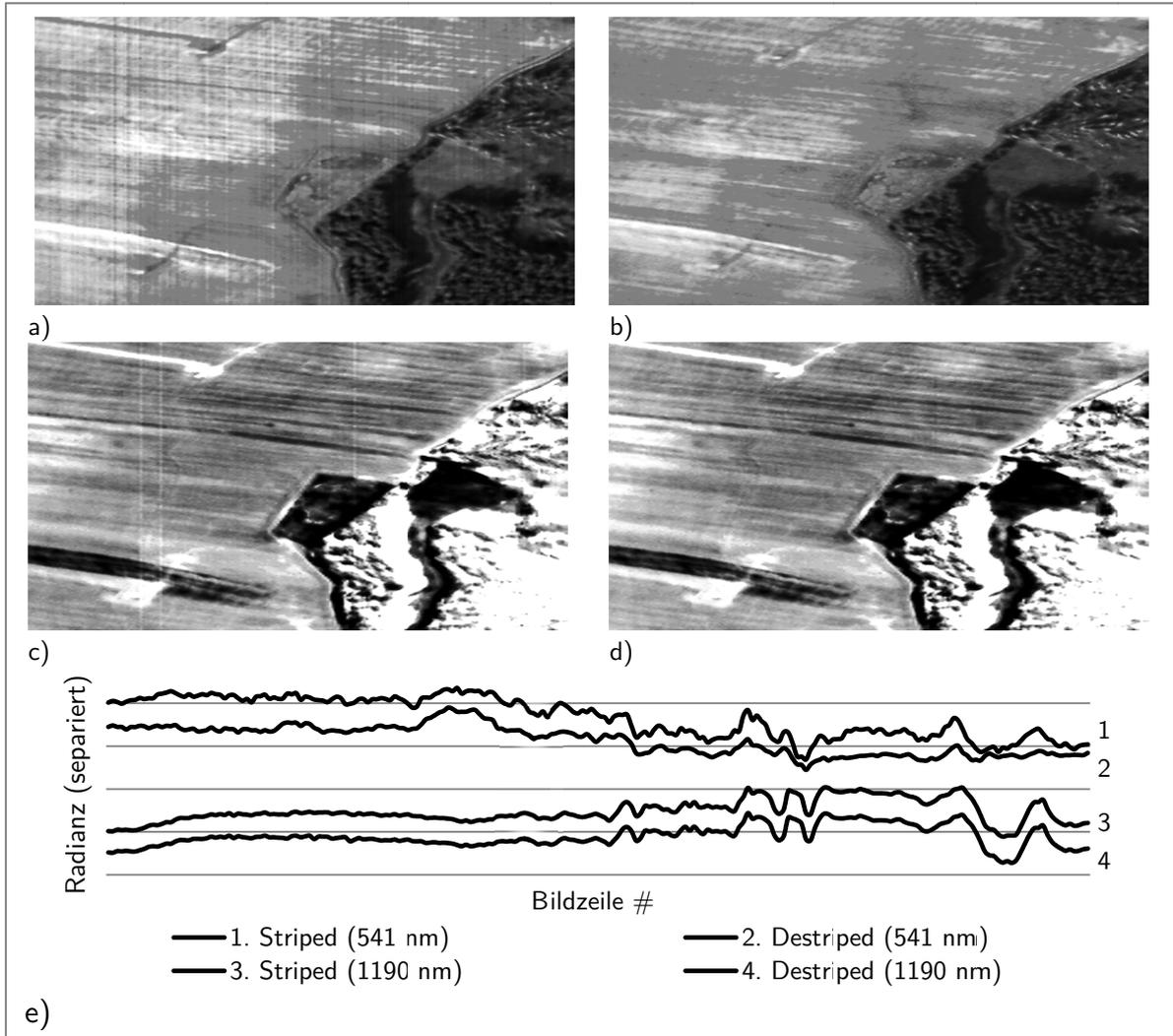


Abb. 2-5: Ausschnitt der *AISADual*-Szene des UG-Fichtwald vom 30.04.2011 in original überführten Radianzwerten (a - VNIR-Band 65 - 541 nm, c - SWIR-Band 283 -1190 nm) und den entsprechenden mit *ROME*-korrigierten Daten (c - VNIR, d -SWIR), sowie ein Graph des Mittelwertes dieses Ausschnitts (e) (Rogaß et al. 2011).

2.3.2 Korrektur des Atmosphäreneinflusses

Die Einflüsse der Atmosphäre auf das am Sensor erfasste Radianzspektrum werden durch eine atmosphärische Korrektur entfernt. Es findet dabei eine Überführung der Radianzspektren in normierte Reflexionsspektren, die den prozentualen Anteil der reflektierten Strahlung bezogen auf die einfallende Strahlung zum Inhalt haben, statt. Hochentwickelte Algorithmen zur Atmosphärenkorrektur hyperspektraler Daten (Richter & Schläpfer 2002; Staenz et al. 2002; Goetz et al. 2003) basieren auf einem Strahlungs-

transferansatz um die Oberflächenreflexion aus der am Sensor gemessenen Radianz abzuleiten. Die atmosphärischen Komponenten mit der größten Beeinflussung der solaren Strahlung sind Aerosole und Wasserdampf. Im Normalfall sind diese Daten für den Zeitpunkt der Datenaufnahme nicht oder im besten Fall punktuell verfügbar. Aus diesem Grund müssen Algorithmen zur direkten Ableitung der aerosoloptischen Dichte der Atmosphäre (*AOT* - engl. *Aerosol Optical Thickness*) (Bijonski et al. 2004; Liang & Fang 2004; Guanter et al. 2005) bzw. des Wasserdampfgehaltes (Schläpfer et al. 1998; Rodger & Lynch 2001; Goetz et al. 2003) aus den Hyperspektraldaten mit atmosphärischen Strahlungstransfermodellen verbunden werden. Ziel dabei ist es die atmosphärische Interaktion mit der hindurch dringenden solaren Strahlung zu simulieren.

Die atmosphärische Korrektur erfolgt für die *HyMap* Daten des Jahres 2007 mit dem von L. Guanter entwickelten Programm (Guanter et al. 2007). Die Korrekturen der ASIA Daten (2011) und der HySpex Daten (2012) werden mit der Software *ATCOR4* durchgeführt. Beide Verfahren arbeiten auf der Basis vergleichbarer Algorithmen. Zuerst wird eine parametrische Korrektur durchgeführt, die das physikalische Strahlungstransfermodell *MODTRAN4* (*ATCOR4*), bzw. eine optimierte Version dieses Modells (Guanter) verwendet. Es erfolgt eine pixelweise Korrektur der Daten in Abhängigkeit vom Aufnahmewinkel, womit eine Berücksichtigung des Einflusses unterschiedlicher Längen des Strahlungsweges durch die Atmosphäre stattfindet. Aufgrund der schwach ausgeprägten Topographie der Untersuchungsgebiete erfolgt die Korrektur mit einer durchschnittlichen Geländehöhe, ohne Einbeziehung eines DGMs. Die Abschätzung der AOT geschieht über vegetationsbestandenen Flächen (Schwellwertansatz mittel NDVI) auf der Basis modellierter Radianzwerte, wofür die modellierten Werte mit den Werten jedes Pixels verglichen und der Fehler minimiert wird. Die AOT Abschätzung der Gesamtszene erfolgt anschließend auf Grundlage des Maximums aller analysierten Pixel. Der Wasserdampfgehalt jedes Pixels wird über den *Atmospheric Pre-corrected Differential Absorption (APDA)* Algorithmus abgeschätzt (Schläpfer et al. 1998), wobei Modellspektren mit variierendem Wasserdampfgehalt mit den Bildspektren verglichen und der Fehler minimiert wird.

2.3.3 Geometrische Korrektur

Aufgrund des Zeilenscannerprinzips führen die Flugzeugbewegungen zu Rotationsbewegungen des Sensors um die drei Raumachsen (Roll-, Nick- und Gierwinkel), wodurch jede erfasste Bildzeile eine andere Aufnahmegeometrie besitzt. Die Flugzeugbewegungen können zu einem Teil durch den Einsatz einer kreiselstabilisierten Plattform, auf welcher der Sensor installiert ist, reduziert werden. Eine nachträgliche parametrische Geokorrektur mittels am Sensor gemessener INS/GPS Daten ist jedoch unabdingbar. Für jede Bildzeile werden in diesen Daten sechs äußere Orientierungsparameter (x -, y -, z -Koordinaten, Roll-, Nick- und Gierwinkel) erfasst.

Die Geokorrektur der Flugzeugscannerdaten umfasst zwei Teilschritte:

- ❖ Berechnung der Koordinaten aufgezeichneter Pixel entsprechend der Kollinearitätsbedingung
- ❖ Übertragung der Grauwerte in das Zielkoordinatensystem

Beide Prozessierungsschritte wurden mit von K. Segl am GFZ Potsdam entwickelten Programmen durchgeführt, um die Bilddaten in das Zielkoordinatensystem ETRS89 zu überführen. Im ersten Schritt der Prozessierung gehen die sechs INS/GPS Parameter, die Geländehöhe (DOM oder Mittelwert), der Öffnungswinkel der Kamera sowie die Kamerakonstante der Optik ein. Zur Berechnung und Korrektur eines eventuell konstanten Datenversatzes in den übergebenen Parametern werden aus digitalen Orthofotos entnommene Passpunkte verwendet. Da die Koordinaten der Pixel aufgrund des unterschiedlichen geometrischen Versatzes der Bildzeilen kein regelmäßiges Gitternetz bilden, ist für die Übertragung der Grauwerte in das Zielkoordinatensystem ein Resampling notwendig. Die Grauwertberechnung der Pixel erfolgt nach der von Watsin und Philip (1985) entwickelten abstandsgewichteten Interpolation (engl. *Inverse Distance Weighted Interpolation*), bei der die Pixelwerte im Raster des Zielkoordinatensystems gemäß Gleichung 2-12 aus einer festgelegten maximalen Anzahl von Pixeln innerhalb eines definierten Radius interpoliert werden. Die Anzahl wurde auf $n = 2$ und der Suchradius auf 10 m festgelegt.

$$G_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2 g_i}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad 2-12$$

mit $G_{x,y}$ Grauwert des Pixels in Zeile y und Spalte x im projizierten Rasterbild
 g_i Grauwert des i -dichtesten *HyMap*-Pixels
 d_i Euklidische Distanz des i -dichtesten *HyMap*-Pixels basierend auf Kartenkoordinaten
 n Maximale Anzahl zu berücksichtigender *HyMap*-Pixel innerhalb eines festgelegten Suchradius

Die Lagegenauigkeit der Datensätze wurde anhand unabhängiger Passpunkte aus hochauflösenden Orthofotos ermittelt. Der RMS-Fehler (engl. *root mean square error*) liegt für die *HyMap* Daten mit 5,7 m, für ASIA Daten mit 3,8 m und für HySpex Daten mit 2,4 m leicht über der jeweiligen geometrischen Auflösung der Daten. Aufgrund der zeilenbasierten Erfassung der äußeren Orientierungsparameter sind die Erfassungsfehler über den Bilddatensatz hinweg nicht konstant, sodass vereinzelt nicht korrigierbare Lageabweichungen von bis zu 15 m auftreten können. Da landwirtschaftliche Flächen eine relativ große Homogenität und Schlaggröße aufweisen, sind diese Fehler als sehr gering einzuschätzen und können für die Bewertung der Ergebnisse vernachlässigt werden.

3 Vegetationsfernerkundung

Die Fernerkundung wird seit mehreren Jahrzehnten für die Erfassung flächenhafter Informationen von Vegetationsbeständen genutzt. Häufige Fragestellungen sind dabei die Kartierung von Pflanzenbeständen in der Umweltforschung, sowie in der Regional- und Landesplanung (z.B. Bodennutzung, Wasserverhältnisse) (Lindgren 1985; Li & Yeh 2004), Stadtbiotopkartierungen (Bochow 2009), die Überwachung und Ertragsabschätzung in der Land- (Steven & Clark 1990; Migdall et al. 2009) und Forstwirtschaft (Hildebrand 1996), sowie die Ableitung biophysikalischer Pflanzenparameter, wie z. B. Chlorophyll- (Merzlyak et al. 2003; Gitelson et al. 2005; Blackburn 2006; Botha et al. 2006; Rao et al. 2008) und Pflanzenwassergehalt (Sims & Gamon 2003; Cheng et al. 2006; Kokaly et al. 2009).

Das Reflexionssignal von Pflanzenbeständen setzt sich als Funktion aus den optischen Eigenschaften der Pflanzenbestandteile (z.B. Blatt, Stängel, Ähre), dem strukturellen Aufbau der Pflanzen und des Gesamtbestandes, den optischen Bodeneigenschaften sowie der Beleuchtungs- und Aufnahmegeometrie (Ross 1981; Goel 1988; Myneni et al. 1989) zusammen. Im Anschluss an einen Kurzexkurs zur phänologischen Entwicklung von Getreide werden die blatt- und bestandsoptischen Eigenschaften in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

3.1 Phänologische Entwicklung von Getreide

Die phänologische Entwicklung einer Pflanze beschreibt deren Wachstumszyklus. Es wurden eine Vielzahl von Systemen zur Einteilung in bestimmte phänologische Stadien entwickelt (z.B. Feekes-Skala (1941), Haun-Skala, Zadoks-Skala und BBCH-Skala (Meier 2001)). Unter diesen hat sich das BBCH-Schema der „Deutschen Biologischen Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie“ zu einem der gebräuchlichsten Systeme in Europa etabliert. Die BBCH Skala bietet ein kontinuierliches Codierungssystem der Pflanzenentwicklung, welches für die meisten mono- und dikotylen Pflanzen anwendbar ist. Die phänologischen Entwicklungsstadien werden dabei in einem 99-

stufigen System charakterisiert, das in zehn Makrostadien mit jeweils bis zu neun Mikrostadien unterteilt ist. Ein Überblick des BBCH-Systems und die entsprechenden äußeren Erscheinungsbilder in der phänologischen Entwicklung von Getreide sind in Abb. 5-12, sowie im ausklappbaren Anh. A. dargestellt.

Die Aussaat des Wintergetreides erfolgt in Deutschland typischerweise im September/Oktober. Nach der Keimung und der Blattentwicklung folgt das Stadium der Bestockung, in welchem die Pflanze überwintert. Die Frosteinwirkung bewirkt die Veronalisation¹, welche eine Grundvoraussetzung für das im März/April einsetzende Schossen darstellt. Bis zur Erntereife im Juli/August durchlaufen die Pflanzen die weiteren Entwicklungsstadien.

3. 2 Blattoptische Eigenschaften

Das Blatt ist neben Sprossachse und Wurzel eines der Phytoelemente von Sprosspflanzen, wobei dessen Grundfunktion die Photosynthese ist. Die Blätter nehmen den Großteil der von der Pflanze absorbierten Strahlung auf. Dieser kann je nach Pflanzenart bis zu 90 % betragen (Zhumar 1994). Da sie je nach physiologischer Entwicklung die größte sichtbare Oberfläche darstellen, sind die optischen Eigenschaften der Pflanzenblätter für die Fernerkundung von besonderer Bedeutung.

Die auf das Blatt treffende Strahlung wird entweder reflektiert, transmittiert oder für die Photosynthese genutzt und damit absorbiert. Zu welchen Anteilen dies geschieht, ist vom strukturellen Blattaufbau, den biochemischen Inhaltsstoffen, der Wellenlänge und dem Einfallswinkel der Strahlung abhängig.

3.2.1 Blattstruktur

Bevor die Strahlung wieder aus dem Blatt austritt, wird sie an den Zellwänden reflektiert und gebeugt sowie an kleinen und kleinsten Partikeln der pflanzlichen Zelle gestreut (Abb. 3-1). Nach Willstätter und Stoll (1918) treten Reflexions- und Streueffekte an der Grenze zwischen zwei Medien unterschiedlicher Dichte auf. In Abhängigkeit der Materialeigenschaften führt dies zu unterschiedlichen Brechungsindizes. In einem Blatt ist dies der Übergang von Zellwänden (Brechungsindex: 1,425 bei 1 µm) in ein Interzellular (Brechungsindex: 1,0). Die Streuung der Strahlung wird hauptsächlich durch das Schwammgewebe hervorgerufen, in welchem die Zellwände sehr willkürlich orientiert sind und eine große Anzahl luftgefüllter Interzellularen existieren (Gausman et al. 1974). Das Palisadengewebe ist hierbei von geringerer Bedeutung. Aus

¹ natürliche Induktion des Schossens und Blühens durch eine längere Kälteperiode im Winter

diesem Grund reflektieren Blätter dikotyler Pflanzen, deren Schwammgewebe weniger kompakt ist und mehr luftgefüllte Interzellularen enthält, stärker als die monokotyler Pflanzen (Guyot et al. 1992).

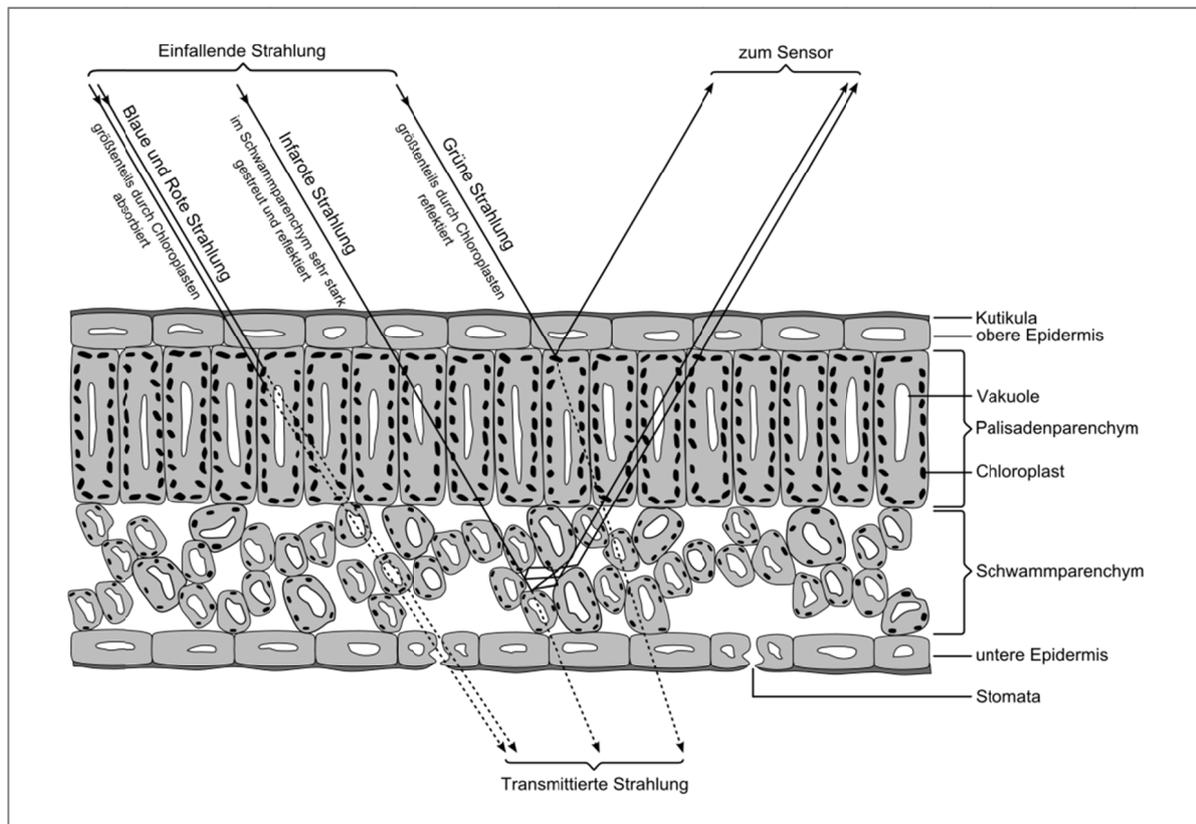


Abb. 3-1: Schematische Darstellung der Interaktion elektromagnetischer Strahlung mit einem dikotylen Blatt im VNIR (verändert nach Curran 1985).

3.2.2 Biochemische Inhaltsstoffe

Die Absorption der elektromagnetischen Strahlung innerhalb eines Blattes ist, in Abhängigkeit von der Wellenlänge, von unterschiedlichen Phänomenen bedingt. Charakteristisch ist, dass die Absorption vieler Stoffe von wenigen Stoffen überlagert wird (Fourty et al. 1996). Im VIS kommt es zu Pigmentabsorptionen, die zu Reflexions- und Transmissionswerten von unter 20 % führen. Bei vitalen Blättern überlagert hierbei die Absorption von Chlorophyll-a und -b die Absorption der Carotinoide und anderer Pigmente (Abb. 3-2). Dies wird erst mit zunehmendem Abbau des Chlorophylls im Laufe der phänologischen Entwicklung in der spektralen Signatur sichtbar. Diese Tatsache begründet das ähnliche spektrale Erscheinungsbild von vitaler Vegetation, auch wenn es sich um verschiedene Spezies handelt (Fourty et al. 1996; Kumar et al. 2001). Hierzu kommt, dass selbst die Absorption der Hauptbestandteile der Vegetation Lignin, Cellulose und Proteine durch die Absorption des Pflanzenwassers überlagert werden, was eine Unterscheidung verschiedener Arten erschwert.

Im Wellenlängenbereich des NIR wird die Strahlung nur zu einem sehr geringen Teil (typischerweise < 10 %) durch Wasser (970 nm und 1200 nm), Lignin, Zellulose und

Stärke absorbiert (Curran 1989). Im Bereich des SWIR sind vor allem zwei ausgeprägte Banden bei 1400 und 1940 nm durch die Absorption von Wasser bedeutend (Curran 1989). Die Absorption von Zellulose und Lignin wird erst bei Austrocknung des in der Zelle gebundenen Wassers im Bereich 2200 nm deutlich sichtbar.

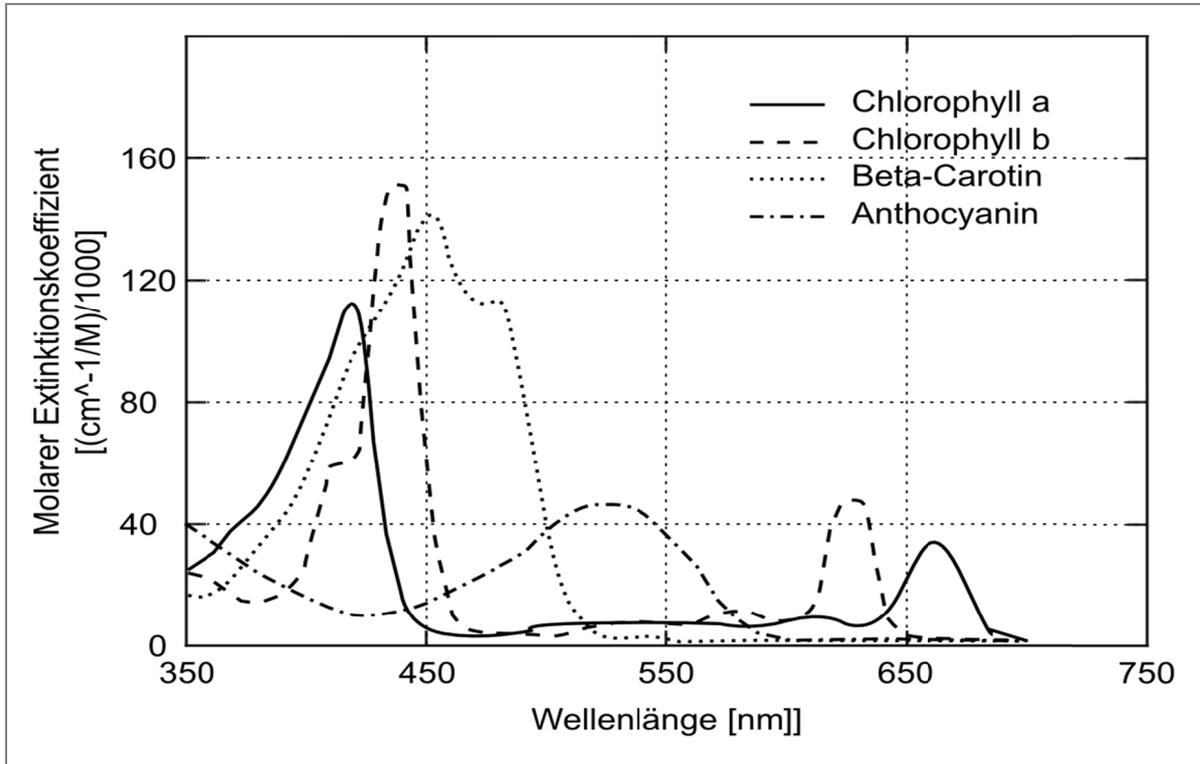


Abb. 3-2: Absorptionsspektrum der hauptsächlichen Blattpigmente (Blackburn 2006).

3.3 Bestandsoptische Eigenschaften

Vegetationsbestände weisen ein anisotropisches Streuungsverhalten auf, d.h. sie reflektieren nicht in alle Richtungen gleich. Die spektrale Variabilität eines Vegetationsbestandes ist durch seine optischen und strukturellen Eigenschaften, die zuvor beschrieben wurden, geprägt und kann in der BRDF abgebildet werden. Die BRDF von Vegetationsbeständen weist in bestimmten Bereichen typische Eigenschaften auf, welche für viele Bestandsarten gleichermaßen gelten. Die Kombination aus Pflanzenzwischenräumen und gegenseitiger Beschattung führt zu einem lokalen Minimum nahe des Nadirs im Bereich der Vorwärtsstreuung (Beleuchtung gegenüber des Betrachters), zu einem lokalen Maximum im Bereich der Rückwärtsstreuung (Beleuchtung hinter dem Betrachter), sowie zu einer tendenziell elliptischen konkaven Form (Kumar et al. 2001) (siehe Abb. 3-3). Diese ist in der Abnahme der sichtbaren Schattenfläche, ausgehend vom Bereich der Vorwärtsstreuung bis in den Bereich der Rückwärtsstreuung, an dem keine Schattenflächen sichtbar sind (*Hotspot*), begründet. In diesem Punkt ist die Beleuchtung gleich der Beobachtungsrichtung. Bestände mit planophiler Blatthaltung weisen neben dem *Hotspot* ein weiteres lokales Maximum im Bereich der Vorwärtsstreuung auf, welches

durch spiegelnde Reflexion bedingt ist (Sandmeier et al. 1998). Der *Hotspot* ist im VIS stärker und schärfer abgebildet als im NIR, da der *Hotspot* Effekt dominierend in der einfachen Streuung, d.h. der ersten Strahlungsinteraktion, auftritt. Der Bereich des NIR wird hingegen vornehmlich durch die Volumenstreuung charakterisiert, wobei die Strahlung eine transluzente Oberfläche durchdringt, sodass es zu Mehrfachstreuungen kommt (Kumar et al. 2001).

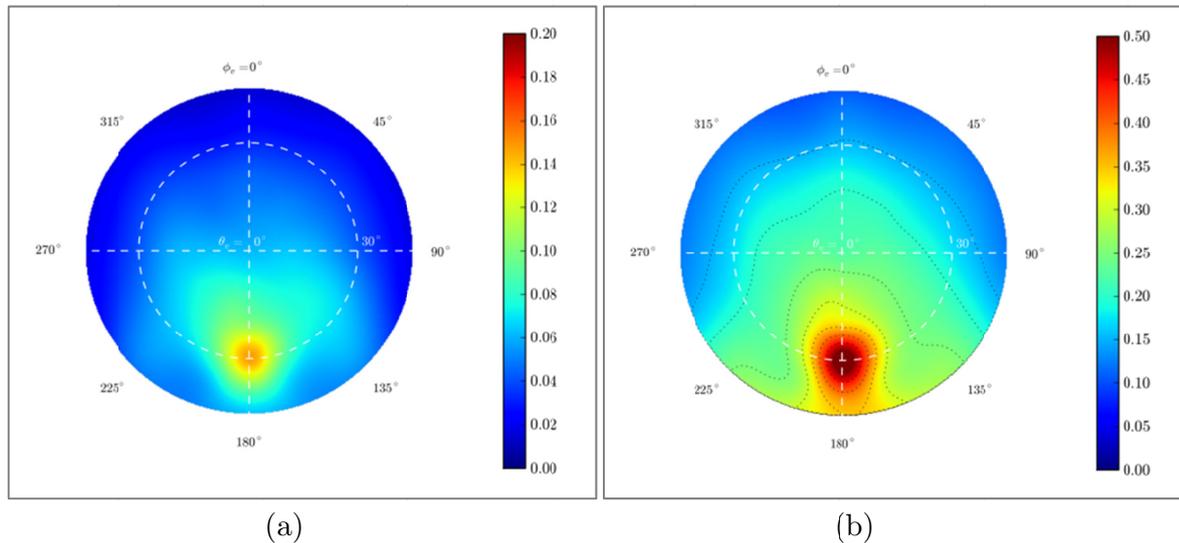


Abb. 3-3: BRDF eines Winterroggenbestandes im Stadium der Fruchtentwicklung bei
(a) 550 nm (VIS) und (b) 800 nm (NIR) mit einem Sonnenzenit von 30° (*Hotspot*).

Die bestimmenden Faktoren für die Form der BRDF eines Pflanzenbestandes sind sowohl die Struktur der bestandsbildenden Einzelpflanzen (Ross & Marshak 1988), wobei die Blattstellung, Blattgröße sowie die Form und Ausrichtung der Fruchtstände eine entscheidende Rolle spielen, als auch die Struktur des Bestandes, welche durch die Lage der Pflanzen zueinander bestimmt wird. In den folgenden Abschnitten werden die in dieser Arbeit relevanten Bestandsparameter beschrieben, wobei deren Einfluss auf das Reflexionsverhalten von Getreidebeständen im Kapitel 6 untersucht wird.

Blattfläche / Anzahl der Blattschichten

Bei der Betrachtung von Einzelpflanzen oder eines gesamten Bestandes stellt die Blattfläche eine entscheidende Kenngröße dar und kann über den von Watson (1947) erstmals beschriebenen Blattflächenindex (LAI - engl. *leaf area index*) wiedergegeben werden. Dieser gibt das Verhältnis der Blatt- zur Bodenfläche an. Zur Bestimmung des LAI existieren neben der direkten Methode, bei der je eine Seite aller Blätter eines Bestandes gemessen und in Bezug zur Grundfläche gesetzt werden, kontaktlose Verfahren, wobei die solare Strahlung über dem Bestand mit der den Boden erreichenden Strahlung auf der Basis von Strahlungstransfermodellen in Beziehung gesetzt wird. In diesem Bereich werden sehr häufig das SunScan SS1 der Firma Delta-T Devices (Delta-T Devices Ltd. 2002) und das LAI-2000/LAI2200 von LiCor (LI-COR Inc. 2012) eingesetzt.

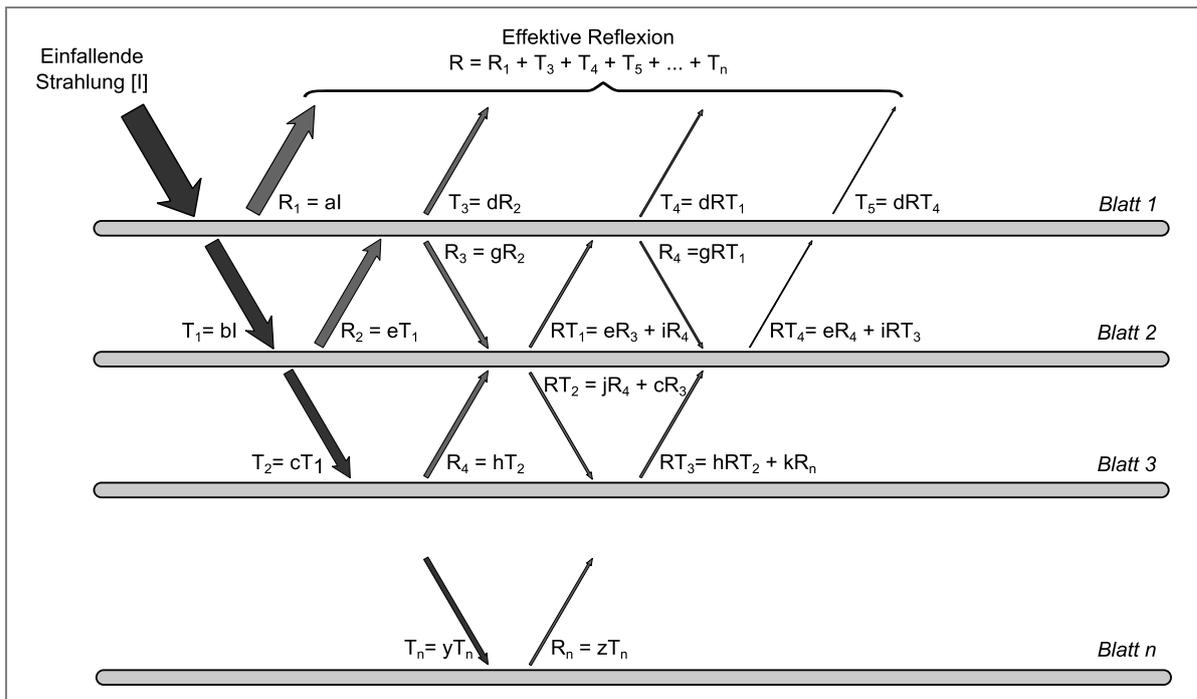


Abb. 3-4: Einfluss mehrerer Blattschichten auf das Reflexionsverhalten (verändert nach Hoffer 1978).

Je größer der LAI, desto mehr Strahlung wird im VIS durch die Pflanzenpigmente absorbiert, woraus eine Abnahme der Albedo in diesen Wellenlängenbereichen resultiert. Im SWIR hingegen führt die vergrößerte Blattfläche zu einer vermehrten Interaktion der einfallenden Strahlung (I) mit mehreren Blattschichten eines Bestandes (Volumenstreuung) zu einem additiven Effekt, der sowohl auf die Reflexion (R) und die Transmission (T), als auch auf die Absorption wirkt (Belward 1991)(vgl. Abb. 3-4). Da sich die optischen Eigenschaften jedes Blattes unterscheiden, werden die Anteile der reflektierten bzw. transmittierten Strahlung durch die Faktoren a bis z beschrieben.

Blattorientierung

Die Orientierung der Blätter besitzt einen signifikanten Einfluss auf die Intensität reflektierter Strahlung (Goel 1988). Generell lässt sich die Blattstellung von Getreide in die zwei Typen erectophil (zumeist aufrecht) und planophil (zumeist horizontal) einteilen, wobei diese Eigenschaft nicht arten- sondern sortenspezifisch ist (Drews et al. 2002) (Abb. 3-5). Darüber hinaus ist die Orientierung der Blätter eng mit der Sichtbarkeit des Bodens und der BRDF des Bestandes verknüpft (Lucht et al. 2000).



Abb. 3-5: Einfluss der sortenspezifischen Blatthaltung auf den Bedeckungsgrad eines Weizenbestandes bei 24 cm Reihenabstand (links: Sorte Greif – erectophil, rechts: Sorte Pegasos - planophil).

Ausrichtung der Pflanzen und Ähren

Die Pflanzen eines Bestandes stellen sich alle unterschiedlich dar, sodass nicht von einer bestimmten Ausrichtung gesprochen werden kann. Mit zunehmender Entwicklung der Ähren kann es jedoch zu einer Hauptausrichtung dieser kommen, welche sehr stark mit der Hauptwindrichtung korreliert (Abb. 3-6). Die Stärke der Ausprägung ist sehr von der Pflanzenart abhängig. Eine gerichtete Anordnung der Ähren, kann das BRDF-Verhalten des Bestandes dabei maßgeblich beeinflussen.



Abb. 3-6: Orientierung der Ähren in eine Hauptausrichtung (links: Wintergerste, rechts: Winterroggen) im Testgebiet Wittbrietzen (Aufnahmedatum: 26.06.2008).

Pflanzendichte

Die Pflanzendichte beschreibt die Anzahl der auf einen Meter Pflanzreihe ausgebrachten Saatkörner. Dieser Parameter bestimmt die Dichte des Getreidebestandes und besitzt damit einen starken Einfluss auf die Struktur des Bestandes und daraus resultierend auf dessen Reflexionsverhalten.

Reihenabstand

Der Reihenabstand ist eng an die Anbauform und die damit verbundene Saat-Technik gekoppelt. Handelsübliche Drillmaschinen weisen Reihenabstände von 8 bis 18 cm auf, wobei Abstände um 12 cm am häufigsten Anwendung finden (Köller & Müller 1998). Mit steigendem Reihenabstand vergrößert sich der Anteil des sichtbaren Bodens und somit dessen Einfluss auf die Bestandsreflexion. In Abhängigkeit von der Getreideart und -sorte erfolgt ein Bestandsschluss, im Vergleich zu engerem Reihenabstand, wenn überhaupt erst in späteren Entwicklungsstadien. Dies bietet jedoch günstige Wachstumsvoraussetzungen für Begleitvegetation im Bestand, die ihrerseits das Reflexionssignal des Bestandes modifiziert.

Untergrund

Der Bodenuntergrund stellt eine für das Reflexionsverhalten eines Getreidebestandes stark beeinflussende Kenngröße dar. Neben der direkten Beeinflussung des Reflexionsverhaltens, in Form von Bodenfarbe, Feuchtigkeitsgehalt und Struktur, bestimmt der Boden durch seinen Nährstoffgehalt und seinem Vermögen pflanzenverfügbares Wasser zu speichern, auch direkt die Pflanzenentwicklung. Die Intensität des Einflusses des Bodens ist dabei, neben der Struktur der Einzelpflanzen, auch durch die Struktur des gesamten Pflanzenbestandes bestimmt und variiert daher sehr.

4 Untersuchungsgebiete und Felddaten

Die innerhalb dieser Arbeit entwickelten Auswerteverfahren werden in vier Untersuchungsgebieten getestet, in denen zum Teil umfangreiche terrestrische Informationen erhoben wurden. Wichtige Kriterien bei der Auswahl der Gebiete waren die Variabilität der angebauten Arten, heterogene Boden- und Wasserverhältnisse, sowie eine hohe Repräsentativität der Anbau- und Bodenverhältnisse für die Region Brandenburg. Die dort erhobenen Daten wurden für die Modellierung von Getreidebestandsreflexion auf der Basis von 4D-Pflanzenmodellen, die Klassifizierung und die Validierung der Ergebnisse verwendet.

Die fünf Testgebiete, die in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben werden, umfassen die im Raum Berlin/Brandenburg gelegenen Regionen Wittbrietzen, Groß Kreutz und Berlin-Dahlem, das Gebiet Demmin in Mecklenburg-Vorpommern sowie das Gebiet Fichtwald im östlichen Brandenburg (s. Abb. 4-1). Die Testgebiete Wittbrietzen, Groß Kreutz, Demmin und Fichtwald weisen regional typische Bodenverhältnisse und eine durch konventionelle Landwirtschaft geprägte Bewirtschaftung auf, und stellen repräsentative Testgebiete für die Region Nordost-Deutschland dar. Das Testgebiet Berlin-Dahlem nimmt aufgrund seiner städtischen Lage und der Bewirtschaftung als Dauerversuchsanlage unter den Testgebieten eine Sonderstellung ein.

Die Landschaft sämtlicher Testgebiete ist weitestgehend ein Resultat der Überprägung im Pleistozän, insbesondere während der letzten Eiszeit mit der sich anschließenden deutlichen Klimaveränderung während des Holozäns, sowie der jahrhundertelangen anthropogenen Einflüsse.

Die gesamte Region ist Teil des Norddeutschen Tieflands und somit durch mehrmalige pleistozäne Vereisung geprägt. Die quartären Ablagerungen bedecken über 95 % der Oberfläche und bestehen aus losen Substraten von 60 - 80 m Mächtigkeit. Die klimatischen Bedingungen sind durch ein gemäßigtes Klima mit kalten Wintern und teilweise heißen Sommern charakterisiert. Die frostfreie Periode erstreckt sich typischerweise von Mai bis September. Im Zeitraum von Ende März bis Mitte November erreichen die

durchschnittlichen Tagestemperaturen Werte über 5° C und ermöglichen den Anbau von Feldfrüchten (Chmielewski & Köhn 1999). Der Niederschlag im Jahresmittel beträgt ca. 550 mm (Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg 2004).

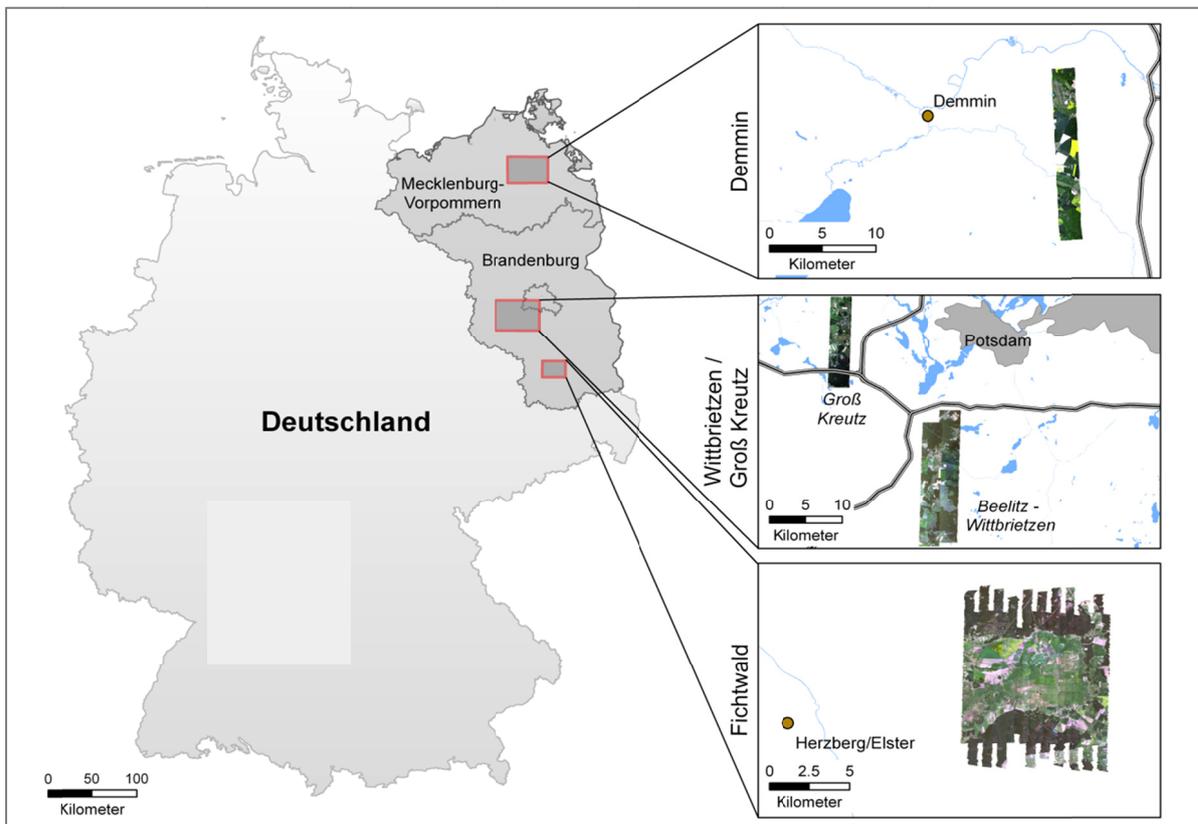


Abb. 4-1: Lage der Untersuchungsgebiete und der hyperspektralen Flugzeugscannerdaten innerhalb der Testgebiete.

4.1 Berlin / Brandenburg

Im Untersuchungsraum Berlin / Brandenburg befinden sich drei Testgebiete, in denen die Datengrundlagen für die Modellierungen erhoben wurden. Neben den zuvor beschriebenen Standortkriterien zeichnen sich die Flächen durch eine sehr gute Erreichbarkeit von Potsdam aus, was eine regelmäßige Datenaufnahme ermöglicht, die zur Modellierung der Bestandsreflexion unabdingbar ist. Diese beiden Testgebiete sind typische landwirtschaftliche Nutzflächen im Raum Brandenburg und werden um das Dauerversuchsfeld der Humboldt Universität Berlin in Berlin-Dahlem ergänzt.

Im Testgebiet **Wittbrietzen** (52° 12' N, 12° 59' O, Höhe 56 m ü.NN), ca. 30 km südlich der brandenburgischen Landeshauptstadt Potsdam gelegen, werden auf einer Fläche von ca. 20 km² vorwiegend Roggen, Gerste, Raps, Mais und Sonnenblumen angebaut. Das Ertragspotenzial fällt mit Bodenzahlen zwischen 30 und 50 vergleichsweise gering aus. Auf einigen Schlägen wird jedoch auch Weizen angebaut. Die Böden fallen zumeist

in die Kategorie „Böden aus Sand mit Böden aus Sand über Lehm“ (Bauriegel et al. 2001), die in den Flussauen durch Gleye ergänzt werden.

Das Testgebiet **Groß Kreutz** (52°24' N, 12°46' O, Höhe 33 m ü.NN) umfasst eine Fläche von ca. 10 km² und ist ca. 30 km westlich von Potsdam gelegen. Die Bodenzahlen von überwiegend 30 - 50, z.T. auch < 30 spiegeln die gleichen Bodenverhältnisse wie jene des Testgebietes Wittbrietzen wider. An diesem Standort erfolgt vorwiegend der Anbau von Winterroggen, Mais und Grünland zur Futtermittelproduktion.

Das Testgebiet **Berlin-Dahlem** (52° 28' N, 13° 18' O, Höhe 51 m ü.NN) ist im Südwesten der Stadt Berlin gelegen. Der Dauerfeldversuch umfasst die acht Kulturen Winterroggen, Sommergerste, Mais, Zuckerrübe, Kartoffel, Hafer, Ackerbohne und Lupine, die auf Testfeldern mit einer Größe von 12,5 x 12,5 m kultiviert werden. Zusätzlich wird auf benachbarten Flächen Winterweizen angebaut.

4. 2 **Demmin**

Das Testgebiet Demmin befindet sich in Mecklenburg-Vorpommern, im Nordosten der Bundesrepublik Deutschland und erstreckt sich von 12° 50' bis 13° 30' östlicher Länge und 53° 40' bis 54° 10' nördlicher Breite. Es ist ebenfalls Teil des Norddeutschen Tieflands, das während der Weichselkaltzeit (speziell im Pommerschen Stadium) überprägt wurde. Glazi-fluviale und glazi-limnische Ablagerungen sowie seichte Moränenzüge bestimmen das Relief des Untersuchungsraumes. Der Boden ist durch lehmige Sande und sandige Lehme im Wechsel mit reinen Sand- oder Lehmgebieten charakterisiert (Gerighausen et al. 2007). Das Bewirtschaftungsgebiet der Interessengemeinschaft Demmin umfasst insgesamt etwa 300 km² Monitoringfläche. Damit ist der Standort Demmin hinsichtlich der Gesamtgröße als Testgebiet einzigartig.

4. 3 **Fichtwald**

Das Testgebiet Fichtwald umfasst eine Fläche von ca. 20km² und befindet sich in Brandenburg zwischen Berlin und Dresden. Das feuchte Niederungsgebiet ist im zentralen Teil durch Niedermoorböden charakterisiert. Das Relief steigt am nördlichen, südlichen und östlichen Rand hin an, sodass die dortigen Bodenverhältnisse durch schwach lehmige Sande und mittelsandigen Feinsand geprägt sind.

Die landwirtschaftliche Nutzung ist sehr stark an die Boden- und Wasserverhältnisse geknüpft. Der zentrale Teil des Gebietes wird durch extensives Grünland mit Weidenutzung dominiert. Die etwas höher gelegenen Randbereiche werden hingegen ackerbaulich bewirtschaftet.

4. 4 **Aufnahmen im Feld**

Für die Modellierung der Bestandsreflexion sind eine Vielzahl unterschiedlicher Daten nötig. In den folgenden Abschnitten werden die verwendeten Daten hinsichtlich der Aufnahme, Vorverarbeitung und Verwendung detailliert beschrieben. Die Aufnahme der Daten erfolgte zum größten Teil in Untersuchungsgebiet Wittbrietzen, ergänzt durch Erhebungen auf Testflächen in Dahlem und Groß Kreuzt. Die Lage der zur Datenaufnahme genutzten Transekte ist in Abb. 4-2 für zwei der Untersuchungsgebiete dargestellt. Auf eine Darstellung der Beprobungstransekte des Standortes Dahlem wird aufgrund der kleinen Parzellengröße von 10 m x 10 m verzichtet.

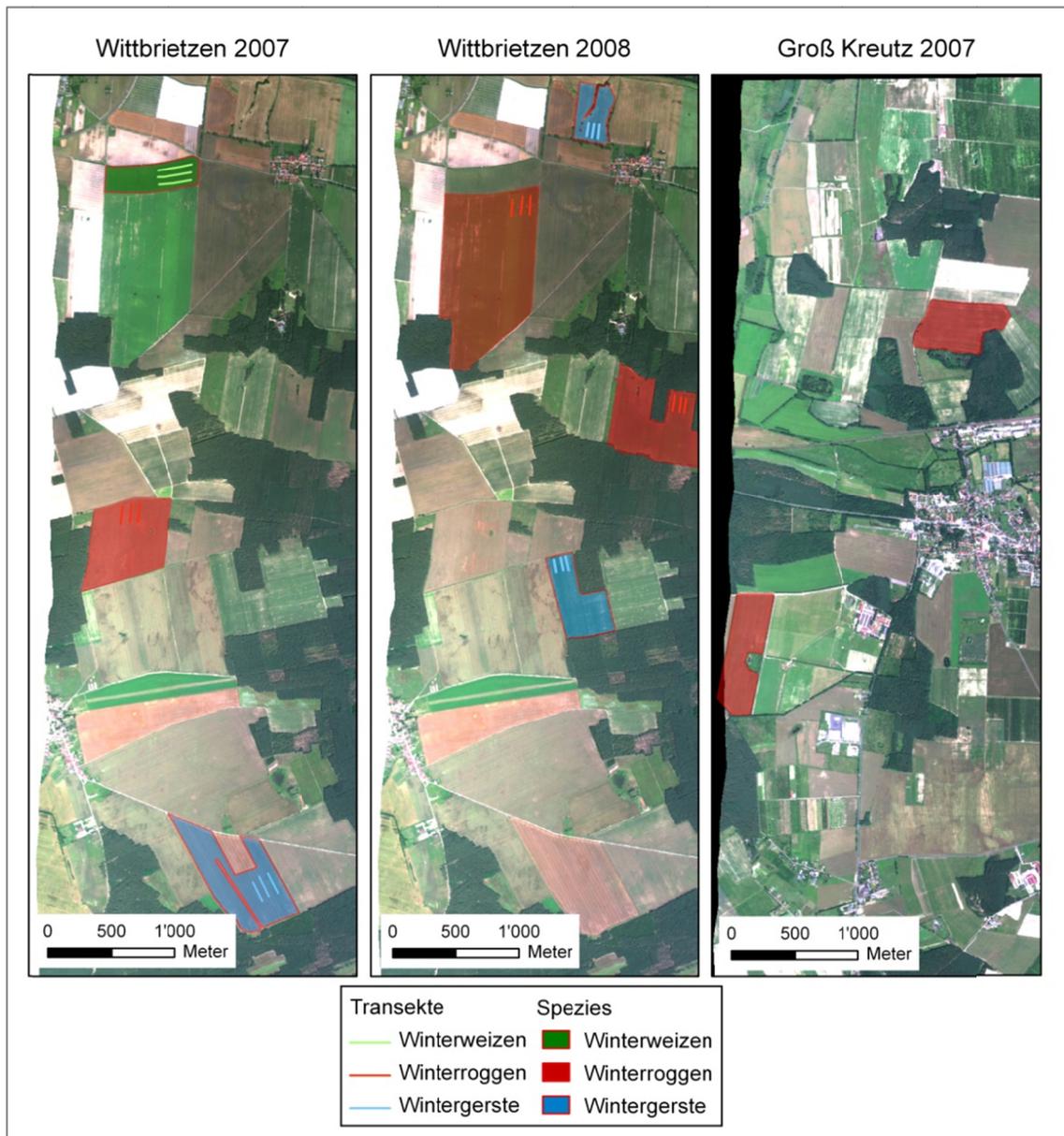


Abb. 4-2: Lage der Testflächen und der Beprobungstransekte der Jahre 2007 und 2008 für die Testgebiete Wittbrietzen und Groß Kreuzt (Hintergrundbild – *HyMap* 2007 - RGB)

4.4.1 Spektrale Messdaten

Labor- und geländespektroskopische Messungen der einzelnen Pflanzenbestandteile und des Bodens bilden die Datengrundlage für die innerhalb des Simulationsprozesses notwendige Definition von deren optischen Eigenschaften. Darüber hinaus dienen Bestandsreflexionsmessungen für die Validierung der Simulationsergebnisse.

Instrument und Messprinzip

Die Spektralmessungen wurden mit dem hochauflösenden Spektroradiometer *ASD FieldSpec 3 HiRes* erhoben (Analytic Spectral Devices Inc. 2010). Dieses Gerät zeichnet die von einer Oberfläche reflektierte elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 350 – 2500 nm in 2151 Bändern auf (Analytic Spectral Devices Inc. 2010).

Vor Beginn der Messungen ist das Messinstrument einer Kalibrierung zu unterziehen, bei der eine Anpassung der Detektoren erfolgt und das Signal des Dunkelstroms (*DC – engl. dark current*), welches die Eigentemperatur des Gerätes induziert, quantifiziert wird. Die Bestimmung der tatsächlich von der Oberfläche reflektierten Strahlung ρ , erfolgt über eine Kalibrierung des Spektroradiometers an die vorherrschenden Strahlungsverhältnisse unter Verwendung eines Spectralon Weißstandards (STR-99-100). Der spektrale Reflexionsgrad ρ_λ eines Materials der Oberfläche errechnet sich aus:

$$\rho_\lambda = \frac{DN_\lambda^{OF}}{DN_\lambda^{WS}}, \quad 4-1$$

DN_λ^{OF} die Intensität der Oberfläche, DN_λ^{WS} die Intensität des Weißstandards ist.

Die Kalibrierung sollte in regelmäßigen Abständen wiederholt werden, um eine Anpassung an die sich ändernden Messbedingungen zu gewährleisten. Speziell für Geländemessungen sind verschiedene Regeln einzuhalten, um konsistente Messergebnisse zu erzielen (Analytic Spectral Devices Inc. 2010):

- ❖ Für geländespektroskopische Messungen sind wolkenfreie und windarme Bedingungen notwendig, um konstante Strahlungs- und Bestandsbedingungen vorzufinden. Weiterhin sollten die Messungen zeitnah zum Sonnenhöchststand erfolgen.
- ❖ Die Messungen sollten mit einem standardisierten Messaufbau (z.B. Kalibrierung, Abstand Sensor-Oberfläche, Blickwinkel) durchgeführt und dokumentiert werden.

Methodik der spektroskopischen Messungen

Unter Berücksichtigung der oben genannten Regeln zur Erhebung von Geländespektroskopischen Daten, werden im Folgenden die spezifischen Aufnahmeparameter beschrieben. Während der Wachstumsperioden 2006/07 und 2007/08 wurden sowohl Getreidebestände von Winterroggen, Winterweizen und Wintergerste in unterschiedli-

chen Wachstumsphasen, als auch die Bodenreflexion unterschiedlicher Standorte der Testgebiete Wittbrietzen, Groß Kreutz und Dahlem gemessen (siehe Abb. 2-1). Alle spektralen Messungen erfolgten unter wolkenlosen Bedingungen in einem Zeitfenster von ± 2 h um den Sonnenhöchststand mit einer 8° Voroptyk. Die Messungen erfolgten auf zwei Arten:

Erste Messung: Erfassung des Reflexionssignals des Gesamtbestandes in einem Abstand von ca. einem Meter über der Vegetation, was zu einem Messdurchmesser von ca. 12 cm führt. Kontinuierliche Aufzeichnung von sechs Profilen pro Feld mit einer Länge von ca. 20 m. Das gemittelte Signal eines Profils wird aus 1000 Punktmessungen gebildet.

Zweite Messung: Erfassung des Reflexionsvermögens einzelner Pflanzenbestandteile. Messung der Phytoelemente Blatt, Halm und Ähre in einem Abstand von 5 cm unter Verwendung einer Moosgummiunterlage zur Minimierung von Transmissionseinflüssen. Gebündelte Messung von Ähren und Halmen, um eine ausreichend große Messfläche herzustellen.

Spektrale Messungen des Bodens erfolgten sowohl direkt im Feld, als auch unter Laborbedingungen. An unterschiedlichen Standorten wurden Proben des Oberbodens von unterschiedlichen Bodentypen und -ausprägungen entnommen und diese bei 105°C , 24 h ofengetrocknet. Spektrale Messungen fanden zuerst in ofentrockenem Zustand statt und wurden im Folgenden mit künstlich befeuchteten Proben fortgesetzt. Die Erhöhung der Bodenfeuchte erfolgte in Schritten von 2 % ausgehend vom Trockengewicht der jeweiligen Probe.

Korrektur- und Vorverarbeitungsschritte

Die Daten werden in spektralen Bibliotheken gespeichert und aufbereitet. Dazu gehört die Bestimmung und Entfernung von Detektorsprüngen, die durch minimale Unterschiede der Aufnahmeflächen der drei Teilspektrometer entstehen. Bänder mit einem schlechten SNR im Wellenlängenbereich 1350 - 1440 nm, 1790 - 1990 nm und 2360 - 2500 nm werden für den Simulationsprozess nicht berücksichtigt und wurden in allen Daten entfernt.

4.4.2 Vegetationsdaten

Charakterisierung von Einzelpflanzen

Die Simulation von 4D-Pflanzen erfordert detaillierte Kenntnisse der zu modellierenden Pflanzen. Für die Getreidepflanzen wurde ein Messprotokoll geführt, in dem die Pflanzenparameter Art, Phänologie, Pflanzenhöhe, Anzahl der Blätter, Länge der Einzelblätter, Blattspreite der Einzelblätter, Blattform, Blattstellung (Winkel zur Sprossachse), Höhe des Blattansatzes über Grund, Anzahl der Sprossachsen pro Pflanze sowie weitere relevante Informationen wie Fotonummer oder äußere Auffälligkeiten (Abknicken von Blättern, Torsion von Blättern) vermerkt wurden.

Charakterisierung des Getreidebestandes

Um einen Getreidebestand realitätsnah nachbilden zu können, sind neben den pflanzenbeschreibenden Informationen auch bestandsbeschreibende Parameter notwendig. Hierfür wurden Höhenprofile des Bodens zur Generierung von digitalen Geländemodellen, der Reihenabstand, die Pflanzdichte (Pflanzen / m) sowie der LAI (SunScan SS1 mit externem Sonnenscheinsensor BF3) erfasst.

Anbaudaten

Die Anbaudaten enthalten unter anderem die Schlaggrenzen und Informationen über die angebauten Kulturen. Für das Untersuchungsgebiet Wittbrietzen wurden diese Daten für das Jahr 2007 von der Agrar-GbR Wittbrietzen Frenzel-Schmidt zur Verfügung gestellt. Die Anbaudaten des Testgebietes Demmin für das Jahr 2008 stellte das DLR Neustrelitz zur Verfügung. Für das Jahr 2012 wurden die Daten im Rahmen des TERENO Projektes durch die IG Demmin bereitgestellt. Für die Testgebiete Groß Kreutz (2007) und Fichtwald (2011) erfolgte die Kartierung im Rahmen dieser Dissertation.

4.4.3 Bodendaten

Für jeden betrachteten Schlag der Untersuchungsgebiete wurden Bodenproben entnommen. Dies beinhaltete zum einen ungestörte Proben mittels Stechzylinder, aus einer Tiefe von ca. fünf Zentimeter, zur Analyse der Bodenfeuchte und zum anderen Oberbodenproben.

5

Reflexionsmodellierung von Getreidebeständen

Die optischen Eigenschaften von Pflanzenbeständen werden maßgeblich durch die blattoptischen Charakteristika, das Bodensignal und den strukturellen Aufbau des Bestandes bestimmt. Zur Erweiterung des Verständnisses über die Reflexions- und Streuungsmechanismen innerhalb von Vegetationsbeständen wurden zahlreiche Simulationsmethoden auf Blatt- und Bestandesebene entwickelt.

Ausgehend von der Modellierung blattoptischer Eigenschaften, welche für die Modellierung des Transmissionsverhaltens von Blättern auf der Basis im Feld gemessener Blattreflexionen notwendig ist, werden die Grundlagen zur Reflexionsmodellierung von Vegetationsbeständen in diesem Kapitel erläutert. Im Anschluss daran wird die Modellierung komplexer 4D-Pflanzenmodelle, welche eine Grundvoraussetzung zur Modellierung realitätsnäher Bestandsreflexion darstellen, beschrieben. Die Vorstellung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahrens zur Modellierung von Bestandsreflexion auf der Basis komplexer 4D-Pflanzenmodelle bildet den Abschluss dieses Kapitels.

5.1 Modellierung von blattoptischen Eigenschaften

Neben der Reflexion besitzt das Transmissionsverhalten der Pflanzenelemente einen entscheidenden Einfluss auf das Strahlungsverhalten eines Pflanzenbestandes. Besonders Blätter weisen aufgrund ihres geringen Querschnitts und des inneren Aufbaus eine nicht zu vernachlässigende Transluzenz auf. Da die Transmission nicht direkt im Feld erfasst werden konnte, erfolgt eine nachträgliche Modellierung auf der Basis von PROSPECT5 (Jacquemoud & Baret 1990; Feret et al. 2008) für vitale Vegetation und einer für braune Blattpigmente abgewandelten PROSPECT Version (F. Baret, persönliche Kommunikation 2009) für trockene Blätter. Das Programm ist das bekannteste und am häufigsten eingesetzte Modell zur Simulation der optischen Eigenschaften von Einzelblättern. Es basiert auf dem generalisierten Schichtmodell von Allen et al. (1969), welches den inneren Aufbau eines Blattes als mehrere interagierende Schichten beschreibt. Sie sind durch spezifische Absorptions- und Materialeigenschaften charakterisiert, welche wiederum auf

z.B. Pigmentkonzentrationen (Chlorophyll a + b, Karotinoide), den Wassergehalt oder die Mesophyllstruktur und damit verbundene Brechungsindizes zurückzuführen sind.

Für die Simulation der Blatttransmission werden zahlreiche Spektralbibliotheken mit variierenden PROSPECT Parametern modelliert, die insgesamt 4,3 Mio. Reflexions- und ebenso viele entsprechende Transmissionsspektren umfassen. Durch eine Residuenanalyse der gemessenen Blattreflexionsdaten V_{orig} zu den modellierten PROSPECT Daten V_{mod} :

$$\sum (V_{orig} - V_{mod})^2 \rightarrow \min, \quad 5-1$$

erfolgt über eine Minimierung der quadratischen Abweichung zu jedem real gemessenen Spektrum die Selektion des ähnlichsten PROSPECT-Spektrums. Das dem PROSPECT Reflexionsspektrum entsprechende Transmissionsspektrum wird im Anschluss mit den realen Messdaten verknüpft, sodass für die Modellierung der Bestandsreflexion sowohl Reflexions- als auch Transmissionseigenschaften der Blätter integriert werden können.

Neben den Schichtmodellen wie z.B. PROSPECT und LEAFMOD (Ganapol et al. 1998) wurden eine Vielzahl weiterer Modellierungsmethoden entwickelt. Hierzu zählen die kompakt sphärischen Partikelmodelle wie z.B. dem für Nadelblätter entwickelten LIBERTY von Dawson et al. (1998), N-Fluss Modelle wie z.B. das 2-Fluss Modell von Cordon & Lagorio (2007) und das 4-Fluss Modell von Richter & Fukshansky (1996), Raytracing Modelle wie z.B. RAYTRAN (Govaerts & Verstraete 1998) und stochastische Ansätze wie z.B. LFMOD1 (Tucker & Garratt 1977) oder SLOP (Maier et al. 1999), auf die an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen wird.

5.2 Modellierung von bestandsoptischen Eigenschaften

Es wurde eine Vielzahl von Modellen zur Simulation des Reflexionsverhaltens oberhalb von Pflanzenbeständen entwickelt, deren Hauptunterschied in der Beschreibung der Bestandsarchitektur (1D, als auch 3D) liegt (Goel 1988). Hierbei können drei Modellgruppen unterschieden werden, welche die geometrischen und optischen Eigenschaften eines Bestandes verschieden komplex auflösen. Bei den in den folgenden Abschnitten näher erläuterten Bestandsreflexionsmodellen kann in:

1. Strahlungstransfermodelle,
2. Geometrisch optische Modelle und
3. Computersimulationsmodelle

unterschieden werden.

5.2.1 Strahlungstransfermodelle

Strahlungstransfermodelle (Abb. 5-1) repräsentieren einen Vegetationsbestand durch eine oder mehrere horizontal angeordnete Schichten, die aus kleinen streuenden und ab-

sorbierenden Elementen, welche die Blätter darstellen, bestehen (Suits 1971; Verhoef 1984; Myneni et al. 1990; Gao 1993). Die Reflexion des Bestandes errechnet sich als eine Funktion aus Dichte und Orientierung der Blätter, wobei die Architektur des Bestandes durch sehr wenige Parameter beschrieben wird. Die bekanntesten Modelle dieser Kategorie sind das von Verhoef (1984) auf Basis des Suits-Modells (Suits, 1971) entwickelte *SAIL* (*light Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves*) sowie *FLAIR* (*Four-Scale Linear Model for Anisotropic Reflectance*) von White et al. (2001). Die einfache Struktur der Bestände in diesen Modellen erlaubt eine Inversion des Modells bei geringen Rechenzeiten. Die Ergebnisse sind jedoch aufgrund der Einfachheit in ihrer Genauigkeit stark limitiert. Aussagen über den Einfluss von Einzelpflanzen oder die Struktur des Bestandes können nicht getroffen werden.

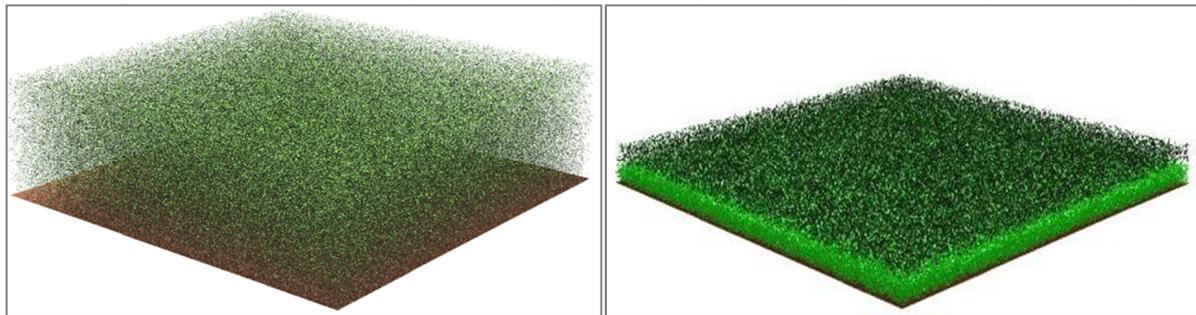


Abb. 5-1: Strahlungstransfermodelle aus trüben Medien (RAMI 2009).

5.2.2 Geometrisch optische Modelle

Einfache geometrische Modelle (Li & Strahler 1986; Bégué 1992; Verbrugghe & Cierniewski 1995) beschreiben einen Bestand mit einfachen geometrischen Formen wie Kugeln, Zylindern oder Kegeln (Abb. 5-2). Diese Objekte stellen Einzelpflanzen oder Pflanzengruppen dar, die sowohl blickdicht (Verbrugghe & Cierniewski 1995) als auch porös (Bégué 1992) aufgebaut werden und ebenfalls Schatten auf den Boden oder weitere Objekte der Szene werfen können. Der Anteil zwischen beleuchteten und schattigen Teilen der Szene soll die hauptsächlich richtungsabhängigen Unterschiede der Bestandsreflexion erklären (Li & Strahler 1986).

Hybride Modelle (Li et al. 1995; Gastellu-Etchegorry et al. 1996; Ni et al. 1999) verbinden die beiden zuvor beschriebenen Modelle (Abb. 5-3), wobei einfache geometrische Formen ein trübes Medium begrenzen (Li et al. 1995) oder die Szene als eine 3D-Matrix beschrieben wird, deren Zellen aus trübem Material und Flächen besteht (Gastellu-Etchegorry et al. 1996). Wenngleich diese Modelle 3D-Strukturen zur Nachbildung des Bestandes nutzen, eignen sich die Modelle eher um größere Objekte, wie Baumkronen in Forstökosystemen nachzuempfinden. Die Modellierung filigraner Getreidepflanzen und die Analyse der Bestandsstruktur sind mit diesen Modellen nicht realisierbar.

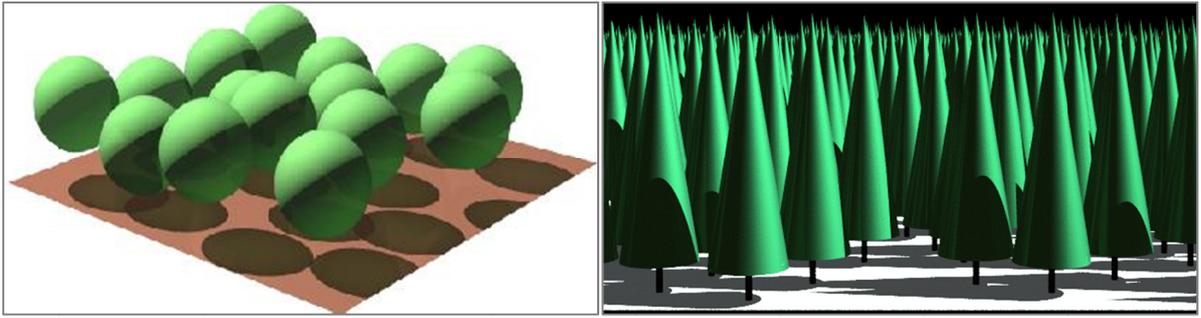


Abb. 5-2: einfache geometrische Modelle (RAMI 2009).

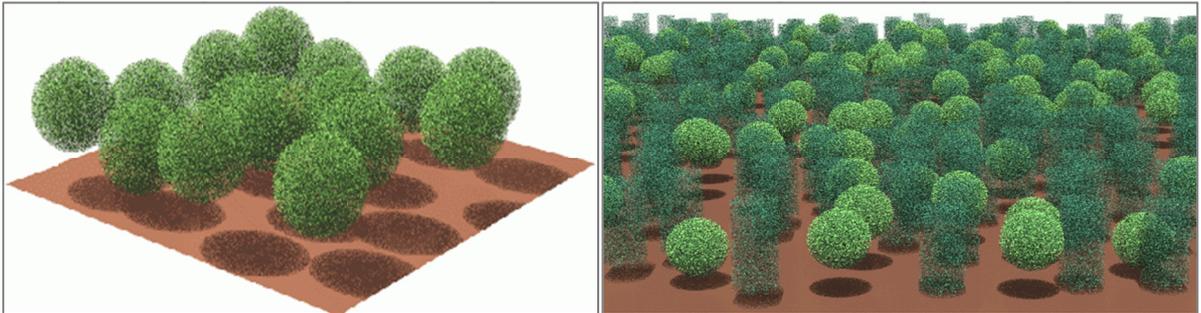


Abb. 5-3: Hybridmodelle (RAMI 2009).

5.2.3 Computersimulationsmodelle

Zur noch genaueren Berechnung des Strahlungsverhaltens eines Bestandes ist die Simulation von Einzelpflanzen erforderlich. Diese beschreibt einen Bestand mit Hilfe einer Vielzahl detaillierter 3D-Pflanzenobjekte, die aus kleinen geometrischen Formen (z.B. Flächen, Zylinder, Prismen und Kugeln) bestehen (Abb. 5-4). Um den Strahlungstransfer zwischen den Oberflächen unter Berücksichtigung der gegebenen Aufnahme- und Beleuchtungsgeometrie zu berechnen sind zwei Modelle, das Monte-Carlo-Raytracing (MCRT) und das Radiositätsverfahren geläufig. Beide Methoden sind zur Berechnung der Verteilung von Strahlung in computergraphischer Anwendung weit verbreitet.

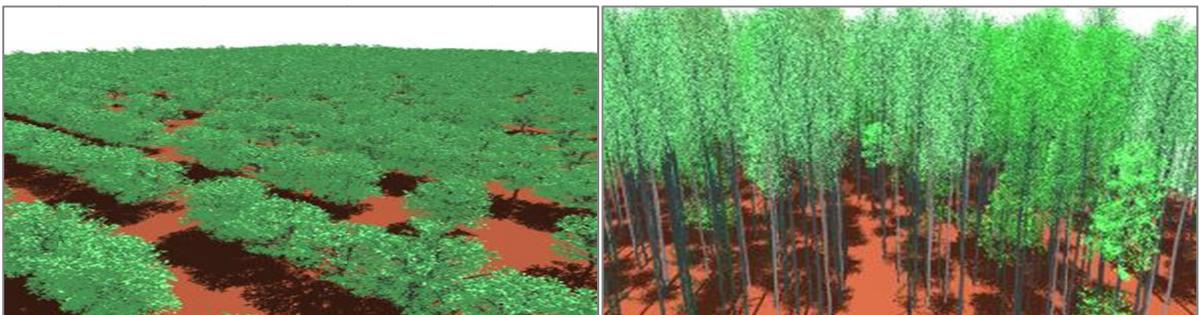


Abb. 5-4: Komplexe geometrische Modelle (RAMI 2009).

Monte-Carlo-Raytracing

Raytracing ist ein auf Strahlenverfolgung basierendes Verfahren zur Verdeckungsrechnung, also zur Ermittlung der Sichtbarkeit von Objekten im Raum von einem bestimmten Punkt aus und hat seine breiteste Verwendung in der Computergrafik zur Abbildung von 3D-Szenen. Beim Raytracing wird der Weg eines Strahls, ausgehend von einer Lichtquelle, durch die Szene zu einem Detektor hin verfolgt, wobei der Strahl beim Auftreffen auf Oberflächen reflektiert, transmittiert oder absorbiert wird. Aufgrund des begrenzten Kamerablickwinkels verlässt eine Vielzahl der ausgesendeten Strahlen die Szene, ohne dass sie einen Einfluss auf das zu simulierende Strahlungsverhalten besitzen. Die Reziprozität des Lichtes, welche eine Umkehrung der Verfolgungsrichtung erlaubt, ermöglicht die Aussendung der Strahlen ausgehend von der Kamera in die Szene. Die Berechnungen der Strahlungswege erfolgen damit nur für die wirklich vom Detektor erfassten Strahlen, wodurch die Rechenzeit reduziert wird. Die Verfolgung der von der Kamera aus durch jedes Pixel einer Abbildungsebene in die Szene geschickten Strahlen erfolgt solange, bis sie kein Objekt mehr schneiden oder ein definiertes Abbruchkriterium (z.B. maximale Anzahl an Strahlungsinteraktionen) erreichen. Im Gegensatz zum Radiositätsverfahren ist das Raytracing daher blickpunktabhängig. Schneiden die Strahlen auf ihrem Weg zur Lichtquelle ein Objekt der Szene, so befindet sich deren Ausgangspunkt im Schatten. Falls das Pixel p nicht im Schatten liegt, errechnet sich dessen Strahlungsintensität L_p wie folgt:

$$L_p = E_i \rho_p \cos \theta_n, \quad 5-2$$

wobei E_i die Intensität der eintreffenden Strahlung, ρ_p der Reflexionsfaktor des Pixels p und θ_n der Winkel zwischen Zenit der Beleuchtungsrichtung und der Flächennormalen ist. Im Anschluss werden die Richtungen für die Reflexion und die Transmission ermittelt und neue Strahlen ausgesendet. Falls diese Strahlen wiederum ein Objekt schneiden, startet der Prozess von neuem. Ist die Verfolgung eines Strahls abgeschlossen, werden die berechneten lokalen Intensitäten entsprechend gewichtet aufsummiert und ergeben die Gesamtintensität des Pixels (Weidenbacher 2002).

Da das Raytracing in seiner ursprünglichen Form auf ideal spiegelnder Reflexion basiert, ist die Simulation global diffuser Strahlung, welche jedoch für die Simulation des Strahlungsverhaltens von Vegetationsbeständen einen wichtigen Faktor darstellt, nicht möglich. Die Kombination des Raytracing mit der Monte-Carlo-Methode, welche sich sehr gut zur Beschreibung des Streuverhaltens von Photonen eignet (Myneni et al. 1989), implementiert diese diffuse Wechselwirkung. Beim MCRT werden für jeden pro Pixel ausgesendeten Strahl, bei jedem Schnitt mit einem Objekt, mehrere Strahlen weiter verfolgt, die entweder spiegelnd reflektiert, transmittiert oder diffus gestreut werden. Die Auswahl der weiter zu verfolgenden Strahlen wird dabei stochastisch auf Basis einer Monte-Carlo-Simulation ermittelt, mit dem Ziel sich dem Integral der Rendergleichung (vgl. Formel 2-6) bestmöglich anzunähern. Je mehr Anfangsstrahlen definiert werden, desto realistischer nähert das Ergebnis die tatsächlichen Streuverhältnisse an. Beispiele für Simulationsverfahren basierend auf Raytracing sind *Flight* (North 1996),

RAYTRAN (Govaerts & Verstraete 1998), *Sprint 3* (Thompson & Goel 1998), *drat* (Lewis 1999), *DART* (Gastellu-Etchegorry et al. 2004) und *Rayspread* (Widlowski et al. 2006).

Radiositätsmodelle

Radiositätsverfahren sind in der Computergraphik, zur Berechnung der Verteilung von Wärme und Lichtstrahlung innerhalb virtueller Modelle sehr weit verbreitet und finden ebenfalls in der Modellierung von Bestandsreflexion Anwendung (Borel et al. 1991; Goel et al. 1991). Im Vergleich zu Strahlungstransfermodellen werden eingehende und austretende Strahlungsflüsse an diskreten Lambertschen Oberflächenelementen berücksichtigt und sind wie folgt formuliert:

$$L_i = E_i + x_i \sum_j F_{ij} L_j \quad i = 1, 2, \dots, N \quad 5-3$$

wobei

$$x_i = \begin{cases} \rho_{i \rightarrow j}(\vec{n}_i \cdot \vec{n}_j) < 0, \\ \tau_{i \rightarrow j}(\vec{n}_i \cdot \vec{n}_j) > 0 \end{cases} \quad 5-4$$

L_i – ist die effektive Strahlungsflussdichte, die eine Oberfläche i verlässt und wird in W/cm^2 angegeben. E_i beschreibt die Emission der Oberfläche, x_i ist der Oberflächenreflexions- oder Transmissionskoeffizient, abhängig von der relativen Orientierung (Normalenvektor \vec{n}) der Fläche i und j zueinander. F_{ij} ist der Form- oder „Blickfaktor“, der den Anteil der Strahlung beschreibt, den eine Fläche j verlässt und die Fläche i erreicht. N ist die Anzahl der zu berücksichtigenden Elemente. Die Radiositätsgleichung geht dabei von einer vollständigen Energieerhaltung aus, das bedeutet, dass die Strahlungsenergie, die ein Oberflächenelement i erreicht, gleich der Summe der emittierten, reflektierten und transmittierten Strahlung aller anderen Flächen ist (Gerstl & Borel 1992).

Ein Vorteil der Methode besteht darin, dass sobald die Lösung des Strahlungstransportes gefunden ist, die Bestandsreflexion für jeden beliebigen Blickwinkel bestimmt werden kann. Wenngleich die Möglichkeit der Verwendung verschiedener Beschleunigungsverfahren besteht, liegt eine Hauptbeschränkung dieser Methode in der zeitintensiven Berechnung der Blickfaktor Matrix und der Lösung des Strahlungstransportes. Unter anderem folgt daraus eine zwingende Aufteilung der Szene in Polygone, da im Gegensatz zum Raytracing keine analytisch definierten Primitive, wie etwa Kugeln oder Zylinder verwendet werden können. Die daraus resultierende hohe Anzahl von Primitiven führt, insbesondere bei sehr komplexen Szenen, zu sehr langen Rechenzeiten.

Eine Einschränkung für die Simulation realistischer Bestandsreflexionen besteht darin, dass in der Grundform der Radiositätsmodellierung nur die Simulation ideal diffuser

Reflexion möglich ist. Natürliche Strahlungsverhältnisse, die eine kombinierte direkte und diffuse Ein- und Ausstrahlung aufweisen, sind zwar möglich, jedoch kaum verbreitet, da derartige Bedingungen schneller und präziser mittels Raytracing gestützter Ansätze realisiert werden können (Gobbetti et al. 2003). Auf Radiosität basierende Verfahren zur Modellierung von Vegetationsbestandsreflexion sind z.B. *RGM* (Qin & Gerstl 2000) und *HYEMALIS* (Soler et al. 2003; Helbert et al. 2004).

5.2.4 Auswahl des Modellierungsverfahrens

Getreidebestände werden zumeist als homogene Pflanzenbestände betrachtet, deren Strahlungsverhalten sich mit einfachen Strahlungstransfermodellen realitätsnah nachbilden lässt. Bei näherer Betrachtung verschiedener Getreidearten wird jedoch schnell deutlich, dass der strukturelle Pflanzenaufbau das Reflexionsverhalten eines Bestandes stark beeinflusst. Form und Stellung der Blätter, sowie die Ausrichtung und Begrannung von Ähren können das Reflexionsverhalten eines Bestandes entscheidend prägen. Eine Abbildung durch einfache Strahlungstransfer- bzw. Geometrisch-Optische Modelle ist jedoch nicht möglich. Für die Modellierung realitätsnaher Bestandsreflexion und einer Bewertung des Einflusses bestandsstruktureller Parameter sind sie somit ungeeignet. Einzig die Computersimulationsmethoden ermöglichen die realitätsnahe Abbildung der geometrischen Eigenschaften eines Bestandes. Gegenüber den physikalisch basierten Modellen (Strahlungstransfermodelle, Geometrisch-Optische-Modelle, Hybridmodelle) erreichen sie wesentlich besser der Realität entsprechende Ergebnisse (Förster et al. 2010). Da bei der Simulation von Fernerkundungsdaten eine möglichst genaue Abbildung der globalen Strahlungsverhältnisse wünschenswert ist, wird für diese Arbeit das auf dem MCRT basierende Modell *drat* (aDvanced Radiometric rAy Tracer) von P. Lewis (Lewis 1999) ausgewählt, womit im Gegensatz zu Radiositätsmodellen sowohl diffuse als auch direkte Einstrahlung simuliert werden kann. Es fand bereits in zahlreichen Studien Anwendung (Disney et al. 1998; Lewis & Disney 1998; Lewis et al. 2003; Saich et al. 2003; Disney et al. 2006; Lewis & Disney 2007) die dabei aufzeigten, dass die Simulationsergebnisse sehr gute Übereinstimmungen sowohl zu anderen Modellen als auch zu Feldmessungen aufweisen. In Kapitel 5.4.2 wird dieses Modell ausführlich beschrieben.

5.3 Generierung von 4D-Pflanzenmodellen mit der Software AmapSim

Das MCRT zur Modellierung des Strahlungsverhaltens von Vegetationsbeständen ist in höchstem Maße von den dabei verwendeten Pflanzenmodellen abhängig. Es existiert eine Vielzahl verschiedener Ansätze komplexe organische Strukturen zu modellieren, wobei man sich grundlegend an unterschiedlichen Abstraktionsebenen orientieren kann. Es wird dabei von einzelnen Individuen ausgegangen, die sich zu Pflanzengesellschaften zusammenfügen. Je nach Abstraktionsniveau können entweder Einzelpflanzen modelliert werden um geometrische Details in den Vordergrund zu rücken, oder statistische Ansätze Verwendung finden, die Eigenschaften wie z.B. die Abschattungsverhältnisse hervorheben (Deussen & Lintermann 2005). Zur Bewertung bestandsgeometrischer Einflüsse auf das Reflexionssignal eines Bestandes, die in dieser Arbeit im Mittelpunkt stehen, bietet sich die Modellierung der Bestandsreflexion unter Verwendung von 4D-Einzelpflanzenmodellen an.

Die vielfältigen Ansätze zur Modellierung organischer Strukturen, die sich in den letzten Jahrzehnten herausbildeten, können nach Deussen & Lintermann (2005) in regelbasierte und prozedurale Verfahren differenziert werden. Da für die Simulation der 4D-Pflanzenmodelle das auf der prozeduralen Modellierung basierende Programm AmapSim Anwendung findet, wird auf die regelbasierte Modellierung nicht näher eingegangen. Nähere Informationen zum bedeutendsten regelbasierten Verfahren, die von A. Lindenmayer in den L-Systemen formalisiert wurden, finden sich in Standardwerken zur Pflanzenmodellierung von Prusinkiewicz & Lindenmayer (2004) sowie Deussen & Lintermann (2005).

In der vorliegenden Arbeit werden drei der bedeutendsten Wintergetreidearten Deutschlands Winterweizen, Wintergerste und Winterroggen modelliert, die zur Familie der Gräser (Poaceae) gehören und sich in Wurzel, Sprossachse, Blatt und Fruchtstand gliedern. Für die Simulation der Bestandsreflexion sind lediglich die oberirdischen Pflanzenbestandteile relevant, deren Modellumsetzung in den folgenden Abschnitten erläutert wird.

5.3.1 Prozedurale Modellierung

Die prozeduralen Verfahren nutzen im Gegensatz zu den regelbasierten Methoden parametrisierbare Algorithmen zur Generierung eines Pflanzenmodells. Fast alle festzulegenden Pflanzeigenschaften werden durch Variablen beschrieben, die durch den Anwender definiert werden. Ein Beispiel eines sich an botanischen Wachstumsregeln orientierenden Ansatzes stellt das AMAP (*Atelier pour la Modélisation de l'Architecture des Plantes*) von de Reffye et al. (1988) dar. Die grundlegende Struktur der Regeln des Ansatzes basiert auf der Aktivität von Knospen, deren Entwicklung unterschiedlich verlaufen kann (de Reffye et al. 1991):

- ❖ Ruhender Zustand,
- ❖ Entwicklung zu Blüten und anschließendes Absterben,
- ❖ Entwicklung in ein Ast- oder Stamminternodium, an dem seitliche Knospen mit Blättern auftreten können und an dessen Ende eine neue an der Spitze befindliche Knospe gebildet wird,
- ❖ Absterben.

Die Genese ist dabei an diskrete Zeitschritte und vordefinierte Wahrscheinlichkeiten gekoppelt, welche der potenziellen Entwicklungen einer Knospe schlussendlich eintritt. Eine Besonderheit dieses Modells ist die enge Bindung an botanische Entwicklungsregeln, welche in diesem nachempfunden werden. Zudem integriert es ein physikalisches Modell, welches die Biegung von Pflanzenelementen aufgrund des Eigengewichts berücksichtigt. Das AMAP-Modell ist auf alle Arten von Vegetation anwendbar und kann sowohl überirdische Nachbildungen der Pflanzen, als auch eine Modellierung des Wurzelraums umsetzen.

Ein Nachteil des AMAP-Systems besteht darin, dass das stochastische Wachstumsmodell lediglich die Entwicklung einer spezifischen Pflanze und bestimmte Wachstumsbedingungen nachbildet. Darüber hinaus kann für die geometrische Beschreibung der Pflanzen nur auf eine Bibliothek vordefinierter Formen, die skaliert, rotiert, oder gestreckt/gestaucht werden können, zurückgegriffen werden um die Phytoelemente zu beschreiben.

Trotz dieser Einschränkungen stellt das AMAP-Modell ein leistungsfähiges Werkzeug im Bereich der Pflanzenmodellierung dar, wobei speziell die Anwendung botanischer Wachstumsregeln einzigartig ist (Lewis & Disney 1998). Aus diesem Grund wird es in dieser Arbeit für die Erstellung der Pflanzenmodelle verwendet. Die Modellierung der Pflanzen wurde mit der Schaffung einer graphischen Oberfläche im Zuge der Entwicklung des Programmes AmapSim (Barczi et al. 2008) deutlich verbessert und unterliegt ständiger Weiterentwicklung.

5.3.2 Grundlagen des AmapSim Modells

Die Modellierung der Pflanzen setzt genaue Kenntnisse über deren Form und die Entwicklung voraus. Die hierfür notwendigen Daten über Form und Lage der zu modellierenden Pflanzenbestandteile sind in mehrjährigen Felduntersuchungen erhoben worden. Eine detaillierte Aufstellung der erfassten Parameter und Werte ist in Anhang C beigefügt.

Die Generierung der in dieser Arbeit verwendeten Pflanzenmodelle erfolgt mit dem Programm AmapSim (Barczi et al. 2008), welches auf dem AMAP-Modell (siehe 5.3.1) von de Reffye et al. (1988) basiert. Es kombiniert ein strukturelles Pflanzenwachstumsmodell, basierend auf botanischen Grundsätzen und Parametern, mit der Simulation der Pflanzenmorphogenese, um akkurate komplexe und detaillierte Pflanzenmodelle zu gene-

rieren. Grundsätzlich wird die Entwicklung von Knospen beschrieben d.h. apikaler oder lateraler Meristeme² als potenzielle Verzweigungspunkte, an denen sich Blätter, vegetative Knospen und Blüten entwickeln können und Internodien als Bereiche, in denen das Längenwachstum stattfindet.

Die Anwendungsmöglichkeiten des Programms sind nicht auf bestimmte Pflanzenarten oder Pflanzenbereiche begrenzt. Sie reichen von Kräutern, über landwirtschaftliche Kulturen bis hin zu komplexen Bäumen, inklusive kompletter Wurzelsysteme. Die Spezies Weizen, Gerste und Roggen werden im Rahmen dieser Arbeit, nach Kenntnisstand des Verfassers, erstmalig modelliert.

Generell wird der strukturelle Aufbau der Pflanzenmodelle in AmapSim durch die Topologie der Pflanze beschrieben. Die Strukturierung in Referenzachsen und die Definition der Lage zueinander erlaubt eine Parametrisierung von Zuständen einzelner Phytoelemente durch die Kenngröße „Physiologisches Alter“. Ein Trieb einer Getreidepflanze kann durch mehrere aufeinander aufbauende Referenzachsen gebildet werden, die wiederum in kleinere Wachstumseinheiten unterteilt werden können. Abb. 5-5 zeigt die Einteilungsmöglichkeiten für Referenzachsen (Ähre bzw. Blatt) am Beispiel einer modellierten Winterroggenpflanze. Die Elemente eines jeden physiologischen Alters, d.h. einer Referenzachse werden stets zeitgleich angelegt und weisen einheitliche Eigenschaften auf.

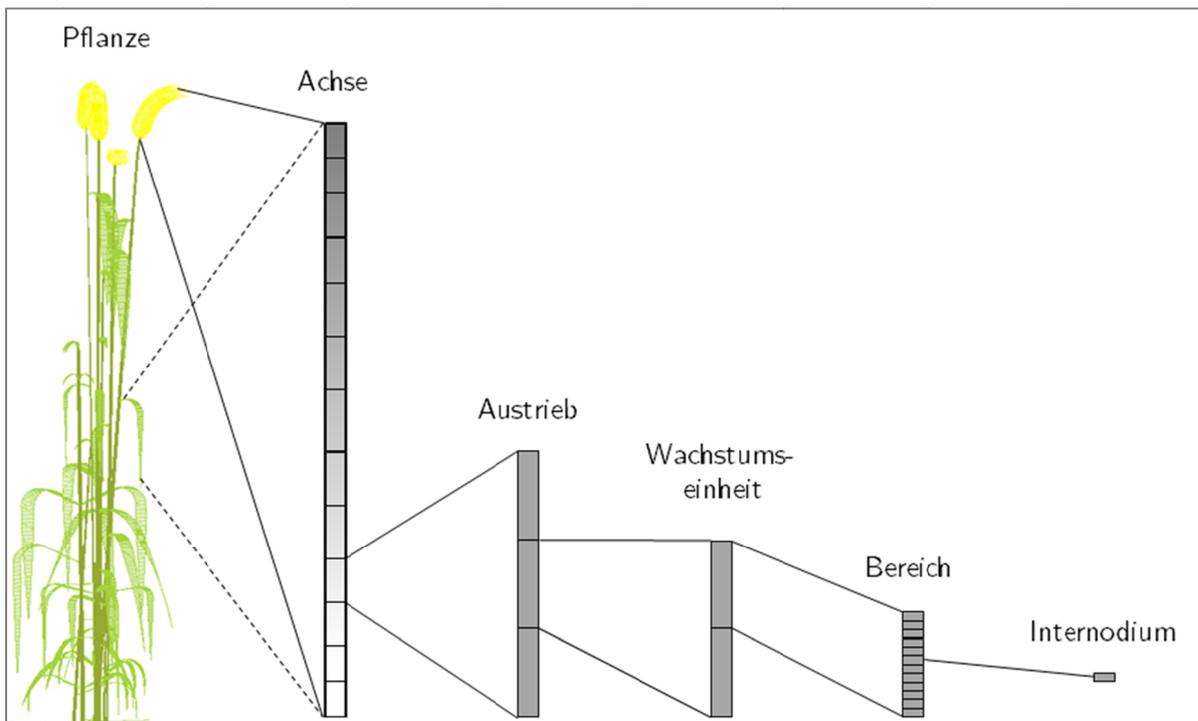


Abb. 5-5: Schematische Darstellung der axialen Aufteilung und dessen Aufgliederung.

² Zone des Blattwachstums

Das Erscheinungsbild der modellierten Pflanze ist maßgeblich durch den Grad der Verzweigung bestimmt, der beschreibt, wie viele Achsen höherer Ordnung gebildet werden dürfen. Abb. 5-6 zeigt den Einfluss der Anzahl zulässiger Verzweigungen auf. Während im ersten Fall keinerlei Seitentriebe ausgebildet werden, steigt die Anzahl möglicher Seitentriebe mit der Verzweigungsordnung. Die 3D-Getreidepflanzenmodelle können mittels einer Verzweigung 2. Ordnung beschrieben werden. Die Modellierung komplexerer Pflanzen, wie Bäume, erfordert eine Erhöhung der Verzweigungsordnung, um eine Unterteilung in z.B. Stamm, Ast, Zweig und Blatt zu realisieren.

Das Wachstum der Pflanzen wird durch äußere Umwelteinflüsse bestimmt und kann in unterschiedlichen Geschwindigkeiten verlaufen. Zur Einbeziehung dieser botanischen Grundsätze wird die Steuerung der Entwicklung entlang der Referenzachsen durch die Implementierung von semi-Markow-Ketten (Guedon et al. 2001) realisiert. Diese ermitteln die Wahrscheinlichkeit des Eintretens zukünftiger Ereignisse, wobei im Unterschied zu einem Markow-Prozess die Verweildauer eines Zustandes durch einen weiteren stochastischen Prozess geregelt wird. Die Dauer des Übergangs von einem zum nächsten Wachstumsereignis ist an definierte Werte gekoppelt. Diese Regeln werden für alle Elemente eines physiologischen Alters gleich angewandt.

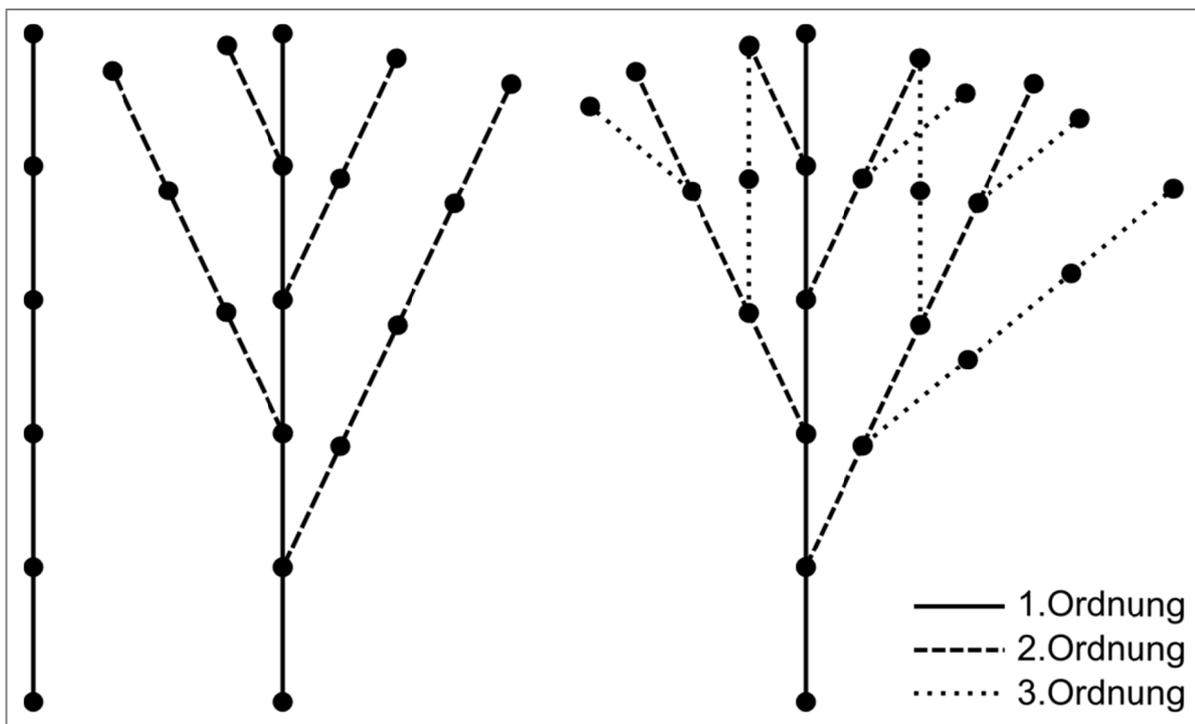


Abb. 5-6: Einfluss des zulässigen Verzweigungsgrades auf den Modellaufbau.

Aufbauend auf der zeitlichen und strukturellen Einteilung der Pflanzen in Referenzachsen eines bestimmten physiologischen Alters erfolgt die topologische Definition der Lage der Achsen zueinander. Dies bildet das Grundgerüst für die Modellierung eines Individuums und beschreibt neben der Lage auch die Proportionen der Pflanzenbestandteile. Die optische Form wird durch die Überlagerung des topologischen Gerüsts mit Flächen oder Körpern erzielt, wodurch die Pflanze realitätsnah 3D nachgebildet wird. Im Falle

der erstellten Getreidearten werden die stängelbildenden Referenzachsen aus 5-seitigen Prismen aufgebaut und Blätter durch jeweils 100 aufeinanderfolgende Trapeze beschrieben. Neben dem geometrischen Aufbau der Pflanzenelemente wird deren Form zusätzlich durch materialspezifische Eigenschaften bestimmt. Häufig bestehen die verwendeten Phytoelemente aus aneinandergereihten Einzelementen (Wachstumseinheiten), wodurch eine Krümmung des Gesamtorgans durch dessen Eigengewicht modelliert werden kann. Aber auch Begradigungen, die sehr oft am Ende orthotroper Achsen auftreten, werden nach empirischen Regeln einbezogen. Die initiale Ausrichtung einer Achse wird durch die Phyllotaxis³ und den Austrittswinkels im Bezug zur übergeordneten Achse definiert.

Die Größe eines Pflanzenelementes ist durch die initiale Länge und Breite, bzw. Durchmesser des kleinsten darin vorhandenen Teilelements definiert. Diese zwei Parameter können sich in Abhängigkeit von definierten Wachstumsregeln verändern. Der Wert jedes Parameters kann sich sowohl mit dem physiologischen Alter ändern, aber auch unterschiedliche Werte innerhalb einer Achse annehmen. Diese Strategie ermöglicht die Kontrolle der Geometrie sowohl in zeitlicher als auch axialer Richtung.

Das empirische geometrische Pflanzenmodell enthält jedoch keine komplexen Verformungsstrukturen oder Wachstumserscheinungen wie Heliotropismus⁴. Spezielle Pflanzencharakteristika müssen über externe Module (Abb. 5-7) realisiert werden, die der eigentlichen Modellierung nachgeschaltet sind. Im Fall der modellierten Getreidepflanzen sind komplexe Anpassungen notwendig, um eine natürliche Pflanzenentwicklung zu realisieren. Diese werden in den folgenden Abschnitten erläutert. Dazu gehört die oft vorhandene Torsion des Blattes um die eigene Achse in frühen Wachstumsstadien, die durch ein späteres Abknicken der Blätter wieder teilweise bis vollständig aufgehoben wird. Weiterhin geht in Verbindung mit der Austrocknung der Pflanze ein Zusammenrollen der Blätter einher, was eine Verringerung des LAI mit sich bringt. Die Größenänderungen werden mittels eines nachgeschalteten Moduls realisiert, um eine Reduzierung der Breite und Länge der blattbildenden Elemente zu ermöglichen, da in der Standardsoftware Größenänderungen nur in eine Richtung variierbar sind.

³ Blattstellung von Pflanzen, im Falle von Getreide handelt es sich um eine wechselständige Anordnung

⁴ Ausrichtung der Pflanze zur Sonne

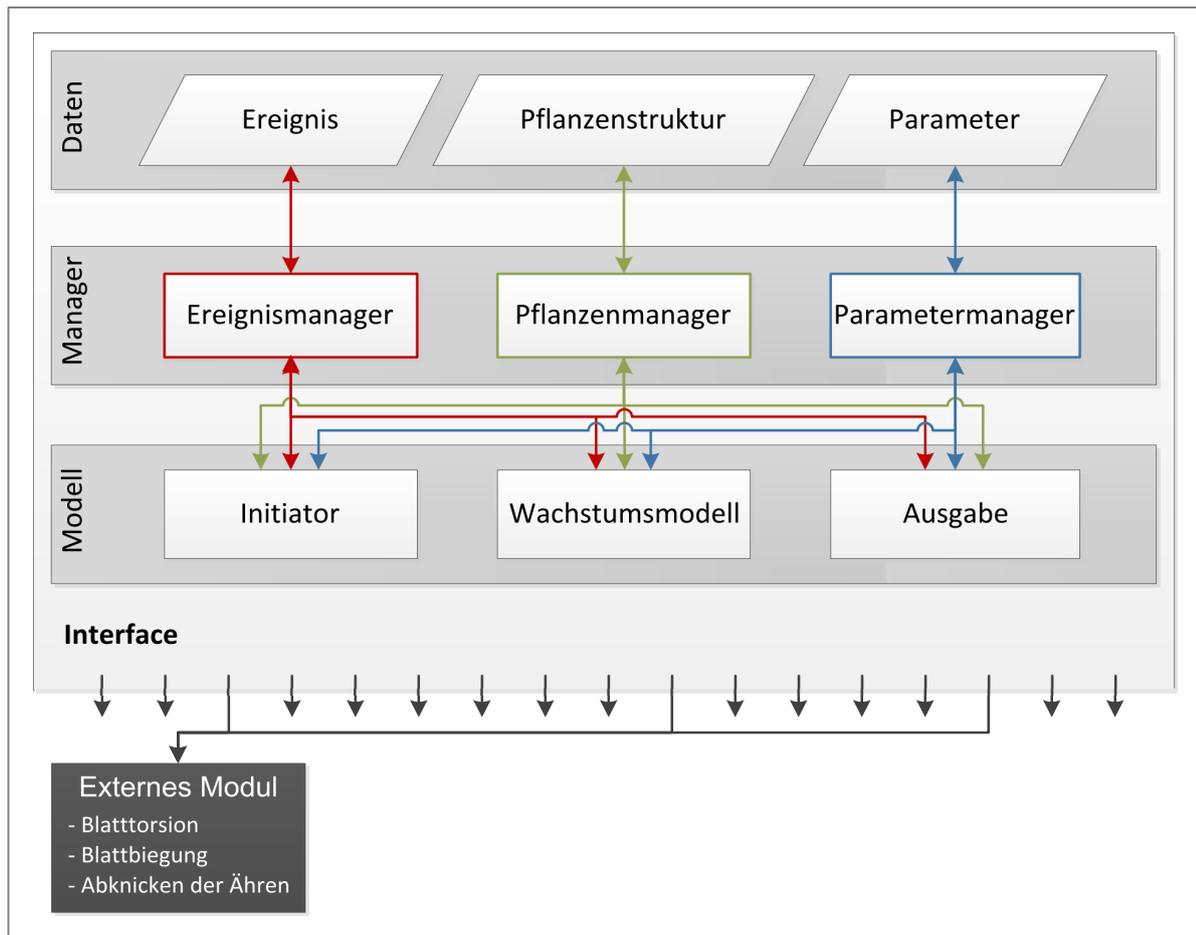


Abb. 5-7: Einbindungsmöglichkeit externer Module in das Programm AmapSim (verändert nach Barczy et al. 2008).

5.3.3 Biologischer, topologischer und geometrischer Aufbau der Pflanzenmodelle

Die Botanik besitzt ein sehr großes Spektrum an Theorien und Beschreibungsformen, von denen für die Beschreibung der Pflanzengeometrie nur ein vergleichsweise kleiner Ausschnitt benötigt wird. Zumeist kommt es in der 3D-Modellierung auf die Erfassung der Pflanzengestalt und deren geometrischen Gesetzmäßigkeiten an. Aus diesem Grund erfolgt die Definition einer Pflanze primär aus rein morphologischer Sichtweise der Botanik. Wie stark dabei abstrahiert wird, ist wiederum durch die spätere Anwendung bestimmt. Bei nachfolgenden funktionellen Betrachtungen, wie z.B. Stoffflüssen, müssen funktionale Gesichtspunkte ebenfalls berücksichtigt werden. Ein Überblick über die Zusammenhänge von Funktion und Pflanzenstruktur und weiteren botanischen Grundlagen findet sich in den Standardwerken der Botanik (Raven et al. 2000; Lüttge et al. 2002; Bresinsky et al. 2008). Nachfolgend wird der Aufbau der für die Modellierung verwendeten Phytoelemente im Hinblick auf Topologie, Geometrie und Wachstumsverhalten beschrieben.

Wurzel

Eine reale Nachbildung des Wurzelsystems ist für die Fragestellung der Arbeit nicht notwendig und daher in die Modelle nicht integriert. Das virtuelle Wurzelsystem dient lediglich der Definition der Anzahl und Lage der Sprossachsen einer Pflanze. Bis zu acht Halme (Physiologisches Alter eins bis acht) können pro Pflanze ausgebildet werden, deren Lage auf einer Kreisebene durch den Abstand zum Mittelpunkt und einen Winkel bestimmt wird (Abb. 5-8). Zusätzlich ist der Austrittswinkel und die Orientierung des Halmes entlang seiner Längsachse definiert, wodurch jeder Halm eine eigene Wuchsrichtung aufweist.

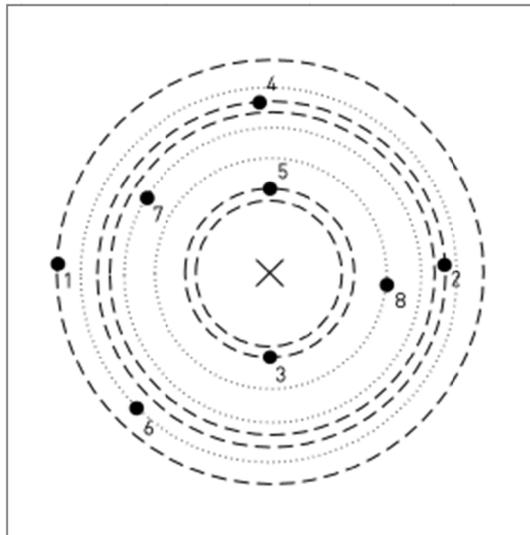


Abb. 5-8: Topologischer Aufbau des "Wurzelsystems".

Sprossachse

Die aus dem virtuellen Wurzelsystem austretenden Referenzachsen bilden die Sprossachsen. Der Halm ist bei Pflanzen aus der Familie der Poaceae (Süßgräser) zumeist rund und innen hohl. Er gliedert sich in Nodien (Knoten), die meist hart und verdickt sind, und Internodien, der Halm zwischen den Nodien. Er ist beblättert und unverzweigt. Das Meristem ist bei den Poaceae nahe der Erdoberfläche. Somit werden die Triebe von unterschiedlich alten Blättern umgeben.

Die bis zu acht Sprossachsen der Pflanzenmodelle gliedern sich in jeweils neun Internodien, an denen oberhalb dieser Knotenpunkte die Blätter und im obersten Abschnitt die Ähre ansetzen. Das physiologische Alter dieser Pflanzenteile liegt im Bereich $x1 - x9$ ($x =$ Sprossnummer) (siehe Abb. 5-9). Das Internodium zwischen oberstem Blatt und Ähre (Physiologisches Alter $x9$) gliedert sich zusätzlich in 20 Wachstumseinheiten, die eine Krümmung dieses Elementes zulassen. Das Abknicken der Ähren mit zunehmendem Gewicht ist durch ein nachgeschaltetes Modul realisiert. Nach einem definierten Entwicklungsalter der Pflanze erfolgt über einen festgelegten Zeitraum eine Änderung des Winkels von x Elementen einer Achse bis zu einem definierten Endwinkel.

Die Geometrie des Halmes wird durch fünfseitige Prismen beschrieben. Jeder Halm ist schlussendlich durch 28 übereinander befindliche Prismen unterschiedlichen Durchmessers aufgebaut. Der Durchmesser variiert zwischen vier Millimeter am Grund bis zu nur einem Millimeter am Ansatz der Ähre. Eine Verdickung des Halmes im Bereich der Knoten ist in das Modell nicht implementiert. Eine natürliche Biegung des gesamten Halmes ist durch Definition der Materialstärke möglich. Der Halm stellt die 1. Ordnung des Pflanzenwachstums dar und bildet damit die Basis für die sich daraus verzweigenden Blätter.

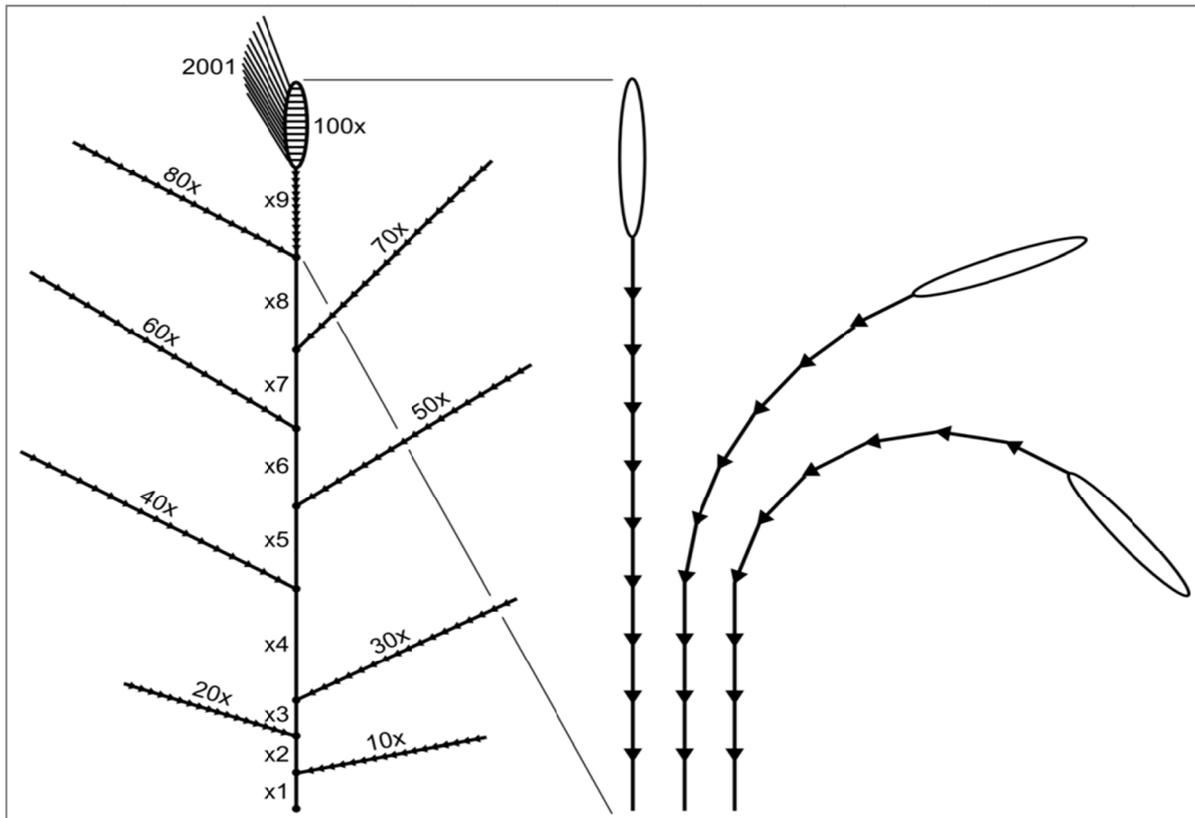


Abb. 5-9: Aufbau einer AmapSim modellierten Getreidepflanze mit physiologischem Alter der Pflanzenbestandteile (Wert x = Sprossnummer) und Krümmungsschema durch Gewichtszunahme der Ähre.

Blätter

Die Getreideblätter sind wechselständig angeordnet und die Form der Blattspreite ist linealisch, d.h. schmal und viel länger als breit mit mehr oder weniger parallelen Rändern (Rothmaler 1999). Die an den Nodien des Halmes abzweigenden Blätter besitzen physiologische Alter zwischen 10x und 80x (siehe Abb. 5-9). Jedem Blatt ist dabei ein spezifisches physiologisches Alter zugeordnet, wodurch eine separate Parametrisierung der Blätter ermöglicht wird. Ein Blatt ist in jeweils 100 Wachstumseinheiten unterteilt, wodurch Formveränderungen des Blattes bei vergleichsweise geringer Komplexität nachempfunden werden können. Die Blätter einer Pflanze unterscheiden sich in Form und Größe voneinander, um eine natürliche Variabilität innerhalb eines Individuums nachzuempfinden (vgl. Abb. 5-10). Die Form des Blattes wird mit Hilfe 100 aufeinander-

folgender trapezförmiger Flächen beschrieben. Die Länge der Elemente ist durch die initial definierte Länge von 0,01 mm und einem Wachstumsfaktor in Abhängigkeit der Wachstumszeit definiert.

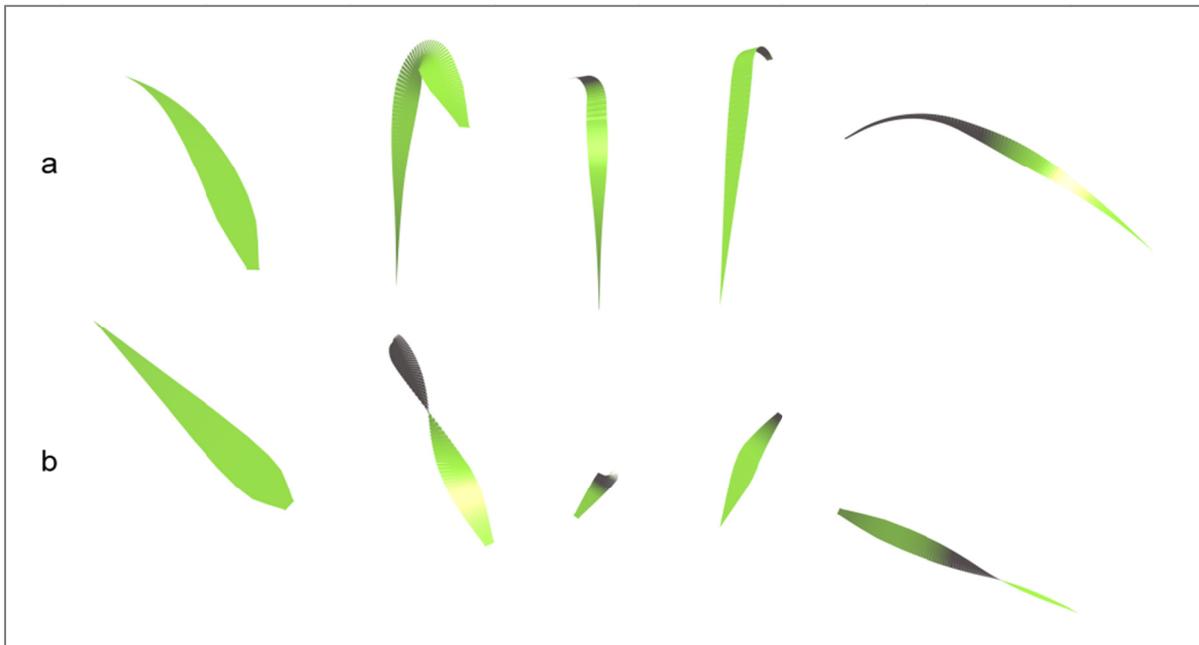


Abb. 5-10: Beispielfähige Darstellung genutzter Blattgeometrie von der Seite (a) und von oben (b) gerendert mit Blender.

Eine Übersicht der verwendeten Blattlängen der modellierten Getreidearten befindet sich im Anhang C. Typischerweise biegen sich die Blätter von Getreide nicht nur aufgrund des Eigengewichtes, was innerhalb der Software umzusetzen ist, sondern weisen zusätzlich Verdrehungen auf. Hierfür wurde ein nachgeschaltetes externes Modul entwickelt, welches in Abhängigkeit festgelegter Zeitintervalle und Verdrehungswinkel ein natürliches Erscheinungsbild der Blätter realisiert.

Blütenstände und Fruchtstände

Die Blütenstände der simulierten Getreidespezies sind aus Ährchen aufgebaut und sind ihrerseits zu Ähren angeordnet. Im Falle von Roggen und Gerste sind die Spelzen begrannt (borsten- oder fadenförmiger starrer Fortsatz am Ende des Phytoelements). Die Ähren werden durch die physiologischen Alter 100x und 110x (siehe Abb. 5-9) beschrieben und sind jeweils aus 30 Wachstumseinheiten aufgebaut, die mit fünfseitigen Prismen überlagert sind und an deren Übergängen sich die Ansatzpunkte der Grannen (physiologisches Alter 2001) befinden. Diese bestehen aus jeweils zehn hintereinander angeordneten Prismen. Ähren und Granne zeichnen sich gleichermaßen durch eine gewisse Elastizität aus, wodurch leichte Krümmungen der Phytoelemente hervorgehen und damit eine realitätsnahe Form erzielt wird. Die Ähren können in den Modellen in Größe und Form variieren. Die Abb. 5-11 zeigt die modellierten Ähren für Wintergerste (a), Winterroggen (b) und Winterweizen (c). Die Ähren unterschieden sich in Länge,

Durchmesser und insbesondere in der Länge und Stellung der Begrannung. Die Grannen der Wintergerste besitzen eine Länge von ca. 9 cm und die des Winterroggens von ca. 5 cm bei einem Durchmesser von 0,5 mm. Die Ähren des modellierten Weizens sind unbegrannt.

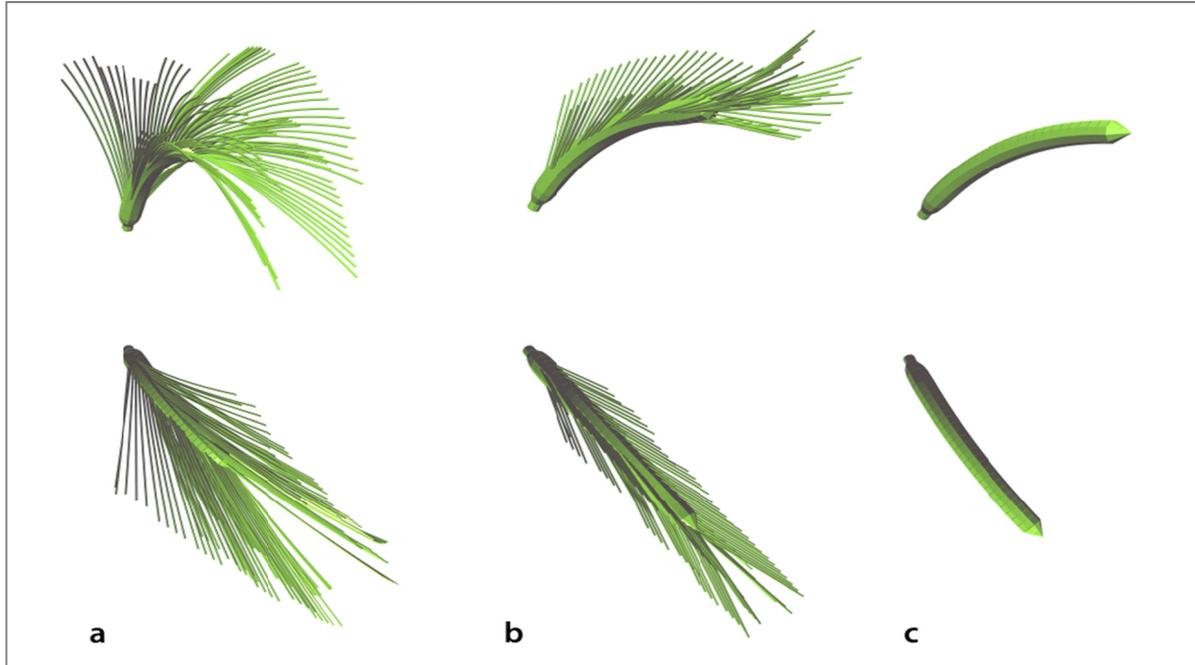


Abb. 5-11: Ährengometrie von Gerste (a), Roggen (b) und Weizen (c) im BBCH Makrostadium 8 mit Blick von der Seite (oben) und von oben (unten).

5.3.4 Wachstumsmodellierung

Jede Wachstumseinheit eines Phytoelements ist durch eine initiale Größe gekennzeichnet. In AmapSim kann, ausgehend von einem definierten Startzeitpunkt, die Größe der Elemente innerhalb eines festgelegten Zeitraums durch die Definition eines Skalierungsfaktors variiert werden. Die Größenänderung erfolgt jedoch nur in eine Richtung, sodass ein durch Austrocknung bedingtes „Schrumpfen“ der Blattfläche über ein nachgeschaltetes Modul realisiert wird. Auf der Basis der maximalen Blattausdehnung sind hierfür Änderungsfaktoren für Länge und Breite zu definieren, die eine Reduktion der Blattdimension über einen festgelegten Zeitraum ermöglichen. Das Wachstum der Pflanzenmodelle lässt sich im derzeitigen AmapSim Modellaufbau in 450 geometrisch unterschiedliche Stadien unterteilen, was ca. zwei Modellen pro Wachstumstag entspricht. Eine Differenzierung dieser hohen Anzahl von Wachstumsstadien mittels Fernerkundungsdaten ist jedoch nicht realisierbar, sodass eine Aggregation auf sinnvoll voneinander zu differenzierende Wachstumsstadien notwendig wird. Die Basis für diese Einteilung bildet dabei die BBCH Skala. Da eine Vielzahl der BBCH-Stadien optisch nicht unterscheidbar sind, weil sich diese z.B. am Reifegrad des Kornes bemessen, werden die Entwicklungsstadien auf 14 sich strukturell und optisch unterscheidbare Simulationsstadien zusammengefasst. Die Einteilung der modellierten Stadien in Bezug auf die BBCH Skala ist in Abb. 5-12 dargestellt. Zumeist splitten sich die Makrostadien in zwei modellierte Stadien. Die Phase des späten Schossens und des Äh-

ren- und Rispschwellens ist jedoch zusammengefasst, da die Felderhebungen keine optischen Unterschiede aufzeigten und sich die Stadien pflanzenstrukturell lediglich durch die Entwicklung der Ähre im Inneren des Stängels unterscheiden. Das Stadium der Totreife zeichnete sich hingegen durch sichtbare Variationen der Pflanzenstruktur aus, die auf eine Reduzierung der Blattfläche aufgrund fortschreitender Austrocknung und durch Abbrechen zurückzuführen sind, und ist daher in drei Modellierungsphasen unterteilt.

Die Ergebnisse der AmapSim Pflanzensimulation sind für die gewählten Simulationsstadien in den Abb. 5.13 bis 5.15 für die drei Spezies Winterroggen, Wintergerste und Winterweizen dargestellt. Jedes Simulationsstadium kann dabei bis zu 35 unterschiedliche Entwicklungsphasen umfassen, wobei fließende Übergänge zu angrenzenden Simulationsstadien entstehen können. Die nachfolgend abgebildeten Pflanzenmodelle stellen innerhalb der Wachstumsphase einen mittleren Entwicklungsstand dar.

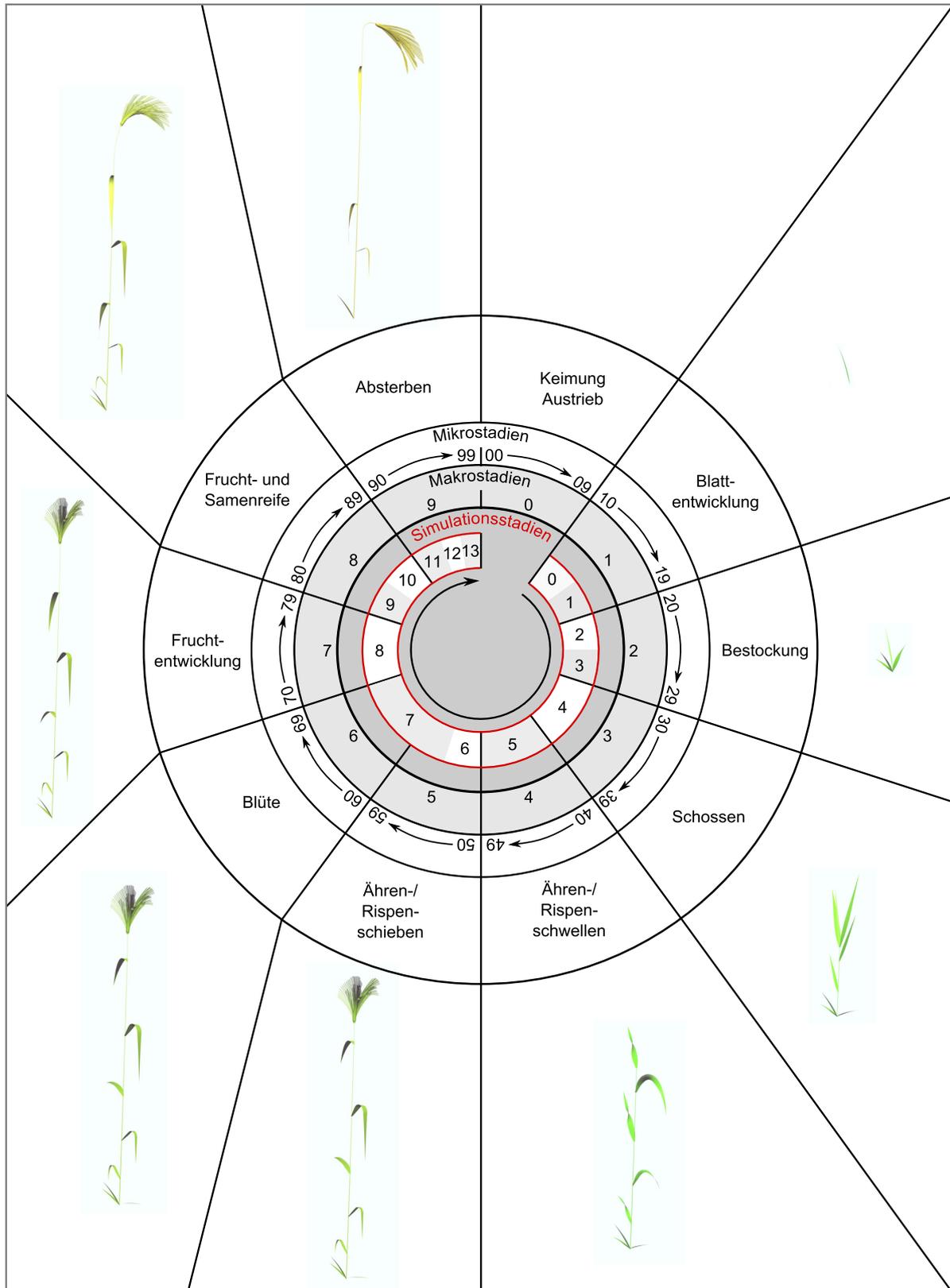


Abb. 5-12: Einteilung des Entwicklungszyklus von Getreidepflanzen in Makro- und Mikro-stadien nach BBCH Skala (verändert nach Meier 2001) und der entsprechenden Simulationstadien.

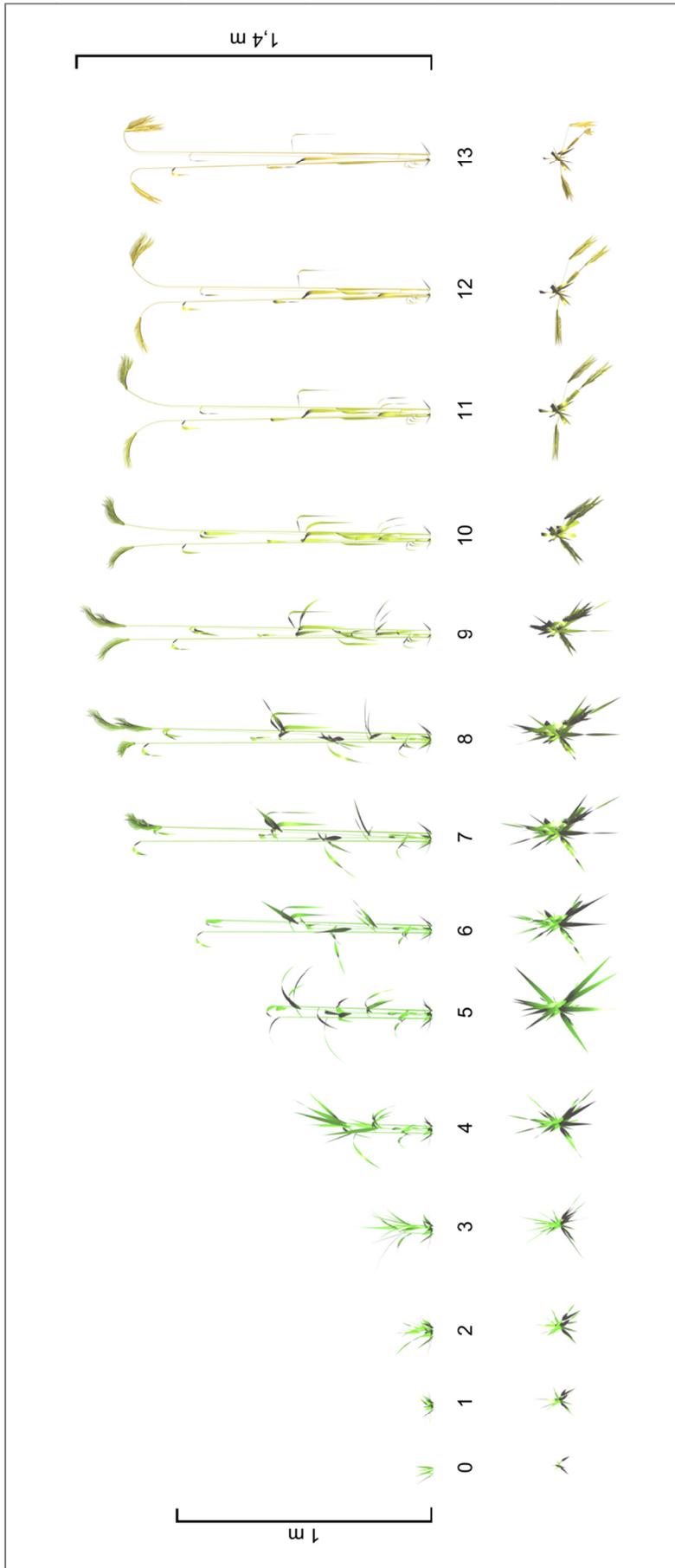


Abb. 5-13: Modellierungsergebnisse für Winterroggen in den gewählten Simulationsstadien (oben - Seitenansicht, unten - Draufsicht).

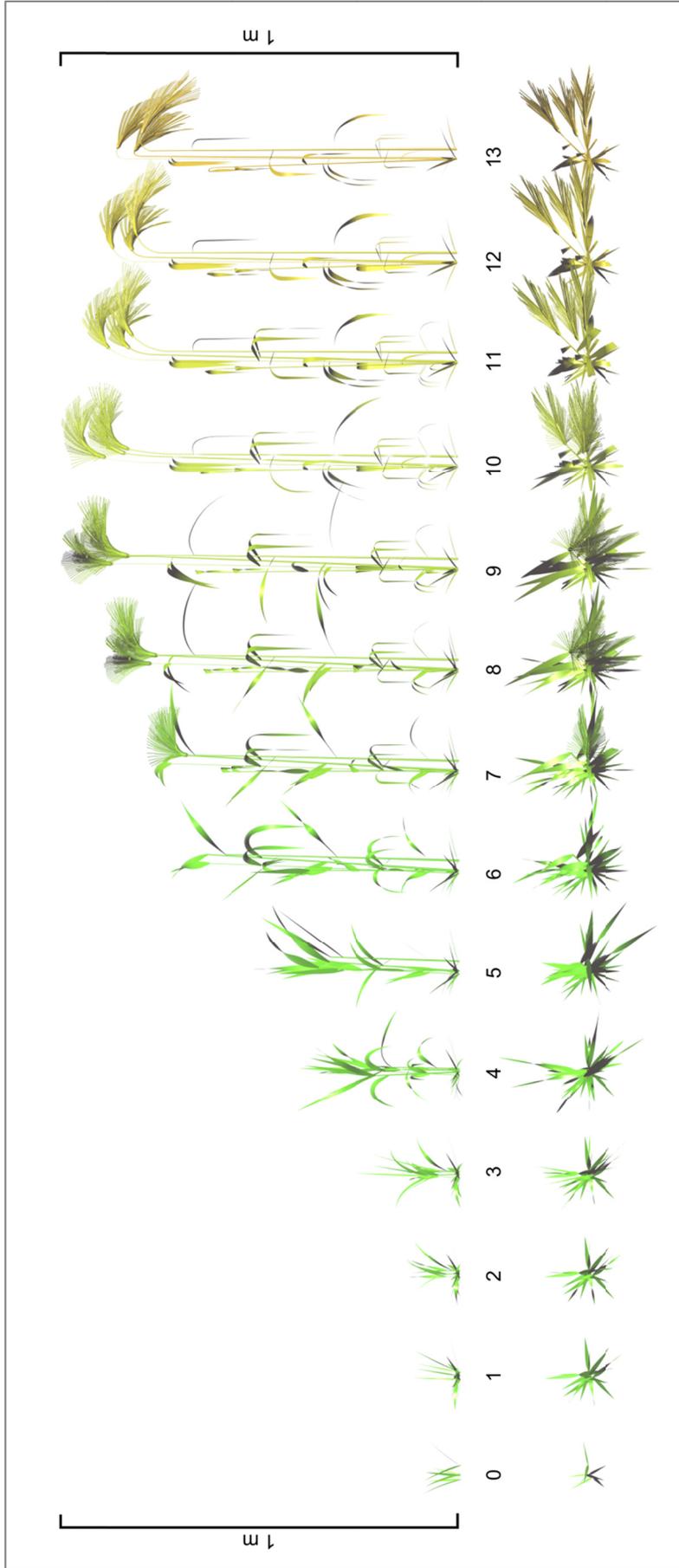


Abb. 5-14: Modellierungsergebnisse für Wintergerste in den gewählten Simulationsstadien (oben - Seitenansicht, unten - Draufsicht).

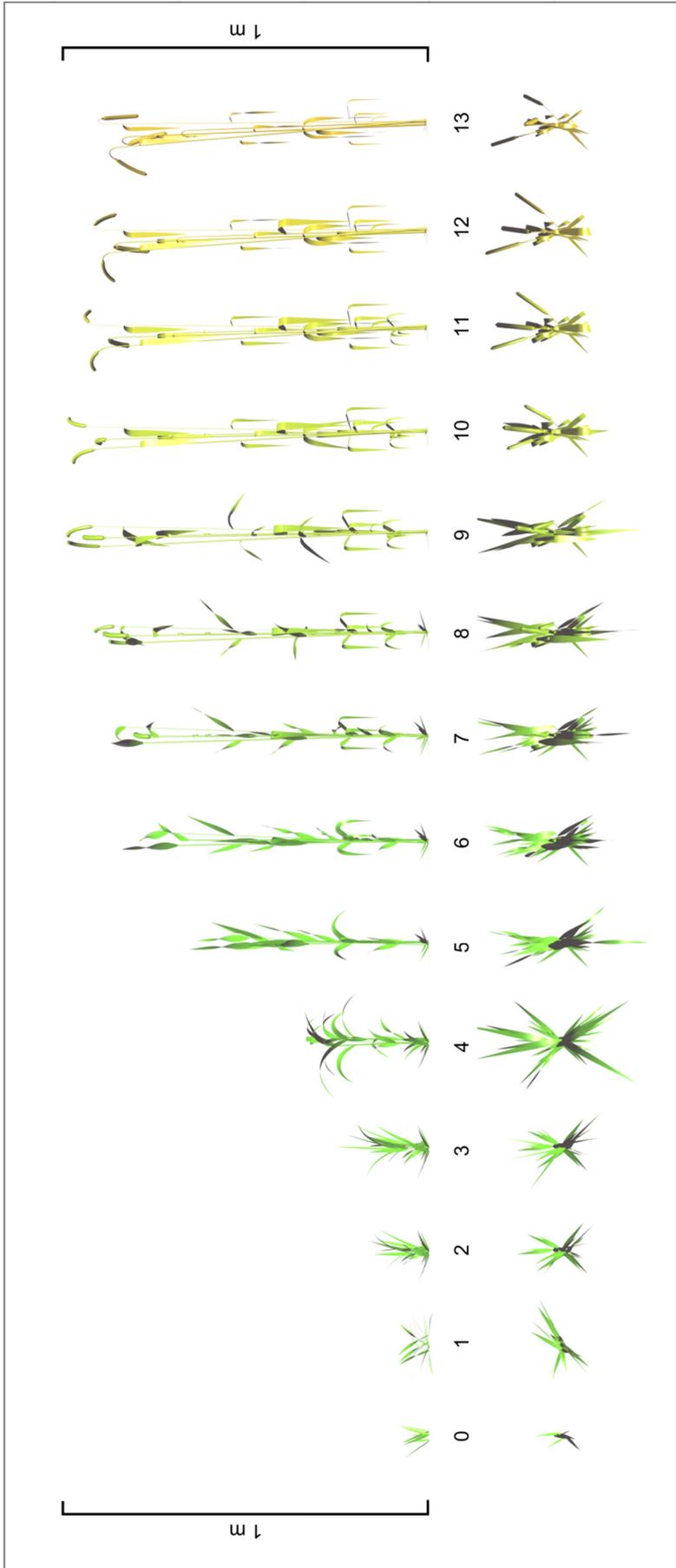


Abb. 5-15: Modellierungsergebnisse für Winterweizen in den gewählten Simulationsstadien (oben - Seitenansicht, unten - Draufsicht).

5.3.5 Optimierung der Pflanzenmodelle für das Raytracing

Alle Bestandteile der mit AmapSim modellierten Pflanzenmodelle werden aus zusammengesetzten Polygonen aufgebaut. Ausgehend von der Zusammensetzung aus 5-seitigen Prismen setzt sich jede Ähre des unbegrannten Winterweizens aus 150 Einzelflächen zusammen. Im Gegensatz werden die Ähren von Gerste und Roggen aufgrund der vorhandenen Grannen, die wiederum aus jeweils 50 Flächen gebildet werden, aus 650 Einzelflächen aufgebaut. Dieser polygonale Aufbau der Pflanzen führt schnell zu einer sehr hohen Polygonanzahl pro Pflanzenmodell, die mit der Rechenzeit des Raytracing korreliert. Um die Rechenzeit zu optimieren, werden alle aus Prismen gebildeten Objekte, im Zuge der Integration der Einzelpflanzen zu einem Gesamtbestand, durch Zylinder ersetzt, deren Verwendung im Raytracing möglich ist. Darüber hinaus werden die blattbildenden Trapezflächen trianguliert und sofern möglich zusammengefasst. Dadurch können, wie am Beispiel Wintergerste in der Tab. 5-1 deutlich wird, die Teilflächen pro Pflanzen deutlich reduziert werden.

Tab. 5-1: Reduzierung der Polygonzahl eines Pflanzenmodells am Beispiel der Wintergerste.

Simulations- stadium	AmapSim Polygonanzahl	Raytracing Polygonanzahl
1	~ 12.000	~ 3.500
2	~ 18.500	~ 4.000
3	~ 22.000	~ 7.900
4	~ 32.000	~ 10.700
5	~ 35.500	~ 11.900
6	~ 80.000	~ 14.700
7	~ 212.000	~ 22.500
8	~ 210.000	~ 21.500
9	~ 208.000	~ 21.000
10	~ 207.000	~ 20.700
11	~ 205.000	~ 20.300
12	~ 199.000	~ 18.000
13	~ 197.000	~ 18.800

5.4 Modellierung des Strahlungsverhaltens von Getreidebeständen

Zur Modellierung des Strahlungsverhaltens eines Getreidebestandes müssen die erzeugten 3D-Pflanzenmodelle mit optischen Eigenschaften kombiniert und im Raum zu einem Bestand angeordnet werden. Darauf aufbauend erfolgt die Modellierung des Strahlungsverhaltens. Die dazu notwendigen Modellbestandteile und Arbeitsschritte sind in der Abb. 5-16 dargestellt.

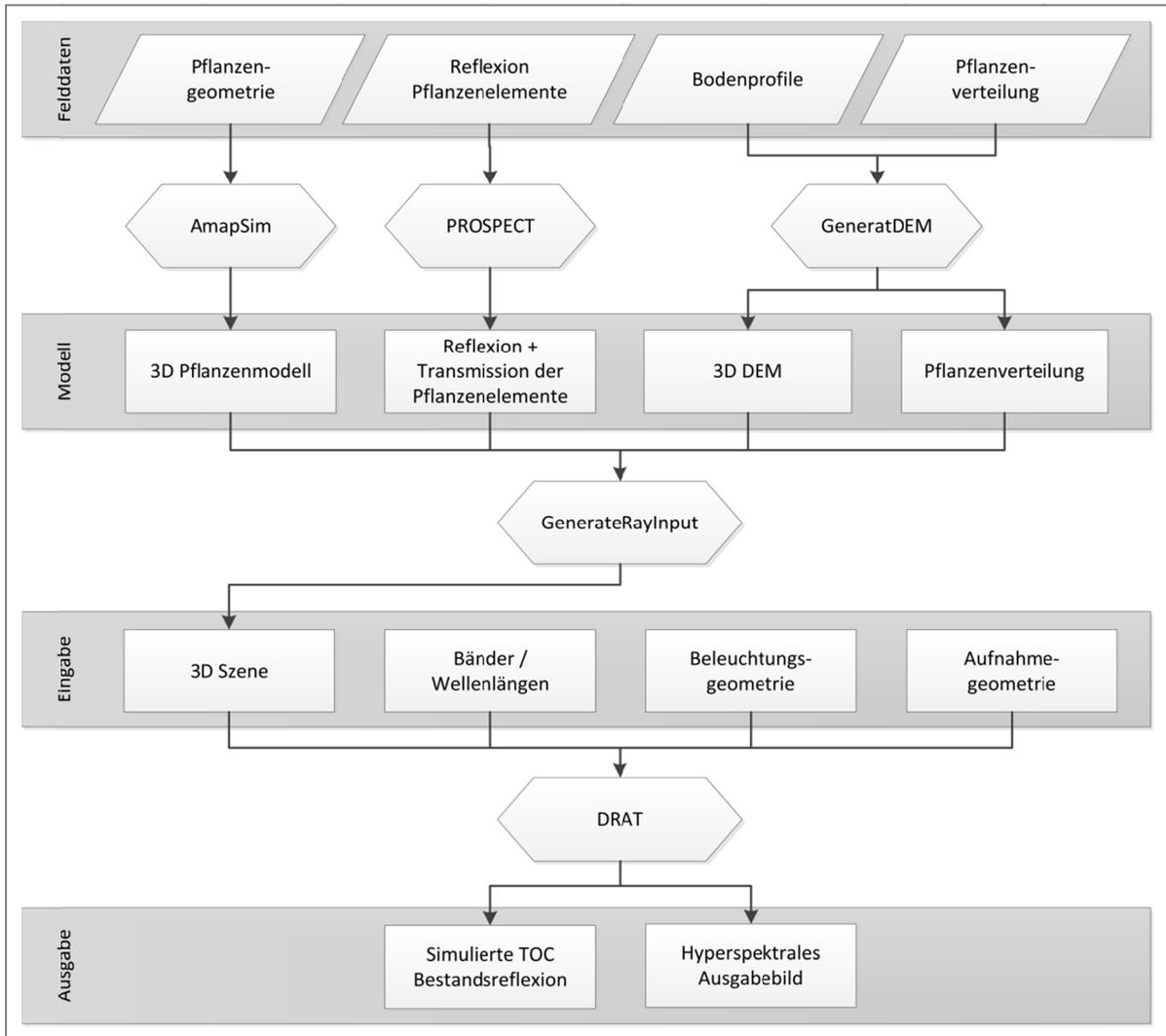


Abb. 5-16: Schematischer Aufbau des Simulationsweges der Bestandsreflexion.

5.4.1 Generierung von 4D-Getreidebeständen auf der Basis von Felddaten

Neben den 4D-Pflanzenmodellen werden die im Feld erhobenen Informationen zur Bestandsarchitektur für den Aufbau eines Gesamtbestandes genutzt.

Boden - DEM

Der Modellierung liegt ein digitales Geländemodell (DGM) des zu simulierenden Bestandes zu Grunde. Hierfür erfolgte im Feld auf verschiedenen Schlägen die Vermessung

von Geländeprofilen, welche die Datengrundlage für die Modellierung eines DGMs liefern. Nach Definition der Reihenorientierung und der Dichte werden Höhenprofile aus der Datenbank selektiert und zu linienhaften Strukturen zusammengefügt. Als Linienfilter genutzt, werden diese Informationen anhand der gegebenen Winkel zu einem DGM überführt. Um eine natürliche Struktur des Bodens zu erzielen, kann das DGM mit einer „körnigen Struktur“ überlagert werden. Jedes Strukturelement wird durch einen nach oben oder unten gerichteten Halbkreis gebildet, dessen Körnungsgröße innerhalb eines definierten Wertebereiches willkürlich variiert (Kuester et al. 2013). Die dadurch modellierten Pflanzreihen lassen sich hinsichtlich ihrer Reihenorientierung und des Reihenabstandes variieren. Im Rahmen der Arbeit werden drei unterschiedlich dichte Reihenabstände, variierend von 8 - 12 cm, 13 - 17 cm und 22 - 26 cm, verwendet.

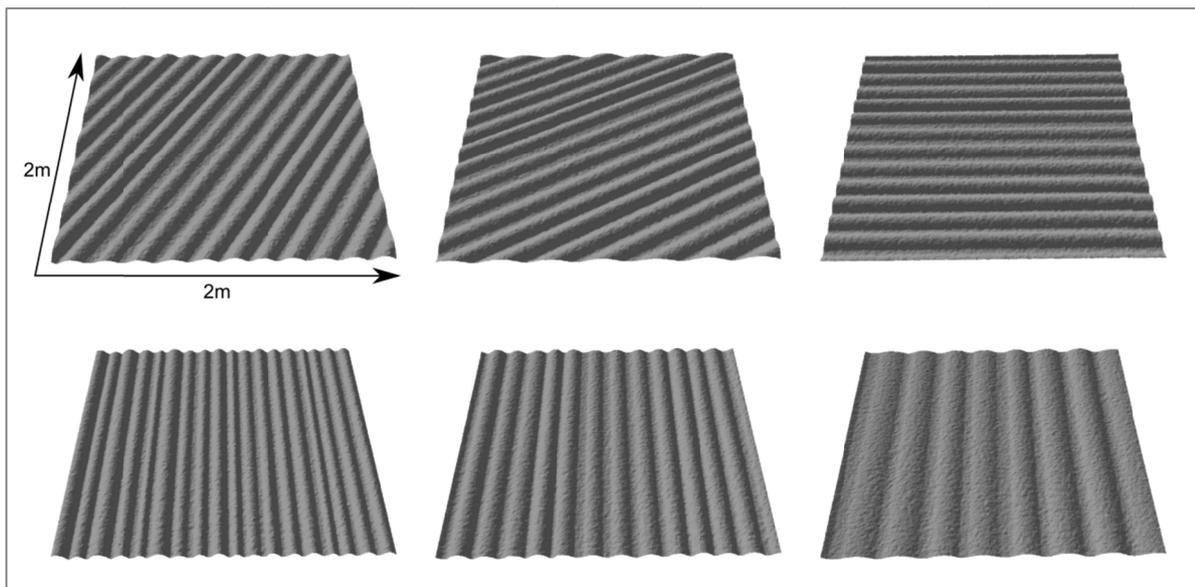


Abb. 5-17: Variation der Reihenorientierung (oben) und des Reihenabstandes (unten).

Optische Eigenschaften der Szenenelemente

Das Reflexionsverhalten eines Pflanzenbestandes ist größtenteils durch die optischen Eigenschaften der einzelnen Pflanzenelemente geprägt. Für das Raytracing ist es somit notwendig, dass jeder Fläche der 3D-Szene spezifische optische Eigenschaften zugewiesen werden (Abb. 5-17). Diese können entweder aus Realmessungen, modellierten Daten eines Blattreflexionsmodells (z.B. *PROSPECT*) oder einer Kombination daraus bestehen. In der vorliegenden Arbeit werden bei der Simulation der Bestandsreflexion, für die Pflanzenelemente (Ähre und Halm) sowie für die Bodenpartikel im Feld bzw. im Labor gemessene ASD-Reflexionsdaten verwendet. Aufgrund der Form der Ähren und Halme transmittieren diese Elemente nur sehr wenig Strahlung, sodass auf die Einbeziehung von Transmission bei diesen Elementen verzichtet wird. Die optischen Eigenschaften des Blattes setzen sich im Gegensatz dazu aus gemessenen Reflexions- und mit *PROSPECT* simulierten Transmissionsdaten zusammen (vgl. Absatz 5. 1).

Bestandsgeometrie

Aufbauend auf dem DGM wird die Bestandsgeometrie erzeugt. Die Dichte und Verteilung der Pflanzen hat dabei einen großen Einfluss auf die Struktur des zu

modellierenden Bestandes. Im ersten Schritt wird die Position der Pflanzenmodelle mit einer definierten Pflanzdichte (entweder fester Wert Pflanze pro Meter oder definierter Wertebereich) exakt entlang der Reihenstruktur des DGMS festgelegt. Da das natürliche Verteilungsmuster keinen exakten Strukturen entspricht, können optional die Pflanzenpositionen sowohl entlang, als auch quer zur Reihe einer gaußschen Verteilung folgend, in Abhängigkeit einer definierten Standardabweichung variiert werden (Kuester et al. 2013).

Die zu simulierende Szene beinhaltet eine beschränkte Anzahl von Pflanzenmodellen einer Art und eines Entwicklungsstadiums. Die Modelle können sich in ihrer physiologischen Entwicklung oder der Anzahl der Stängel unterscheiden. Um eine ausreichend hohe Pflanzenzahl für den Aufbau der Szene zu haben, werden diese Modelle kopiert und innerhalb der Szene mittels Zufallsgenerator an die vorher festgelegten Pflanzenpositionen verteilt. Um Störungseffekte durch eine regelmäßige Pflanzenausrichtung zu vermeiden, können die Pflanzenmodelle entlang ihrer vertikalen Achse rotiert werden. Bei jungen phänologischen Stadien, deren Ähren noch nicht entwickelt sind, ist der Drehwinkel beliebig. Mit Auftreten der Ähren wird der Winkel zunehmend begrenzt (bis $\pm 30^\circ$), um die weitgehend gerichtete Orientierung der Ähren eines Getreidefeldes aufgrund des Windeinflusses zu realisieren.

5.4.2 aDvanced Radiometric rAyTracer (*drat*)

Nach dem Aufbau eines virtuellen Pflanzenbestands kann die Simulation des Strahlungsverhaltens durchgeführt werden. Verwendet wird der *aDvanced Radiometric rAy Tracer (drat)*, ein auf dem Prinzip des rückwärts gerichteten Monte-Carlo-Raytracing (vgl. Abschnitt 5.2.3) basierendes Verfahren der Bildsynthese, das von Lewis (Lewis & Muller 1992; Lewis 1996; Lewis 1999) speziell für die Simulation des Streuverhaltens von Vegetationsbeständen entwickelt wurde.

Für die Simulation der Bestandsreflexion sind neben dem 3D-Modell des Vegetationsbestandes, ein Kameramodell, ein Lichtmodell sowie die Definition der zu simulierenden Bänder (Angabe der Zentrumswellenlängen) und die Anzahl der zu verfolgenden Interaktionen pro Strahl (Streuungsordnung) notwendig. *Drat* erlaubt die Verwendung unterschiedlicher Kameramodelle (z.B.: zentralperspektivische Kamera, orthografische Kamera oder hemisphärische Kamera), wobei jedes Modell durch die Parameter:

- ❖ Zielpunkt (im Ursprung),
- ❖ Kameraposition (Azimut- und Zenitwinkel, sowie Abstand zum Zielpunkt),
- ❖ beobachtete Fläche,
- ❖ Anzahl der initialen Strahlen pro Pixel und
- ❖ räumliche Auflösung der abzutastenden Bildebene in x- und y-Richtung in Pixel

definiert wird.

Die Beleuchtung der Szene erfolgt mittels einer punktförmigen Lichtquelle, deren Lage im Halbraum durch den Azimut- und Zenitwinkel festgelegt wird. In Abhängigkeit von der gewählten Lichtquelle und des Kameramodells wird das Ergebnis der Simulation errechnet, welches aus einem integrierten Reflexionsspektrum der definierten Beobachtungsfläche und einem entsprechenden Ergebnisbild in der definierten räumlichen Auflösung besteht. Die Abb. 5-18 zeigt die Ergebnisbilder für jeweils sechs verschiedene Wachstumsstadien eines Wintergerstebestandes in Schräg- und Nadirsicht. Das Reflexionsspektrum errechnet sich aus der Addition der pro Band für jede Streuungsordnung angegebenen reflektierten Strahlungsenergie.

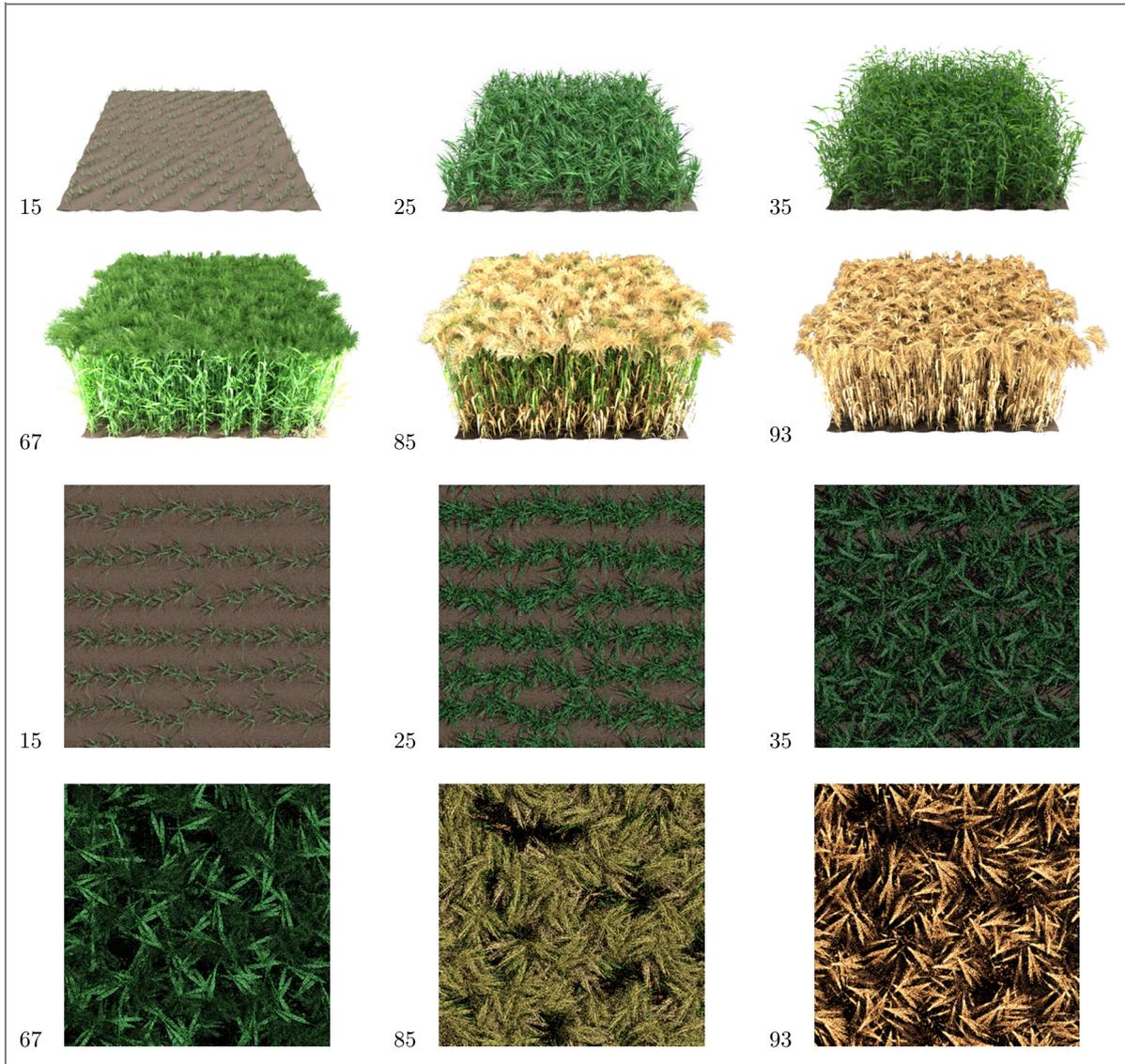


Abb. 5-18: Modellierungsergebnis für Wintergerste in unterschiedlichen phänologischen Entwicklungsstadien (BBCH) in Schräg- (oben) und Nadirsicht (unten): Blatentwicklung (15), Bestockung (25), Schossen (36), Blüte (67), Reife (85), Absterben (93).

5.4.3 Validierung der Modellierungsergebnisse

Die Güte der Modellierungsergebnisse wird anhand von 13 Wachstumsstadien, der Kulturen Winterroggen, Winterweizen und Wintergerste ermittelt. Hierfür werden entsprechende Pflanzenmodelle generiert und mit variierenden Bestandsparametern (Reihenausrichtung - 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°; Pflanzdichte - 8 bis 16 Pflanzen pro m; Anzahl der Triebe pro Pflanze - 4 bis 6; Reihenabstand - 13 bis 17 cm) zu virtuellen Feldern zusammengefügt. Die Variationsvielfalt der Eingabeparameter zwischen den einzelnen Beständen soll dabei die Variabilität natürlicher Schläge widerspiegeln. Die spektralen Eigenschaften der Pflanzenbestandteile sind den Wachstumsstadien angepasst. Der unterlagernde Boden ist eine Probe des Standortes Wittbrietzen, mit einer für das Untersuchungsgebiet typischen Zusammensetzung der Korngrößen von 4 % Kies, 82 % Sand, 9 % Schluff und 5 % Ton und einem Bodenfeuchtegehalt von 4 Vol. %. Auf Basis dieser Testfelder wird die Bestandsreflexion mittels des Raytracing Verfahrens in Nadirrichtung mit maximal 50 Strahlungsinteraktionen simuliert und die Ergebnisse in einer Datenbank zusammengefasst.

Die Validierung erfolgt im Anschluss daran auf drei Wegen. Erstens werden die modellierten Spektren mit im Feld gemessenen Validierungsdaten auf Form- und Albedounterschiede untersucht. Zweitens werden die Vegetationsbedeckung und der LAI der virtuellen Bestände, welche die zuvor ermittelten ähnlichsten Spektren realisierten, bestimmt und mit den Felddaten verglichen. Die dritte Validation erfolgt auf der Basis hyperspektraler *HyMap* Bilddaten. Hierfür werden alle modellierten Daten der im Validationsbild auftretenden Bestände und phänologischen Stadien mit den Bilddaten dieser Schläge verglichen. Zur Bestimmung der ähnlichsten Spektren zwischen modelliertem Reflexionsspektrum R_{mod} und im Feld bzw. im Bild gemessenen Reflexionsspektren R_{val} wird eine Kostenfunktion C_{LSN} (Gleichung 5-5), basierend auf der Methode der kleinsten Quadrate, wie folgt aufgestellt:

$$C_{LSN} = \sum_{i=1}^{n_b} \left(\frac{R_{val_i} - R_{mod_i}}{R_{val_i} + R_{mod_i}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad 5-5$$

wobei n_b für die Anzahl der spektralen Bänder steht. Die Funktion wird auf die Summe von modellierter und gemessener Reflexion normalisiert, wodurch die Abweichungsquadrate relativ zu den Reflexionswerten betrachtet und niedrige Reflexionswerte gegenüber Bändern mit hohen Reflexionswerten nicht überbewertet werden. Für jedes modellierte Reflexionsspektrum wird die Kostenfunktion auf alle gemessenen Daten (ASD bzw. Bilddaten) angewendet. Der sich daraus ergebende Wert stellt ein Maß für die Ähnlichkeit des Spektrenpaares dar und erlaubt die Auswahl des Paares mit dem kleinsten Abweichungsquadrat und somit der größten Ähnlichkeit.

Validierung auf der Basis von Reflexionsspektren

Für die Validierung der modellierten Spektren mit Feldspektren werden jeweils die ähnlichsten Feld- und Modellspektren nach Gleichung 5-5 ermittelt. Pro Simulationsstadium wird ein Vergleich zwischen allen Feld- und Modellspektren durchgeführt. Zur Minimierung von eventuell auftretenden Albedounterschieden werden für einen zweiten Vergleich alle Feld- und Modellspektren normiert (Division aller Bänder durch den höchsten Albedowert). Damit rückt der Einfluss von Albedounterschieden in den Hintergrund, sodass primär die Form des Spektrums zur Entscheidungsfindung beiträgt. Für acht Stadien (WG12, WG13, WW01, WW02, WW03, WW06, WW08 und WW12) sind keine verwertbaren Feldmessungen vorhanden, sodass diese Termine nicht in die Validierung eingehen können. 17 der 31 validierbaren Modellierungszeitpunkte ergeben gute bis sehr gute Übereinstimmungen beider Vergleiche (Form und Gesamtalbedo). In zwölf weiteren Fällen können gute bis sehr gute Übereinstimmungen der spektralen Form erreicht werden, wobei jedoch erhebliche Albedounterschiede zwischen Feld- und Modellspektren auftreten. Lediglich in zwei Fällen werden mäßige Ergebnisse bezüglich der Form, jedoch mit hoher Übereinstimmung der Gesamtalbedo erreicht. Die Validierungsergebnisse, sowie Beispiele für die einzelnen Validierungskategorien sind in Tab. 5-2 zusammengefasst.

Die besten Simulationsergebnisse werden für die mittleren Wachstumsphasen (Schossen bis Frucht- und Samenreife) erzielt. Es fällt jedoch auf, dass die Ergebnisse der modellierten Stadien sechs bis acht für Winterroggen und Wintergerste Albedounterschiede aufweisen, deren genaue Ursache gegenwärtig unklar ist. Zum einen können zu dunkle bzw. zu helle Eingabespektren der einzelnen Pflanzenteile, die auf Messungenauigkeiten im Feld zurückzuführen sind, zu einer Verringerung oder Erhöhung der modellierten Bestandsalbedo führen. Zum anderen besitzen, speziell bei Stadien mit geringeren Bedeckungsgraden, die Bodenart und die Bodenfeuchte einen großen Einfluss auf die im Feld gemessenen Daten, was Unterschiede gegenüber den Simulationsergebnissen mit konstantem Eingabeboden nach sich ziehen kann.

Formunterschiede in den simulierten Daten der frühen Entwicklungsstadien gehen neben dem variablen Parameter Boden auf trockene Pflanzenreste oder Frostschäden und einer damit verbundener Gelbfärbung zurück, die im Feld zum Zeitpunkt der ASD Messungen beobachtet werden konnten. Im Gegensatz dazu sind die Formunterschiede der späten Entwicklungsphasen auf eine zunehmende Durchsetzung der Bestände mit vitaler Begleitvegetation zurückzuführen, die im Rahmen der Simulation aufgrund der vielfältigen vorkommenden Arten und der damit verbundenen sehr langen Modellierungszeit nicht berücksichtigt werden konnte.

Tab. 5-2: Validierungsergebnisse: ++ sehr gute Form und sehr gute Albedo, + gute Form und sehr gute Albedo, ** sehr gute Form und abweichende Albedo, * gute Form und abweichende Albedo, - ausreichende Form und sehr gute Albedo.

Simulations- stadium	BBCH	Winterroggen	Wintergerste	Winterweizen
1	10	+	++	keine Validationsdaten
2	20	-	-	keine Validationsdaten
3	25	-	+	keine Validationsdaten
4	30	++	++	++
5	40	+	+	+
6	50	**	*	keine Validationsdaten
7	55/60	**	**	++
8	70	**	*	keine Validationsdaten
9	80-85	++	*	++
10	87-89	+	+	*
11	90	++	*	+
12	95	*	keine Validationsdaten	keine Validationsdaten
13	99	+	keine Validationsdaten	-

Validierung auf der Basis des Bedeckungsgrades und des LAI

Neben dem spektralen Vergleich werden die modellierten Ergebnisse im zweiten Schritt mit Geländefotos der Validierungsflächen, die eine Fläche von 0,25 m² (0,5 x 0,5 m) abbilden, verglichen. Hierfür werden die Ergebnisbilder der Raytracing-Simulation und die Feldfotos nach deren Flächenanteilen in Bezug auf die Anteile vitaler Vegetation, trockener Vegetation und sichtbaren Boden mittels einer Entscheidungsbaumklassifizierung analysiert und deren Bildanteile auf dieser Basis ermittelt. Der spektrale Informationsgehalt der modellierten Daten ermöglicht die einfache Klassifizierung der Ergebnisbilder durch Berechnung des NDVI zur Detektion vitaler Vegetation und des CAI (engl. Cellulose Absorption Index von Daughtry (2001)) zur Differenzierung von trockener Vegetation und Boden. Die Klassifizierung der Geländefotos erfolgt für sonnige und schattige Bereiche separat. Grüne Vegetation wird über das Verhältnis von Grün zu Rot > 1.1 bestimmt. Boden und trockene Vegetation ist in Fotos mitunter sehr schwierig voneinander zu differenzieren und wird ebenfalls über das Verhältnis von Rot zu Grün unterschieden. Variierende Bodenfarben können jedoch eine Anpassung des Schwellwertes erfordern. Die Schattenbereiche werden zusätzlich über Helligkeitsunterschiede differenziert, da der Boden im Vergleich zur Vegetation zumeist deutlich dunkler erscheint. Aufgrund der äußeren Aufnahmebedingungen der Geländefotos weisen sie sehr große Farb- und Helligkeitsunterschiede auf, was eine manuelle Anpassung der Entscheidungsbaumklassifizierung erfordert um vergleichbare Klassifizierungsergebnisse zu gewährleisten. Das zentralperspektivische Aufnahmeprinzip der Fotokamera führt zu einer Überschätzung des Vegetationsanteils in den Feldfotos. In Abhängigkeit von der Bestandshöhe wird ein Korrekturwert angebracht (ab 0,2 m -1 %, ab 0,4 m -2 %, ab

0,7 m -3 %, ab 1,1 m Bestandshöhe -4 %) (Kuester et al. 2013) um diesen Einfluss zu minimieren.

Abb. 5-19 zeigt eine Gegenüberstellung von Feldfotos und von *drat* ausgegebenen Bild-daten für Winterroggen in zwei phänologischen Stadien. Speziell im Stadium 09 (Abb. 5-19, rechts) wird der perspektivische Unterschied zwischen Feldfotos und Simulationsergebnissen deutlich. Die Ergebnisse der Bedeckungsgradanalysen sind in Abb. 5-20 zusammengefasst. Sie zeigen bei vielen Wachstumsstadien sehr große Übereinstimmungen des Bedeckungsgrades zwischen den modellierten Daten und den klassifizierten Feldfotos für die Arten Wintergerste und Winterroggen. Bei Winterweizen für den die Simulationsstadien 1-3 im Feld nicht erfasst werden konnten, unterscheiden sich die in-situ-Messungen der Stadien 9-13 sehr stark von den Bedeckungsgraden der modellierten Bestände. Im Gegensatz zu den modellierten Daten weisen die in-situ-Daten jedoch einen nicht natürlichen Verlauf auf, erkennbar an einem über die gesamte Vegetationsperiode hinweg relativ konstantem Bedeckungsgrad. Die hohen Bedeckungsgrade der späten Stadien lassen sich auf relativ stark auftretende Begleitvegetation zum Zeitpunkt der Fotoaufnahmen zurückführen, die eine Erhöhung des Bedeckungsgrades bewirkt. Insgesamt ist der Datenbestand zu Winterweizen aber sehr klein und bedingt repräsentativ, da die Datenerfassung lediglich innerhalb einer Vegetationsperiode erfolgte. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass den modellierten Reflexionswerten sehr detailgetreue und naturnahe Geometrien der Einzelpflanzenmodelle und auch der aufgebauten Bestände zu Grunde liegen.

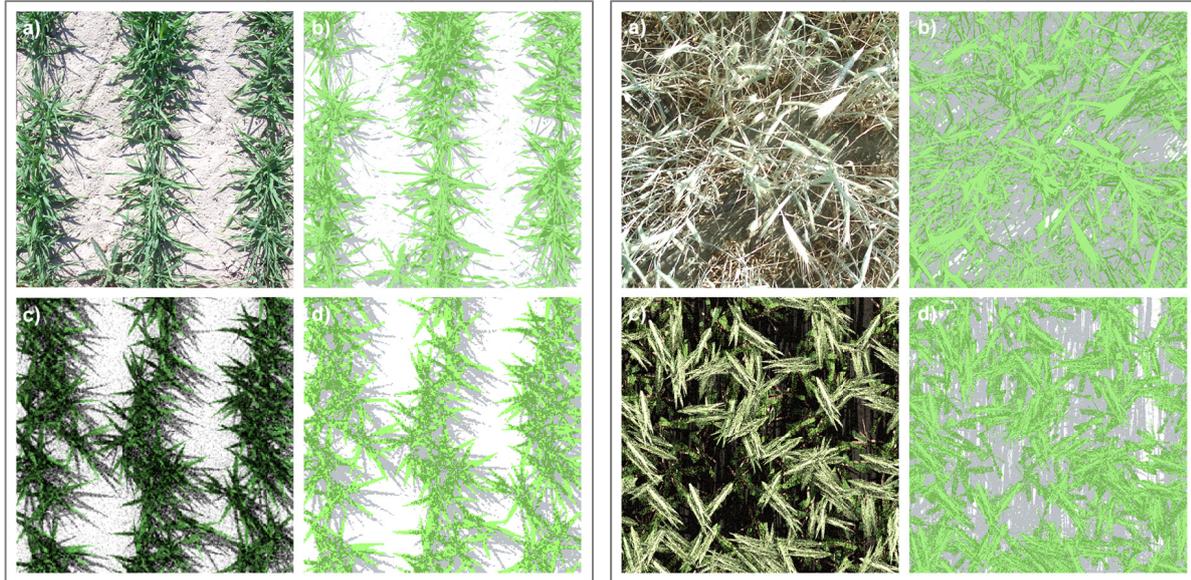


Abb. 5-19: Gegenüberstellung von Feldfotos (a), klassifizierten Feldfotos (b), Simulationsergebnissen (c) und klassifizierten Simulationsergebnissen (d) für Winterroggen im Simulationsstadium 2 - Beginn Bestockung (BBCH - 23) (links) und Simulationsstadium 9 - Beginn Frucht- und Samenreife (BBCH - 83) (rechts).

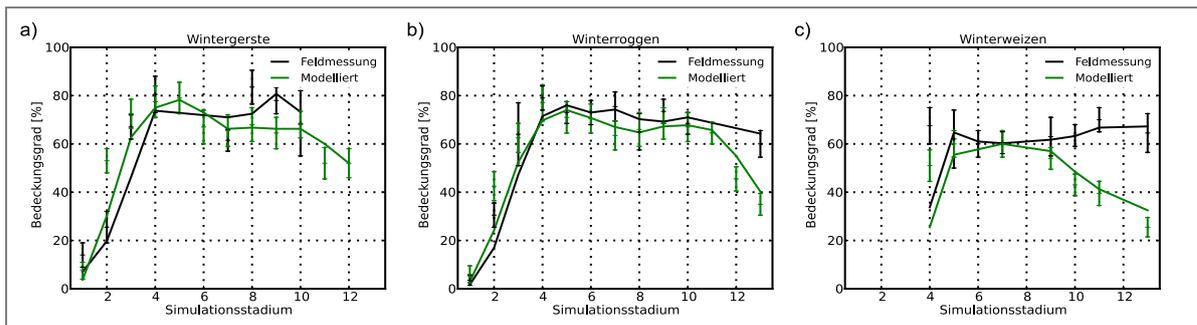


Abb. 5-20: Entwicklung des Bedeckungsgrades der Feldmessungen und der modellierten Bestände für a) Wintergerste b) Winterroggen und c) Winterweizen. Jedes Stadium wird durch mehrere Datensätze abgedeckt, für die Mittelwert (\bar{x}) und Standardabweichung (σ) berechnet werden ($\bar{x} \pm \sigma$ in %).

Neben dem Bedeckungsrad beschreibt der LAI den strukturellen Aufbau eines Bestandes und kann ebenfalls zur Validierung herangezogen werden. Aufgrund fehlender Feldmessungen beruht die Validation jedoch lediglich auf in der Literatur recherchierten Daten. Die LAI-Werte aller drei modellierten Getreidearten weisen typische saisonal bedingte Änderungen auf (Abb. 5-21), mit einem LAI-Maximum zu Beginn der Samenreife (z.B. in Kanemasu 1974; Zhang et al. 2004; Baghestani et al. 2006).

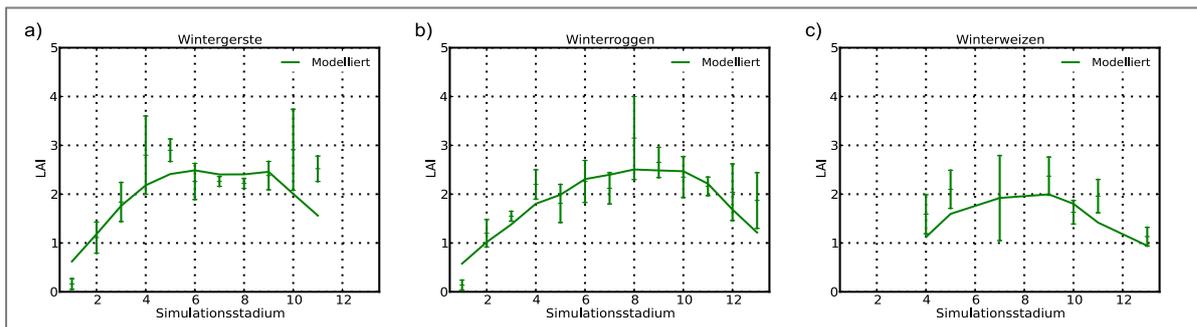


Abb. 5-21: Entwicklung des LAI der modellierten Pflanzenbestände a) Wintergerste, b) Winterroggen und c) Winterweizen.

Validierung auf der Basis von Bilddaten

Für die Validierung auf der Basis hyperspektraler Bilddaten werden der *HyMap* Datensatz des Untersuchungsgebietes Wittbrietzen (Aufnahmezeitpunkt 20.06.2007) verwendet, da der Großteil der der Modellierung zu Grunde liegenden Daten in diesem Gebiet erhoben wurden und somit die modellierten Daten diesem Gebiet am besten entsprechen. Zum Aufnahmezeitpunkt wiesen die Bestände folgende phänologischen Entwicklungsstadien auf: Winterroggen (Ende Frucht- und Samenreife - BBCH 87), Wintergerste (Totreife - BBCH 97), Winterweizen (Fruchtentwicklung - BBCH 75).

Analog zu der Validierung auf der Basis von ASD-Feldspektren werden mittels der bereits beschriebenen Kostenfunktion die ähnlichsten Spektren ermittelt. Sowohl die Form als auch die Albedounterschiede der modellierten Daten und der Bilddaten zeigen in

allen drei analysierten Fällen gute Übereinstimmungen (Abb. 5-22). Die größte Diskrepanz tritt, analog zum Vergleich zu den ASD-Felddaten, bei Wintergerste im Stadium der Totreife auf, da die vorhandene Begleitvegetation das Reflexionssignal des Bestandes sehr stark beeinflusst.

Die dreifache Validierung erlaubt sowohl eine Bewertung der Geometrie der modellierten Bestände als auch des simulierten Reflexionssignals. Die Entwicklung des Bedeckungsgrades und des LAI der simulierten Bestände weisen arttypische phänologische Verläufe auf. Es ist also davon auszugehen, dass sowohl die Geometrie der Einzelpflanzen als auch des aufgebauten Gesamtbestandes sehr realitätsnah nachempfunden werden. Basierend auf den geometrisch exakten Bestandmodellen weisen die simulierten Reflexionsspektren ebenfalls für die Vielzahl der simulierten phänologischen Stadien hohe Übereinstimmungen im Bezug zu terrestrischen ASD-Daten und zu hyperspektralen Flugzeugscannerdaten auf.

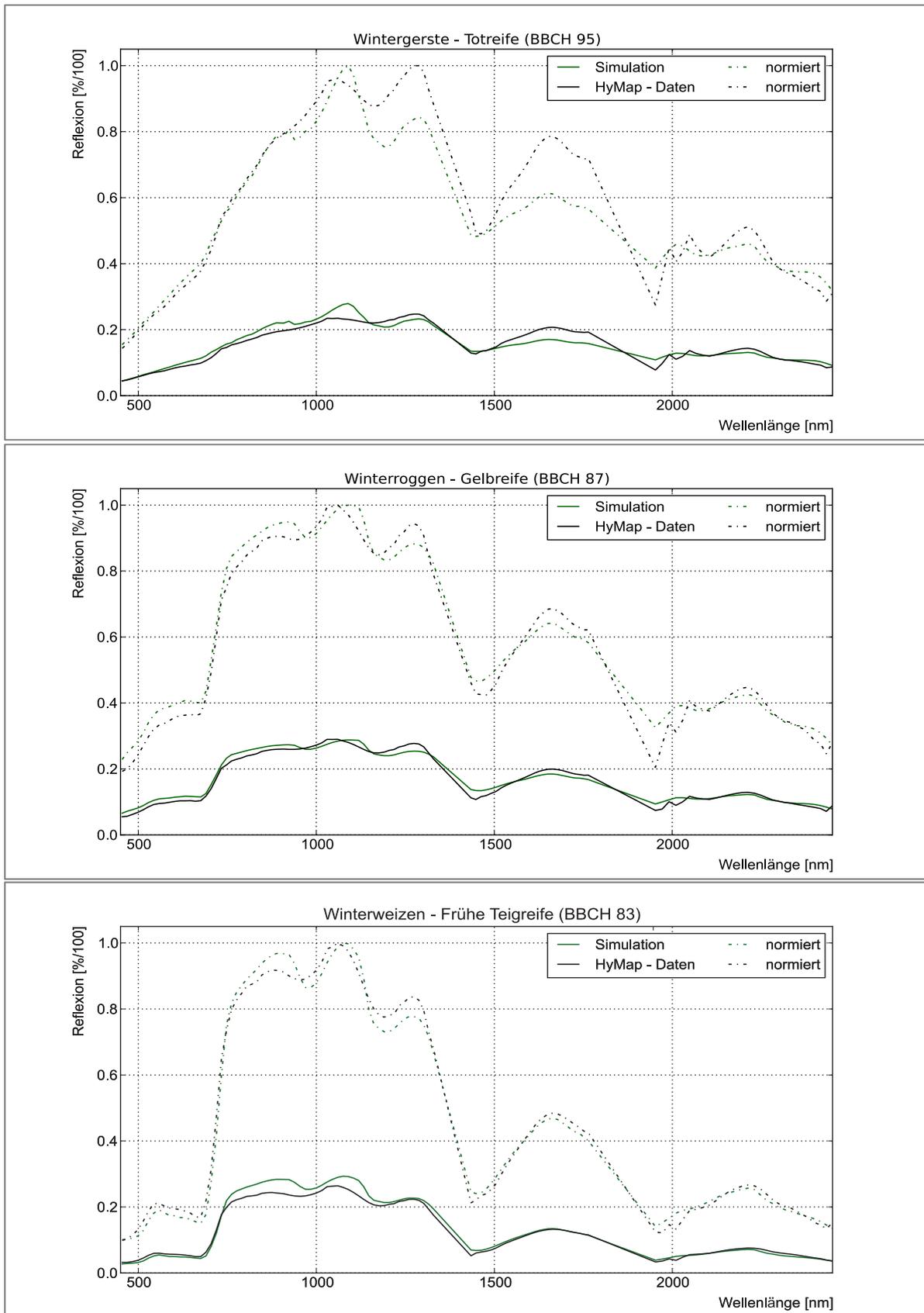


Abb. 5-22: Übersicht der spektralen Validierungsergebnisse in Bezug auf *HyMap* Bilddaten des UG-Wittbrietzen (20.06.2007).

6 Bewertung des Einflusses struktureller Parameter auf die Bestandsreflexion

Die Bestandsreflexion wird sowohl durch optische als auch strukturelle Parameter der Einzelelemente sowie des Gesamtbestandes beeinflusst. Für die Verwendung modellierter Daten als Trainingsdaten einer Klassifizierung ist es entscheidend im Vorfeld zu untersuchen, welchen Einfluss bestimmte Parameter auf das Reflexionsverhalten eines Bestandes besitzen. Es ist bekannt, dass die optischen Eigenschaften der Pflanzenbestandteile, die durch deren inneren Aufbau und deren stoffliche Zusammensetzung geprägt sind, das Reflexionsverhalten eines Bestandes maßgeblich beeinflussen. Untersuchungen zum Einfluss struktureller Parameter beschränken sich jedoch zumeist auf den LAI (Kuusk 1991; Asner 1998) oder die Blattstellung (Asner 1998). Speziell der LAI eines Bestandes wird jedoch von verschiedenen pflanzlichen (z.B. Pflanzenart, Phänologie) als auch bestandsstrukturellen Parametern (z.B. Pflanzendichte) bestimmt. Die Verwendung von 4D-Bestandsmodellen erlaubt es im Gegensatz zu einfacheren Modellen, wie sie bisher vornehmlich für diese Analysen verwendet wurden, den Einfluss einer Vielzahl von Parametern zu untersuchen. Tab. 6-1 gibt einen Überblick über potenzielle Einflussparameter auf das Reflexionsverhalten von Pflanzenbeständen, wobei die Vielzahl von diesen in den folgenden Analysen detailliert untersucht werden (in Tab. 6-1 nicht kursiv dargestellt).

Tab. 6-1: Einflussparameter auf das Reflexionsverhalten von Pflanzenbeständen.

Pflanzenparameter	Bestandsparameter	Bodenparameter	Beobachtungsparameter
Optische Eigenschaften der Pflanzenelemente	Reihenabstand	Bodenart	Beleuchtungsgeometrie
	Pflanzdichte	Bodenfeuchte	Aufnahmegeometrie
Pflanzenart	Reihenorientierung	<i>Moose und Flechten</i>	
Pflanzenaufbau	Pflanzenorientierung	<i>Rauigkeit</i>	
Phänologie			

Für die Untersuchung werden verschiedene Konfigurationen der Bestandszusammensetzung definiert, wobei lediglich einer der in Tab. 6-1 aufgezeigten Hauptparameter variiert, um dessen Einfluss auf das Reflexionssignal analysieren zu können. Die jeweilige Konfiguration ist zu Beginn jedes Abschnittes erläutert. Die Quantifizierung der Einflüsse der untersuchten Parameter erfolgt pro Wellenlänge durch die Berechnung des Variationskoeffizienten v (Gleichung 6-1), der ein dimensionsloses relatives Streumaß darstellt, wobei σ_x die Standardabweichung und \bar{x} das arithmetische Mittel ist. Der Variationskoeffizient ermöglicht prozentuale Aussagen über die Streuung der modellierten Werte um den Mittelwert und stellt somit ein aussagekräftiges Maß für die Beurteilung der untersuchten Bestandsparameter dar.

$$v = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \times 100\% \quad 6-1$$

6.1 Struktureller Einfluss der Phänologie auf die Bestandsreflexion

Die Struktur eines Bestandes wird primär durch die bestandsbildenden Pflanzen bestimmt. Neben der Pflanzenart ist dabei die phänologische Entwicklung maßgeblich für das Erscheinungsbild eines Bestandes. Ausgehend von offenem Boden führt das Wachstum der Pflanzen zu einem Anstieg der trockenen Biomasse (siehe Abb. 6-1). Es erfolgt die Untersuchung der damit einhergehenden Änderung der sichtbaren Pflanzen-, Boden- und Schattenflächenanteile, welche zu einer Beeinflussung des Reflexionsverhaltens des Getreidebestandes führt.

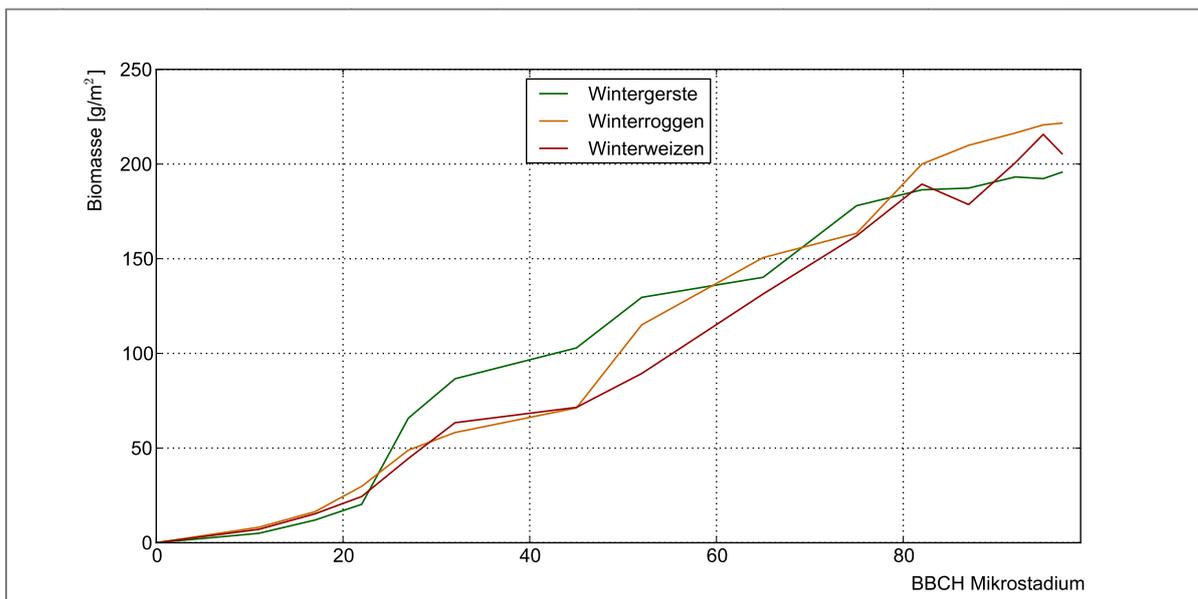


Abb. 6-1: Entwicklung der trockenen Biomasse im Laufe einer Vegetationsperiode basierend auf Feldmessungen der Jahre 2007 u. 2008 im UG-Wittbrietzen.

Im ersten Schritt werden künstliche Bestände der drei Getreidearten Winterweizen, Winterroggen und Wintergerste in 13 unterschiedlichen Wachstumsstadien erzeugt. Die Verwendung konstanter optischer Eigenschaften für alle Szenenelemente (siehe Tab. 6-2), unabhängig vom Entwicklungsstadium, ermöglicht die Beurteilung des Einflusses der veränderlichen Pflanzengeometrie.

Tab. 6-2: Konstantes Reflexionsverhalten der Szenenelemente für die Analyse des Einflusses der Bestandsstruktur auf die Gesamtreflexion

Reflexion Blatt	Transmission Blatt	Absorption Blatt	Reflexion Stän- gel/Ähre	Absorption Ähre	Transmission Ähre	Reflexion Boden
0,3	0,2	0,5	0,6	0,4	0,0	0,0

Im zweiten Schritt werden Simulationen mit variierenden optischen Eigenschaften der Blattelemente durchgeführt, wobei die optischen Eigenschaften der Ähren konstant bleiben, um den Einfluss der Blätter und Ähren auf die Gesamtreflexion des Bestandes in Abhängigkeit der phänologischen Entwicklung zu untersuchen. Die optischen Eigenschaften der verwendeten Materialien sind in der folgenden Tab. 6-3 dargestellt.

Tab. 6-3: Variables Reflexionsverhalten der Szenenelemente für die Analyse des Einflusses der Bestandsstruktur auf die Gesamtreflexion

Konfigu- ration	Reflexion Blatt	Transmission Blatt	Absorption Blatt	Reflexion Stängel/ Ähre	Absorption Ähre	Transmission Ähre	Reflexion Boden
1	1,0	0,0	0,0	0,6	0,4	0,0	0,0
2	0,9	0,1	0,0	0,6	0,4	0,0	0,0
3	0,8	0,1	0,1	0,6	0,4	0,0	0,0
4	0,7	0,2	0,1	0,6	0,4	0,0	0,0
5	0,6	0,2	0,2	0,6	0,4	0,0	0,0
6	0,5	0,3	0,2	0,6	0,4	0,0	0,0
7	0,4	0,3	0,3	0,6	0,4	0,0	0,0
8	0,3	0,4	0,3	0,6	0,4	0,0	0,0
9	0,2	0,4	0,4	0,6	0,4	0,0	0,0
10	0,1	0,5	0,4	0,6	0,4	0,0	0,0

Die Ergebnisse der Simulation bei Verwendung konstanter optischer Eigenschaften zeigen deutliche Unterschiede des Reflexionsverhaltens zwischen den drei Getreidearten (siehe Abb. 6-2). Ausgehend vom offenen Boden, dessen Reflexionsvermögen in diesem Falle null beträgt, führt das zunehmende Pflanzenwachstum zu einem Anstieg der Albedo, deren Maximum im Stadium der Vollreife erreicht wird. Bis Ende des Schossens verläuft diese Entwicklung für die drei Getreidearten vergleichbar. Kleinere Unterschiede ergeben sich hierbei aufgrund unterschiedlicher Blattspreiten und Blattstellungen, die sich wiederum in den LAI Werten der Bestände widerspiegeln (siehe Tab. 6-4).

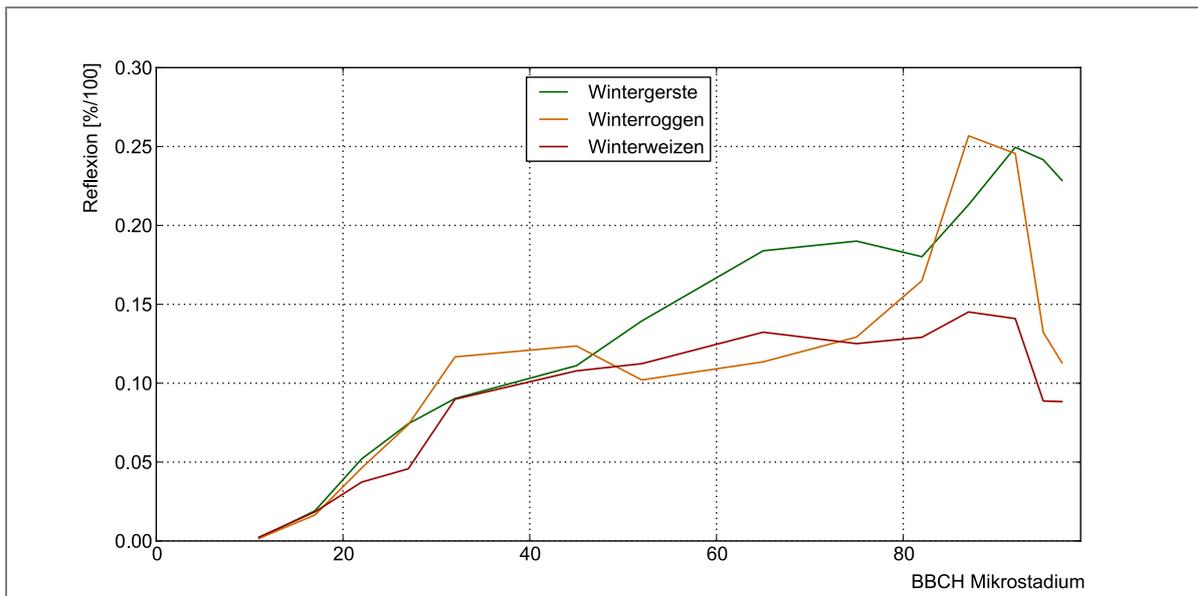


Abb. 6-2: Reflexionsverhalten von Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen bei konstanten optischen Pflanzeigenschaften in den unterschiedlichen BBCH Wachstumsstadien.

Tab. 6-4: LAI Werte der modellierten Getreidetestflächen, unterschieden in realen LAI und unter Einbeziehung der Ähren

Kultur	Wachstumsstadium													
	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13
<i>Gerste</i>	0,1	0,2	0,6	0,7	2,8	3,1	3,1	3,1	3,0	2,8	2,6	2,1	1,4	1,1
<i>Gerste (Ähren)</i>	0,1	0,2	0,6	0,7	2,8	3,1	3,9	5,6	5,5	5,5	5,3	4,9	4,2	3,9
<i>Roggen</i>	0,1	0,2	0,7	0,8	3,3	3,6	3,7	3,7	3,6	3,9	2,2	1,9	1,3	1,1
<i>Roggen (Ähren)</i>	0,1	0,2	0,7	0,8	3,3	3,6	4,3	5,2	5,3	5,8	3,9	3,6	3,1	2,9
<i>Weizen</i>	0,1	0,2	0,5	0,6	2,5	2,7	2,9	2,7	2,5	2,7	2,5	2,1	1,4	1,1
<i>Weizen (Ähren)</i>	0,1	0,2	0,5	0,6	2,5	2,7	3,0	2,9	2,7	2,9	2,7	2,3	1,6	1,3

Die Ausbildung der Ähren führt aufgrund der veränderten Streuungscharakteristik in den folgenden Stadien zu einer divergierenden Entwicklung des Reflexionsverhaltens der Arten, die speziell durch die an der Bestandsoberfläche befindlichen Ähren hervorgerufen wird. Weizen mit seinen unbegrannten Ähren besitzt in der Simulation die niedrigste Albedo, da die Anzahl der streuenden Elemente und die damit verbundene Volumestreueung im Vergleich zu Roggen und Gerste geringer sind.

Das Albedomaximum befindet sich bei Winterroggen und Winterweizen in den Reifestadien (zehn und elf). In diesen Stadien weisen die meisten Ähren in den Pflanzenmodellen eine nahezu waagerechte Lage auf, womit das Bestandsreflexionssignal am stärksten durch die Ähren beeinflusst wird. Die mit dem Absterben der Pflanzen ver-

bundene Austrocknung der Pflanzen führt neben einem weiteren Senken der Ähren bis hin zu einer senkrechten Ausrichtung zum Boden auch zu einer Austrocknung der Blätter, die sich schließlich teilweise zusammenrollen oder auch abbrechen. Aufgrund dieser Änderungen gewinnt das Bodensignal für die Bestandsreflexion wieder zunehmend an Bedeutung. Im Falle dieser Simulation mit der Verwendung eines Bodens mit 0% Reflexionsvermögen, führt dies zu einer Verringerung der Bestandsreflexion. Die Albedo des Wintergerstebestandes nimmt während des Absterbens nur gering ab, da aufgrund der starken Begrannung der Ähren deren Reflexionssignal den Bestand weiterhin dominiert.

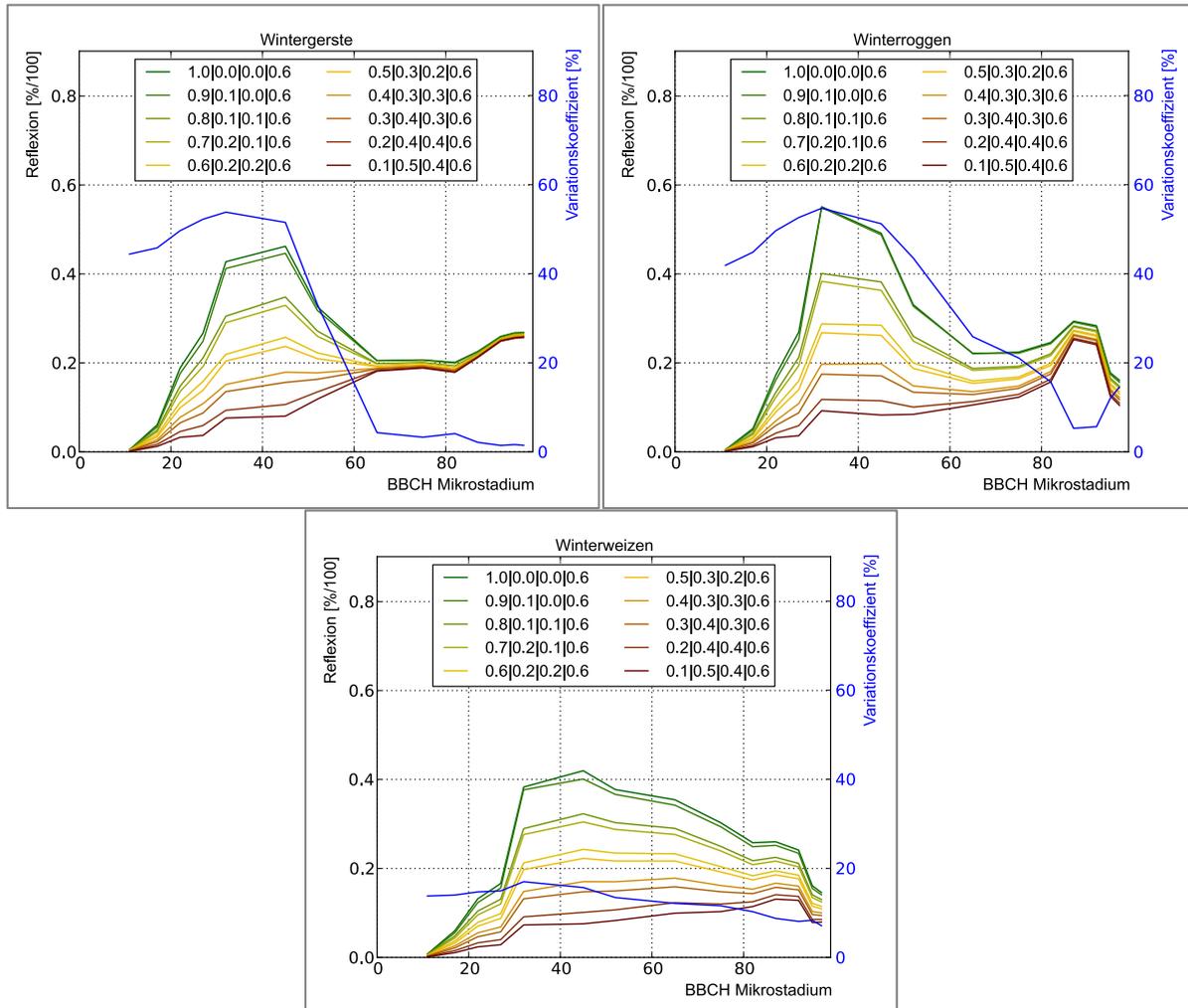


Abb. 6-3: Einfluss variierender optischer Pflanzeigenschaften auf das Reflexionsverhalten (Nadir) von Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen (Blätter u. Stängel – Reflexion; Blätter u. Stängel – Transmission; Blätter u. Stängel – Absorption; Ähren – Reflexion) in den unterschiedlichen BBCH Wachstumsstadien.

Die Integration variabler optischer Blatteigenschaften in das Experiment verdeutlicht den Einfluss der Blatt- und der Ährenspektren auf die Gesamtreflexion des Bestandes nochmals und zeigt zudem die Unterschiede zwischen den drei Arten klar auf (Abb. 6-3). Der Wintergerstebestand wird ab der Mitte der Blüte (Stadium 65) nahezu ausschließlich durch das Spektrum der Ähren beschrieben. Die variierenden Blatteigen-

schaften beeinflussen die Reflexion des Gesamtbestandes im Gegensatz zu Winterroggen und Winterweizen kaum. Bei diesen beiden Arten führen die Änderungen der Blattreflexion zu einer deutlichen Beeinflussung der Bestandsreflexion (siehe Variationskoeffizient in Abb. 6-3).

6.2 Einfluss der Verteilung der Pflanzen – Reihenabstand

Neben den pflanzenstrukturellen und pflanzenoptischen Eigenschaften eines Bestandes beeinflussen bestandsstrukturelle Parameter, wie der Reihenabstand, die Pflanzdichte oder die Reihenorientierung das Reflexionsverhalten eines Bestandes maßgeblich. Sekundäre Auswirkungen einer veränderten Bepflanzungsdichte auf das Pflanzenwachstum durch veränderte Wachstumsbedingungen werden allerdings bei der nachfolgenden Betrachtung außer Acht gelassen. Das Verhältnis der sichtbaren Pflanzen- und Bodenanteile eines Bestandes damit die Zusammensetzung der reflektierten Strahlung variiert in Abhängigkeit des Entwicklungszustands der Pflanzen und des Reihenabstands.

Die Untersuchung des Einflusses des Reihenabstands basiert auf drei Distanzen (8 - 12 cm, 13 - 17 cm und 22 - 26 cm). Um sicherzustellen, dass der reine Einfluss des Reihenabstands betrachtet wird, ist zusätzlich eine Variation der Pflanzdichte notwendig, wodurch ein konstanter Blattflächenindex und eine damit verbundene vergleichbare Absorption der Vegetation gewährleistet werden. Die LAI-Werte der Versuchsbestände sind in Tab. 6-5 für die Wachstumsstadien Bestockung, Schossen, Ährenschieben und Vollreife angegeben. Darüber hinaus ist die Ausrichtung der Pflanzenreihen im Bezug zur Lichtquelle entscheidend, da hierdurch der Anteil des direkt bestrahlten Bodens beeinflusst wird. Um die größtmögliche Beeinflussung zu erzielen, werden die Pflanzreihen parallel zur Lichtquelle ausgerichtet (Pflanzrichtung - 180°, Lichtquelle: Azimutwinkel - 180°, Zenitwinkel - 30°).

Der Einfluss des Reihenabstands auf das Reflexionsverhalten von Getreidebeständen ist stark von der Pflanzenart und der phänologischen Entwicklung des Bestandes abhängig. Abb. 6-4 zeigt diese Unterschiede anhand der Entwicklung des Variationskoeffizienten auf. In den frühen Entwicklungsstadien der Bestände variieren die Reflexionssignale des Bestandes aufgrund des geringen Bedeckungsgrades nur wenig. Die hierbei auftretenden Unterschiede ergeben sich zumeist aufgrund unterschiedlicher Abschattungen. Mit fortschreitender Entwicklung der Pflanzen werden jedoch die Reflexionsunterschiede zwischen den drei Reihenabständen deutlicher und erreichen während des Ährenschiebens bei Wintergerste Werte von ca. 20 %, bei Winterroggen ca. 25 % und Winterweizen ca. 33 %. In diesem Stadium sind die Ähren noch sehr aufrecht, was mit zunehmendem Reihenabstand die Chance für sichtbaren offenen Boden erhöht und damit zu den deutlichen Unterschieden zwischen den drei Reihenabständen führt. Die artspezifischen Unterschiede lassen sich durch die Ährenformen und der damit verbundenen Begrannung erklären. Die Grannen der Roggen- und Gersteähren bewirken eine Verstärkung der Volumenstreuung im oberen Bereich des Bestandes. Dies führt zu einer

Homogenisierung des Reflexionssignals und die Bestandsreflexion wird durch das Reflexionsverhalten der Ähren dominiert. Reihenabstandsbedingte Unterschiede der Bestandsreflexion werden im Vergleich zu Winterweizen deutlich weniger stark sichtbar. Mit fortschreitender phänologischer Entwicklung minimieren sich die Unterschiede zwischen den Reihenabständen. Das zunehmende Gewicht der Ähren führt zu einem Abknicken dieser, sodass der Anteil sichtbaren Bodens im Vergleich zur Vegetation verringert wird.

Tab. 6-5: LAI der zur Untersuchung des Einflusses des Reihenabstands auf das Reflexionsverhalten verwendeten simulierten Bestände von Winterroggen, Winterweizen und Wintergerste.

Art	Reihenabstand [cm] + Pflanzendichte pro m	LAI Bestockung	LAI Schossen	LAI Ährenschieben	LAI Vollreife
Winterroggen	8 - 12 (11)	0,75	1,12	2,66	2,11
Winterroggen	13 - 17 (16)	0,75	1,12	2,65	2,09
Winterroggen	22 - 26 (24)	0,75	1,11	2,62	2,07
Winterweizen	8 - 12 (13)	0,73	1,02	2,46	2,15
Winterweizen	13 - 17 (18)	0,74	1,02	2,47	2,14
Winterweizen	22 - 26 (24)	0,73	1,12	2,45	2,14
Wintergerste	8 - 12 (12)	0,70	1,08	2,76	2,49
Wintergerste	13 - 17 (17)	0,70	1,07	2,74	2,48
Wintergerste	22 - 26 (25)	0,70	1,07	2,72	2,46

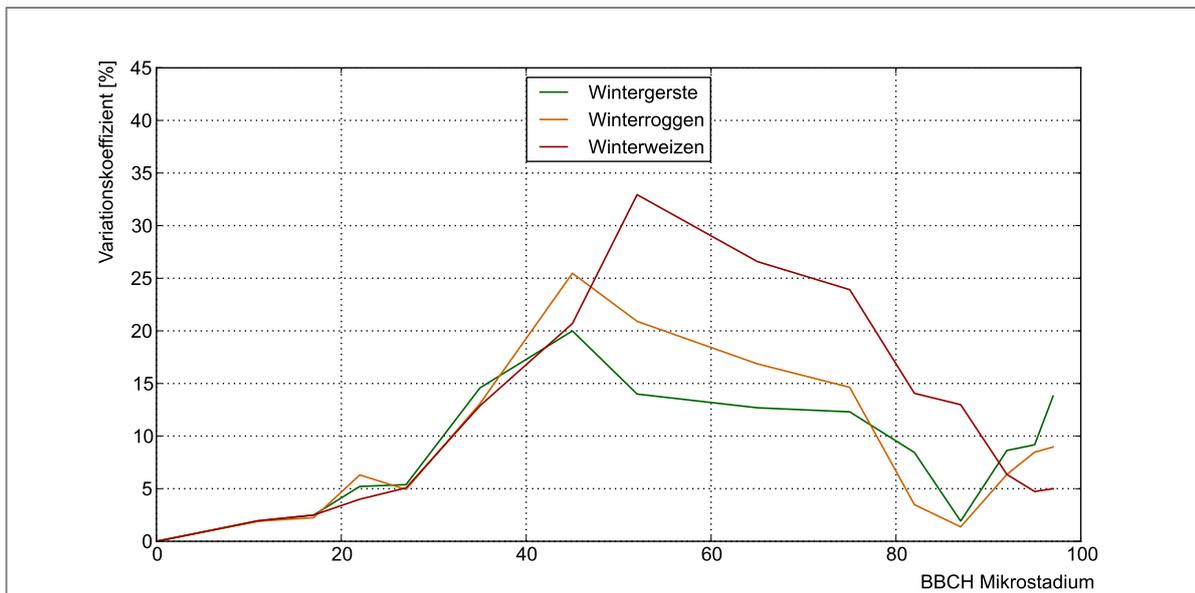


Abb. 6-4: Einfluss des Reihenabstands auf das Reflexionsverhalten (Nadir) von Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen.

Die Abb. 6-5 bis Abb. 6-7 zeigen spektrale Unterschiede des Reflexionsverhaltens bei variierendem Reihenabstand am Beispiel der Entwicklungsstadien a) Bestockung

b) Schossen, c) Ährenschieben und d) Vollreife und verdeutlichen die Unterschiede in der Variation der Bestandsreflexion aufgrund des variierten Reihenabstands. Im Gegensatz zu Wintergerste und Winterroggen wird das Reflexionssignal des Winterweizenbestands in der Vollreife trotz vergleichbarer Blattflächenindizes deutlich von dem darunter befindlichen Boden beeinflusst. Dies führt bei einem im Vergleich zur Vegetation höherem Bodensignal mit steigendem Reihenabstand zu einer Erhöhung der Bestandsreflexion in diesen Wellenlängen. In Wellenlängenbereichen mit, im Vergleich zum Bodensignal, höherer Albedo der Vegetation (Bsp. im NIR) tritt der umgekehrte Fall ein und die Albedo des Bestandes wird aufgrund des dunkleren Bodens reduziert. Die Umkehrpunkte befinden sich dabei jeweils an den Schnittpunkten des Bodenspektrums mit den Bestandspektren.

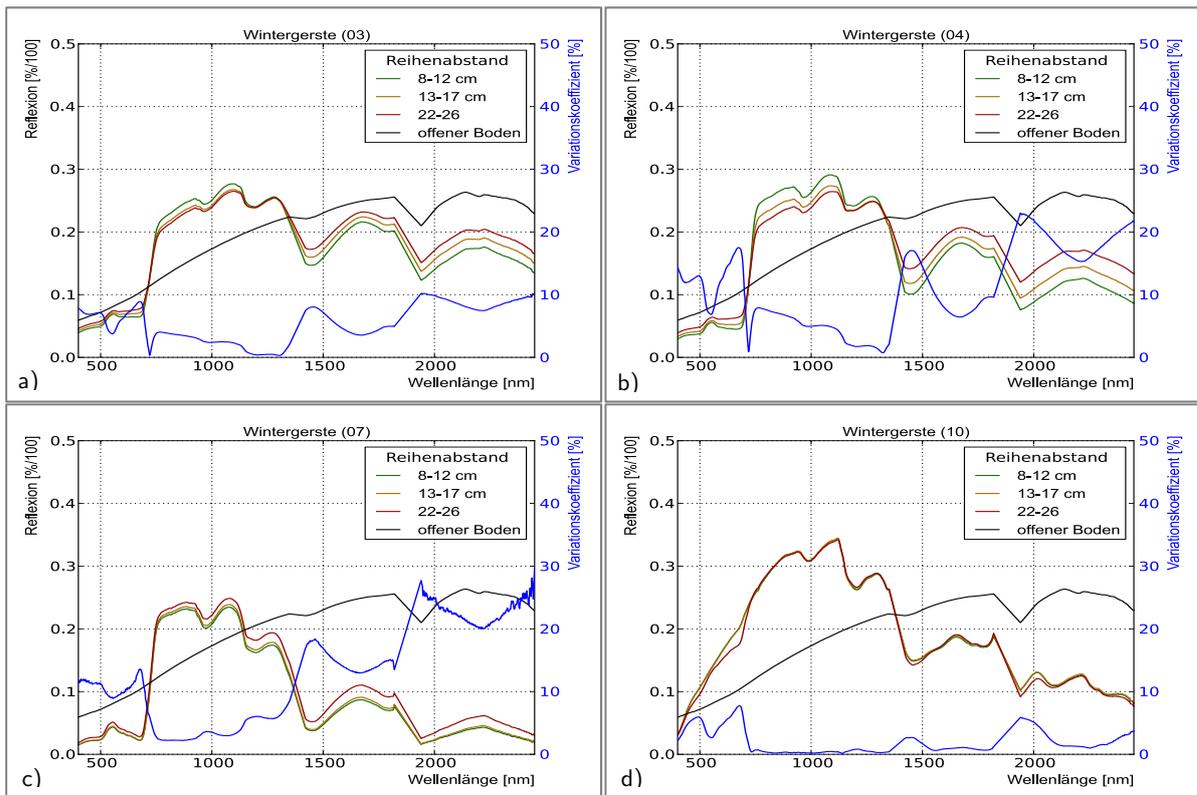


Abb. 6-5: Einfluss des Reihenabstands auf die Reflexion von Wintergerste in den Stadien a) Bestockung b) Schossen, c) Ährenschieben, d) Vollreife.

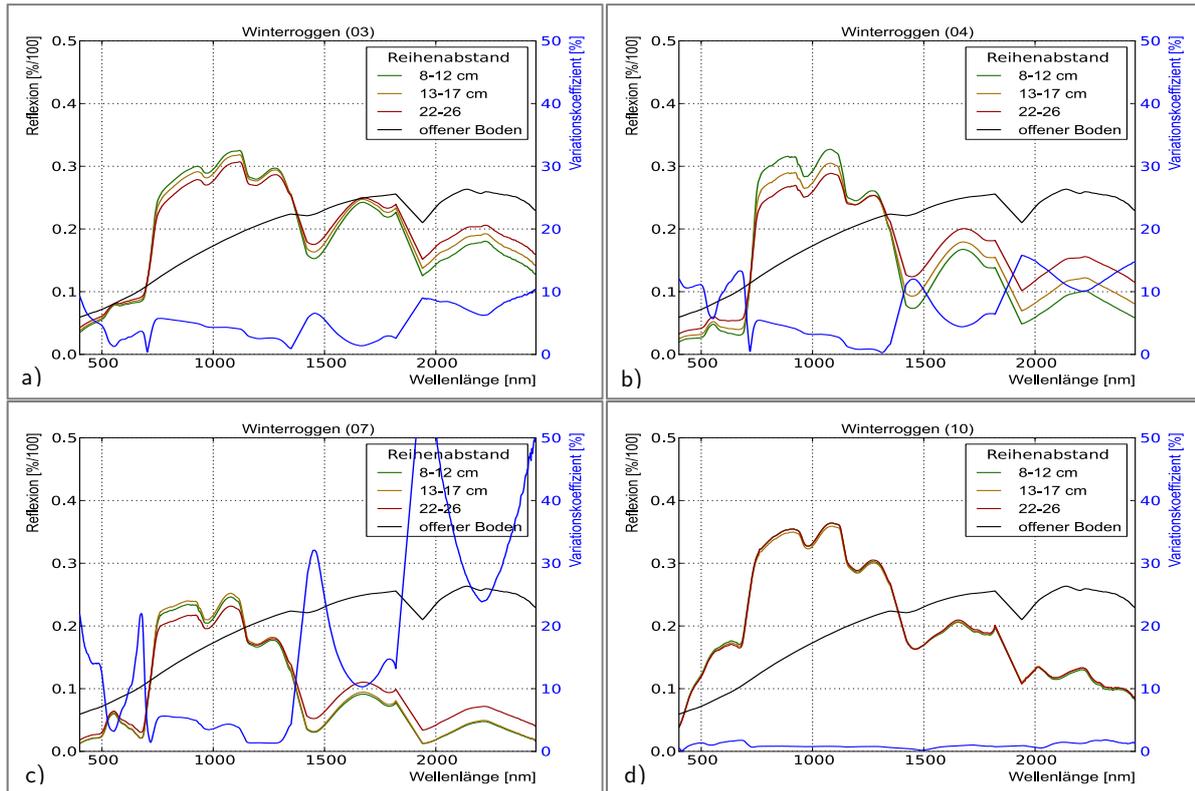


Abb. 6-6: Einfluss des Reihenabstands auf die Reflexion von Winterroggen in den Stadien a) Bestockung b) Schossen, c) Ährenschieben, d) Vollreife.

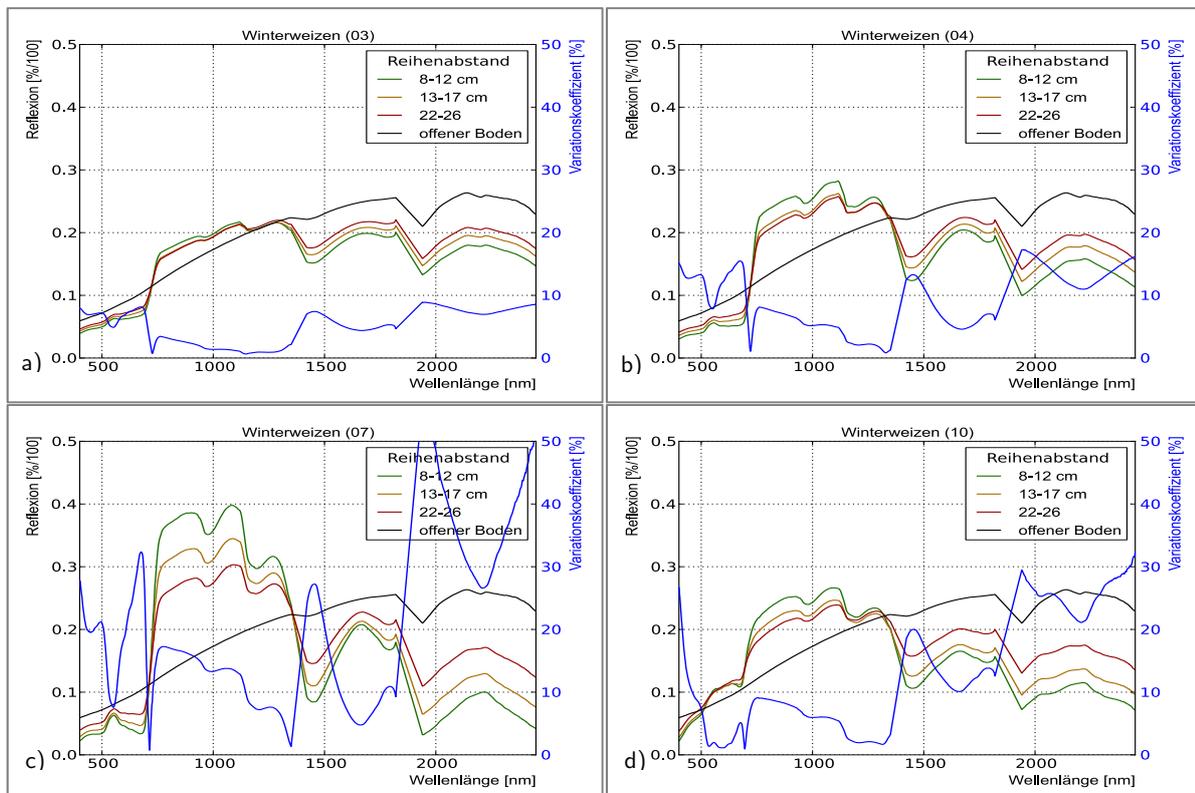


Abb. 6-7: Einfluss des Reihenabstands auf die Reflexion von Winterweizen in den Stadien a) Bestockung b) Schossen, c) Ährenschieben, d) Vollreife.

6.3 Einfluss der relativen Reihenorientierung

Die Pflanzreihen orientieren sich im Flachland zumeist an der Form des Feldes, wobei möglichst lange Saatzeilen bevorzugt werden, beziehungsweise in Hanglagen typischerweise quer zum Gefälle. Sobald der Bestand nicht Nadir bestrahlt oder durch den Sensor betrachtet wird, besitzt eine Änderung der Reihenorientierung, trotz gleichbleibender Anordnung der Pflanzen, einen Einfluss auf das Reflexionsverhalten eines Bestandes. Fällt die Strahlung parallel zu den Pflanzenreihen in den Bestand, ist der Anteil direkt bestrahlten Bodens höher als im Vergleich zu quer dazu orientierten Pflanzenreihen. Dies lässt sich ebenfalls auf nicht Nadir aufgezeichnete Fernerkundungsdaten übertragen, wobei eine veränderte Reihenorientierung zu Unterschieden des betrachteten Pflanze/Boden/Schatten-Verhältnisses führt.

Hierfür wird für die drei Beispielgetreidearten die Reihenausrichtung in 5° Schritten bis zu 180° variiert. In allen Simulationen werden identische Pflanzenmodelle verwendet, die unabhängig von der Reihenorientierung gleich ausgerichtet sind und eine konstante Pflanzendichte aufweisen. Die Simulationen erfolgen in dieser Form für die drei Reihenabstände 0 - 12 cm, 13 - 17 cm und 22 - 25 cm (siehe Tab. 6-6).

Tab. 6-6: Simulationskonfiguration zur Analyse des Einflusses der Reihenorientierung.

Reihenabstand [cm]	Pflanzendichte pro m	Reihen- orientierung	Pflanzen- orientierung	spektrale Information Pflanzen	spektrale Information Boden
8-12					
13-17	16	0°-180°	ungerichtet	je Stadium	konstant
22-25					

Die auf der Basis der Simulationsergebnisse errechneten Variationskoeffizienten zeigen für die Reihenabstände 8 - 12 cm und 13 - 17 cm keinen signifikanten Einfluss der Reihenorientierung auf das Reflexionsverhalten eines Bestandes (Abb. 6-8a und b). Unabhängig von der Pflanzenart und der phänologischen Entwicklung des Bestandes variieren die modellierten Reflexionswerte mit maximalen Variationskoeffizienten von unter 3% nur sehr gering. Die Streuungen weisen wellenlängenspezifische Unterschiede auf, aus denen sich jedoch kein genereller Trend besonders beeinflusster Wellenlängenbereiche ableiten lässt. Vielmehr lässt dies in Zusammenhang mit der geringen Streuung der modellierten Ergebnisse darauf schließen, dass die Varianz der Daten lediglich in verschiedenen Abschattungsbedingungen der Szenen, die durch unterschiedlich ausgerichtete Pflanzenmodelle bedingt sind, begründet ist.

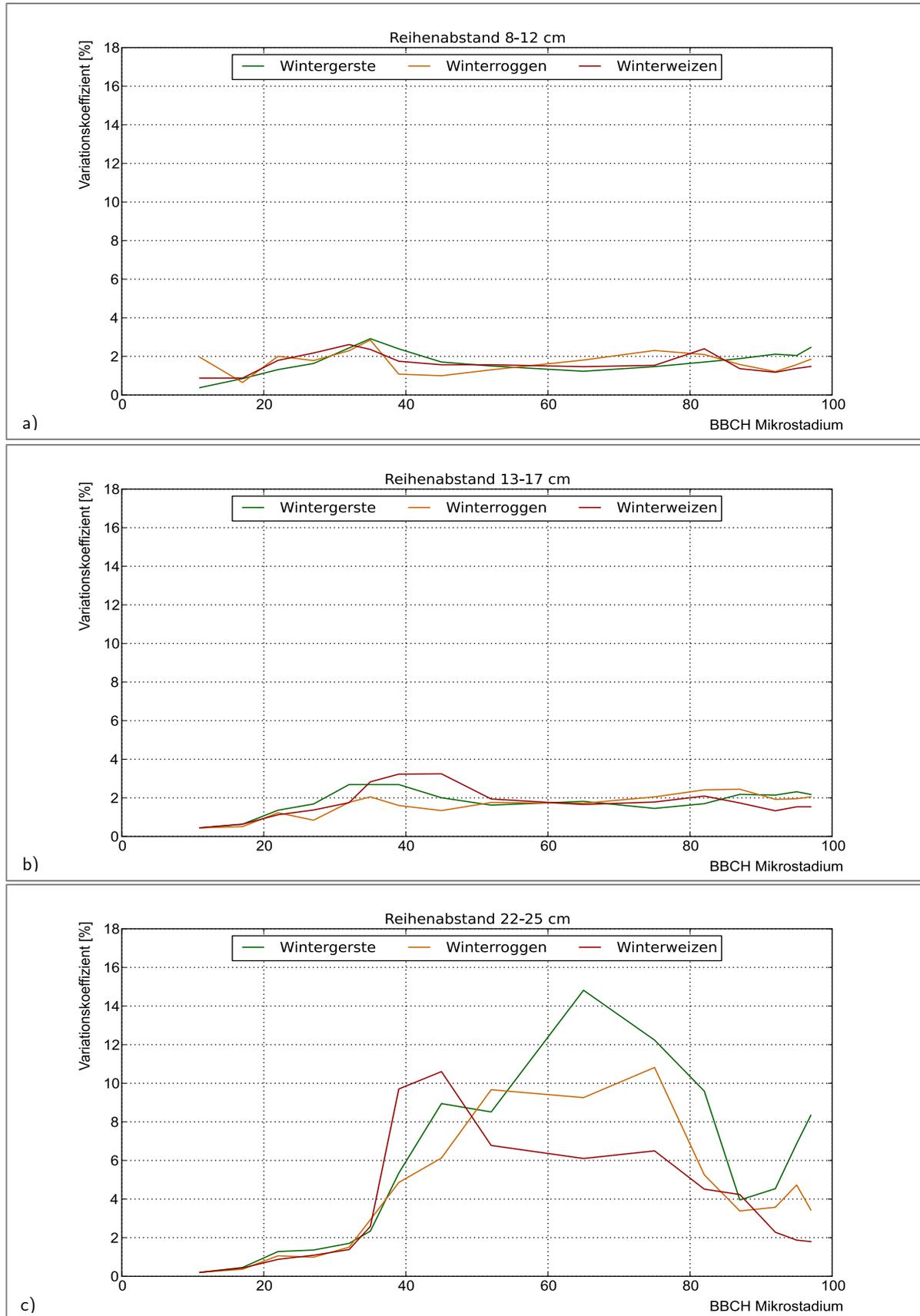


Abb. 6-8: Einfluss der Reihenorientierung auf die Varianz der Bestandsreflexion in Abhängigkeit des Reihenabstands.

Im Gegensatz dazu zeigen die Ergebnisse für einen Reihenabstand von 22 - 26 cm deutlich stärkere Einflüsse der Reihenorientierung auf das Reflexionssignal (Abb. 6-8 c). Die Bestockung führt zu einem starken Anstieg der Blattfläche der Pflanzen, was wiederum zu einem Anstieg der potenziellen Schattenflächen führt. Die sich durch eine geänderte Reihenorientierung ergebenden deutlichen Reflexionsunterschiede spiegeln sich in hohen Variationskoeffizienten wider. Exemplarisch ist der Unterschied zwischen beiden Reihenabständen in Abb. 6-9 am Beispiel von Wintergerste im Stadium der Fruchtentwicklung dargestellt.

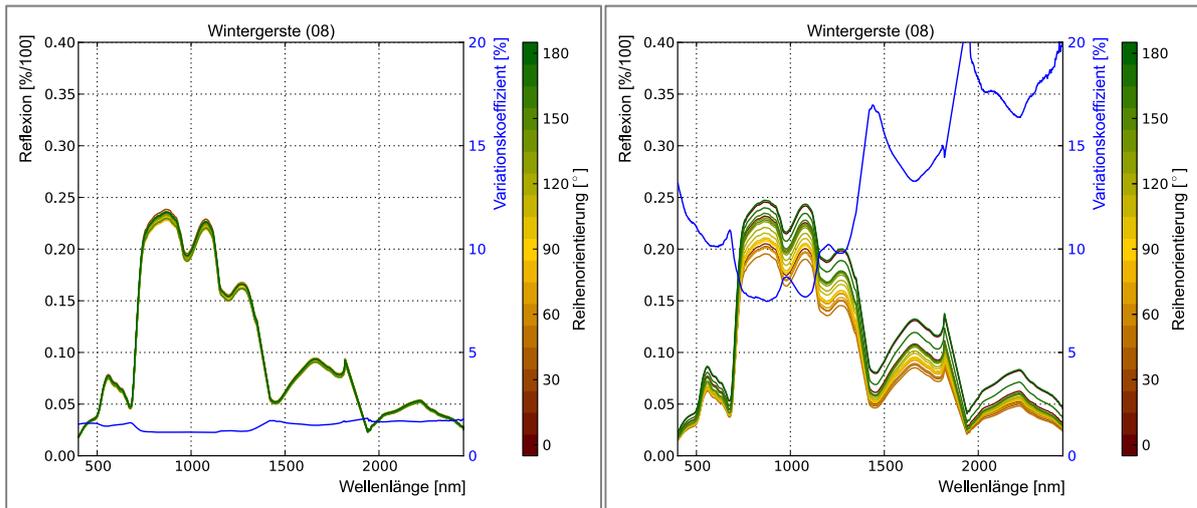


Abb. 6-9: Einfluss der Reihenorientierung auf die Bestandsreflexion (Nadir) bei einem Reihenabstand von 13 - 17 cm (links) und 22 - 26 cm (rechts).

Es stellt sich nun die Frage, ob eine Änderung des Reflexionsverhaltens des Bestandes mit der Reihenausrichtung korreliert. Hierfür werden für jede simulierte Reihenausrichtung (0° - 180° in 5° Schritten) jeweils der Mittelwert eines Spektrums errechnet und im Bezug zu ihrer Reihenausrichtung dargestellt (Beispiele siehe Abb. 6-10). Maßgeblich für den Einfluss der Reihenorientierung ist wiederum die phänologische Entwicklung und damit verbunden die Struktur des Bestandes. Die jungen Pflanzen besitzen eine sehr geringe Höhe, sodass die Schattenbildung nur schwach ausgeprägt ist. Mit zunehmender Pflanzenhöhe werden die Schattenbereiche größer, sodass während des Schossens ein deutlicher Zusammenhang erkennbar ist und es zur Ausbildung einer typischen Verlaufskurve kommt. Ausgehend von parallel zur Strahlungsquelle ausgerichteten Reihen resultiert eine zunehmende Rotation des Feldes in vermehrter Schattenbildung, die zu einer Reduzierung der Bestandsalbedo führt und bei ca. 90° Reihenorientierung minimale Werte aufweist. Mit der Ausbildung der Ähren sinkt der Einfluss des Reihenabstands wieder deutlich, da diese zu einer Homogenisierung der Bestandsreflexion beitragen. Im Stadium der Fruchtentwicklung ist dieser Verlauf weniger deutlich ausgebildet und es zeigen sich darüber hinaus sehr deutliche Unterschiede zwischen den Arten, welche auf die verschiedenen Ährenformen und Ährenausrichtungen zurückzuführen sind. In den späten Wachstumsstadien lassen sich hingegen keine oder nur sehr geringe Zusammen-

hänge zwischen der Reihenorientierung und der Bestandsreflexion erkennen. Die Zusammenstellung aller Simulationsergebnisse befindet sich für den Reihenabstand von 13 - 17 cm in Anhang F und für den Reihenabstand 22 - 26 cm in Anhang G.

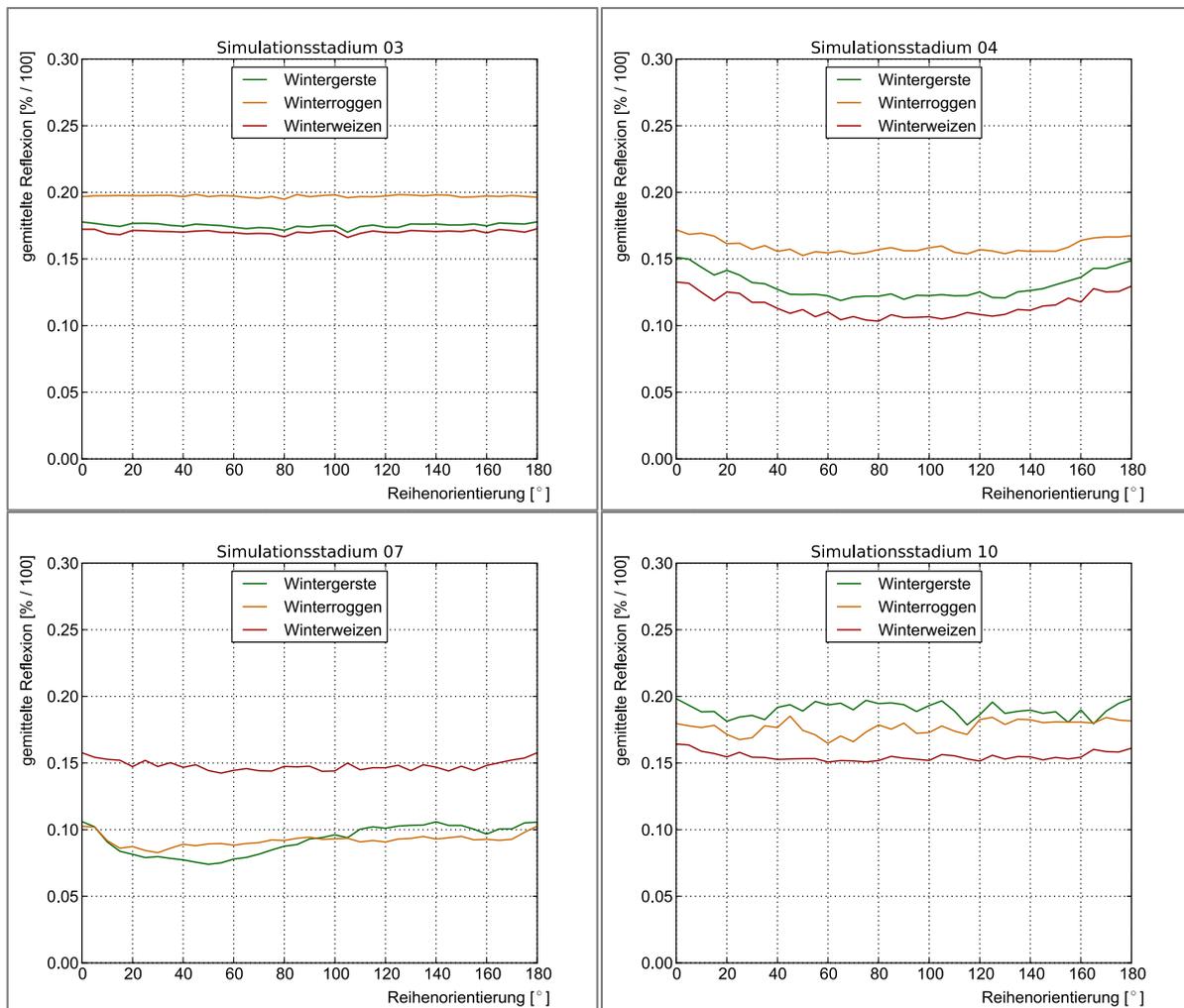


Abb. 6-10: Einfluss der Reihenorientierung auf die Reflexion (gemittelt über alle Kanäle) bei einem Reihenabstand von 22 - 26 cm.

6. 4 Einfluss der Verteilung der Pflanzen – Pflanzendichte

Üblicherweise werden die Pflanzensamen eines Schleges mit einer konstanten Drilldichte eingebracht, die je nach Art und Sorte variiert. Unterschiedliche Standortbedingungen (z.B. Bodenart und Bodenfeuchte) innerhalb eines Schleges können jedoch zu einer Dezimierung des Bestandes und damit zu einer räumlich variierenden Bestandsdichte führen.

Die Pflanzendichte wird für alle drei Arten von unbedecktem Boden bis hin zu 30 Pflanzen pro Meter variiert. Die Position und Ausrichtung der Pflanzen je Pflanzdichte ist für alle Arten und phänologische Stadien konstant, um Variationen des Reflexionsverhaltens durch diese auszuschließen. Im Rahmen der Felduntersuchungen traten im Vergleich

dazu typischerweise Pflanzdichten von 12 - 17 Pflanzen pro Meter auf, sodass durch die gewählte Simulationskonfiguration die natürliche Variabilität vollständig abgedeckt werden kann. Weitere Konfigurationsmerkmale sind in Tab. 6-7 dargestellt.

Tab. 6-7: Simulationskonfiguration für die Analysen des Einflusses der Pflanzdichte.

Reihenabstand [cm]	Pflanzendichte [Pflanzen pro m]	Reihenorientierung	spektrale Infor- mation Pflanzen	spektrale Infor- mation Boden
13 - 17	0 - 30	90°	phänologieabhängig	konstant

Die Stärke des Einflusses ist dabei speziell von der phänologischen Entwicklung des Bestandes abhängig. In Analogie zur Analyse des Einflusses des Reihenabstands führt ein im Vergleich zum reinen Bodensignal höheres Pflanzenspektrum zu einer Anhebung des Bestandsspektrums. Sinkt die Albedo der Vegetation unterhalb der des Bodens, dreht sich dieser Effekt um und die Albedo der weniger dicht bewachsenen Bestände ist im Vergleich zu dichten Beständen höher. Die zunehmende Bedeckung in den frühen Entwicklungsstadien der Pflanzen verstärkt den Einfluss und zeigt eine kontinuierliche Änderung der Bestandsreflexion mit zunehmender Pflanzendichte. Diese ist in Abb. 6-11 verdeutlicht, wo neben den Kontinuum bereinigten Reflexionsspektren für das Simulationsstadium drei (Ende der Bestockung) auch die Ergebnisse einer Regressionsanalyse der wellenlängenspezifischen Änderung der Albedo dargestellt sind. Hierfür wird für ausgewählte Wellenlängen (blau: 480 nm, grün: 554 nm, rot: 668 nm und NIR: 868 nm) die lineare, die logarithmische, die exponentielle und die Potenzfunktion berechnet und auf der Grundlage des Bestimmtheitsmaßes (R^2) diejenige Funktion ermittelt, welche die Daten mit dem höchsten R^2 beschreibt (siehe Tab. 6-8).

Tab. 6-8: Übersicht verwendeter Funktionen zur Beschreibung des Reflexionsverhaltens ausgewählter Wellenlängen.

Wellenlänge	Gerste 03	Gerste 09	Roggen 03	Roggen 09	Weizen 03	Weizen 09
480 nm	Lin	Pot	Lin	Pot	Lin	Pot
554 nm	Lin	Lin	Lin	Pot	Lin	Pot
688 nm	Lin	Pot	Lin	Pot	Lin	Pot
980 nm	Lin	Pot	Lin	Pot	Lin	Lin

Das Stadium drei wird ausschließlich durch lineare Funktionen (Tab. 6-8) und einem sehr hohen R^2 von $> 0,9$ beschrieben. Die Variation der Pflanzendichte zieht damit stets eine Änderung des Reflexionsverhaltens des Bestandes nach sich. Mit dem Hervortreten der Ähren ändert sich dieses Verhalten jedoch. Die größeren Pflanzen und speziell die Ähren führen zu einem Sättigungseffekt des Reflexionssignals, sodass eine weitere Verdichtung des Bestandes keine signifikante Änderung des Reflexionsverhaltens bedingt. In Abhängigkeit der Art und der phänologischen Entwicklung tritt dieser Effekt bei unterschiedlicher Pflanzendichte auf. Abb. 6-12 zeigt die Entwicklung des

Reflexionsverhaltens der drei Getreidearten zum Ende der Frucht- und Samenreife (Simulationsstadium neun). Das Reflexionssignal des Wintergerste- und Winterroggenbestandes erreicht bereits ab ca. acht Pflanzen pro Meter ein relativ konstantes Niveau, sodass eine weitere Pflanzenverdichtung nur noch geringe Änderung der Reflexion nach sich zieht. Der Zusammenhang zwischen den errechneten Funktionen und den simulierten Daten ist in einigen der analysierten Fälle jedoch nur sehr schwach ausgeprägt. Speziell die simulierten Daten für Wintergerste (Stadium neun) bei 480 nm weisen mit einem R^2 von 0.09 keinen Zusammenhang zu der ermittelten Funktion auf. Der Wertebereich dieser Daten ist sehr klein, sodass bereits geringe Unterschiede, die auf das Rauschen der Monte-Carlo Simulation zurückgehen, zu starken Abweichungen führen, so dass kein robuster funktionaler Zusammenhang zwischen den Daten hergestellt werden kann. Im Gegensatz dazu bildet sich dieser Effekt bei Weizen erst ab ca. 22 Pflanzen pro Meter aus. Eine Begründung hierfür lässt sich, in Analogie zur Analyse des Einflusses des Reihenabstands, in der Verstärkung der Volumenstreuung durch die begrannten Ähren (Gerste und Roggen) finden, wodurch die Bestandsreflexion maßgeblich durch die optischen Eigenschaften der Ähren und Grannen geprägt wird.

Der Zusammenhang zwischen der Pflanzdichte und dem Reflexionsverhalten eines Bestandes ist detailliert in Anhang H dargestellt.

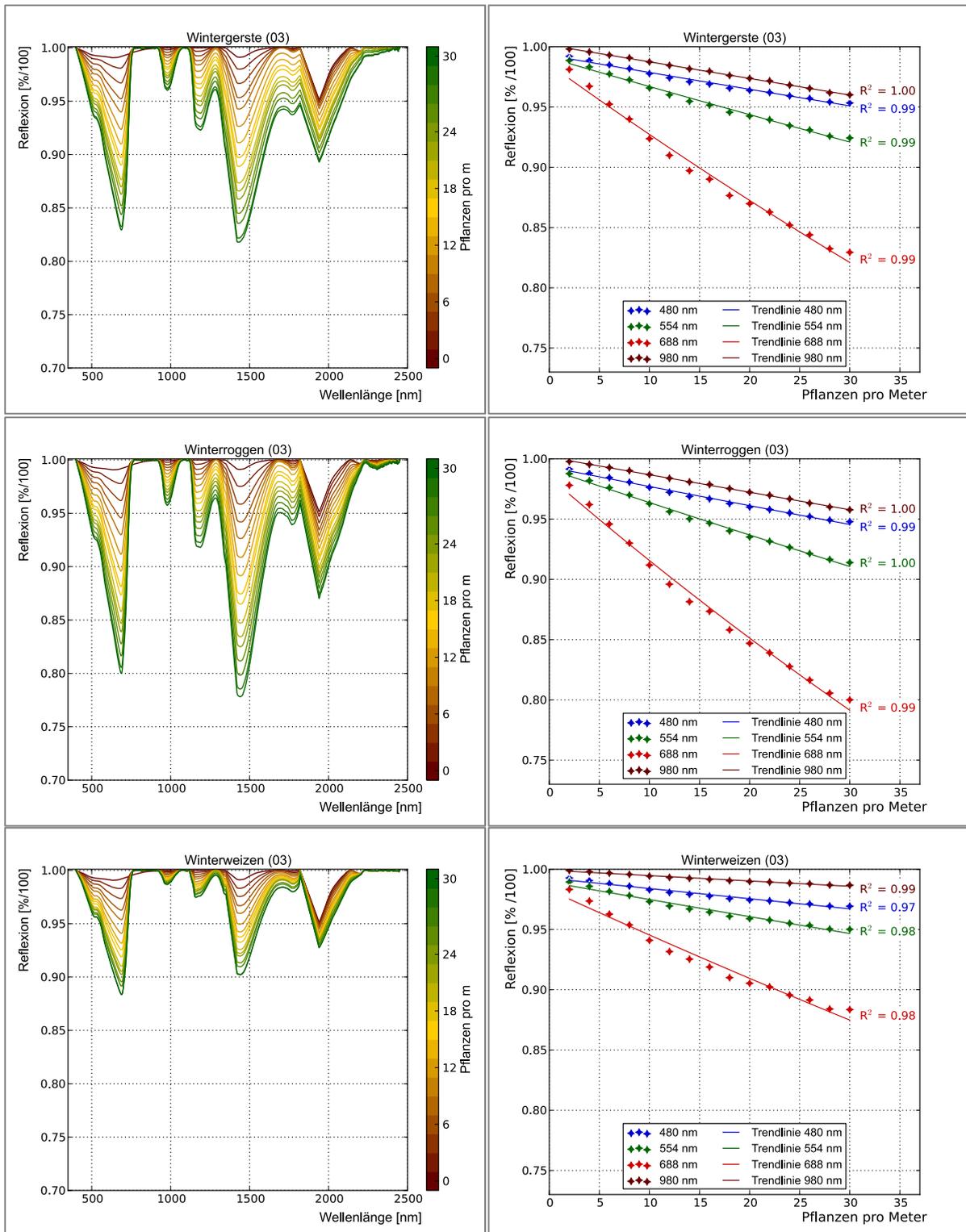


Abb. 6-11: Änderung des Reflexionsverhaltens (linke Spalte) und Regressionsanalyse des Einflusses der Pflanzendichte auf das Reflexionsverhalten bei Wellenlängen von 480 nm, 554 nm, 686 nm und 980 nm von Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen zum Ende der Bestockung, Stadium 3 (rechte Spalte).

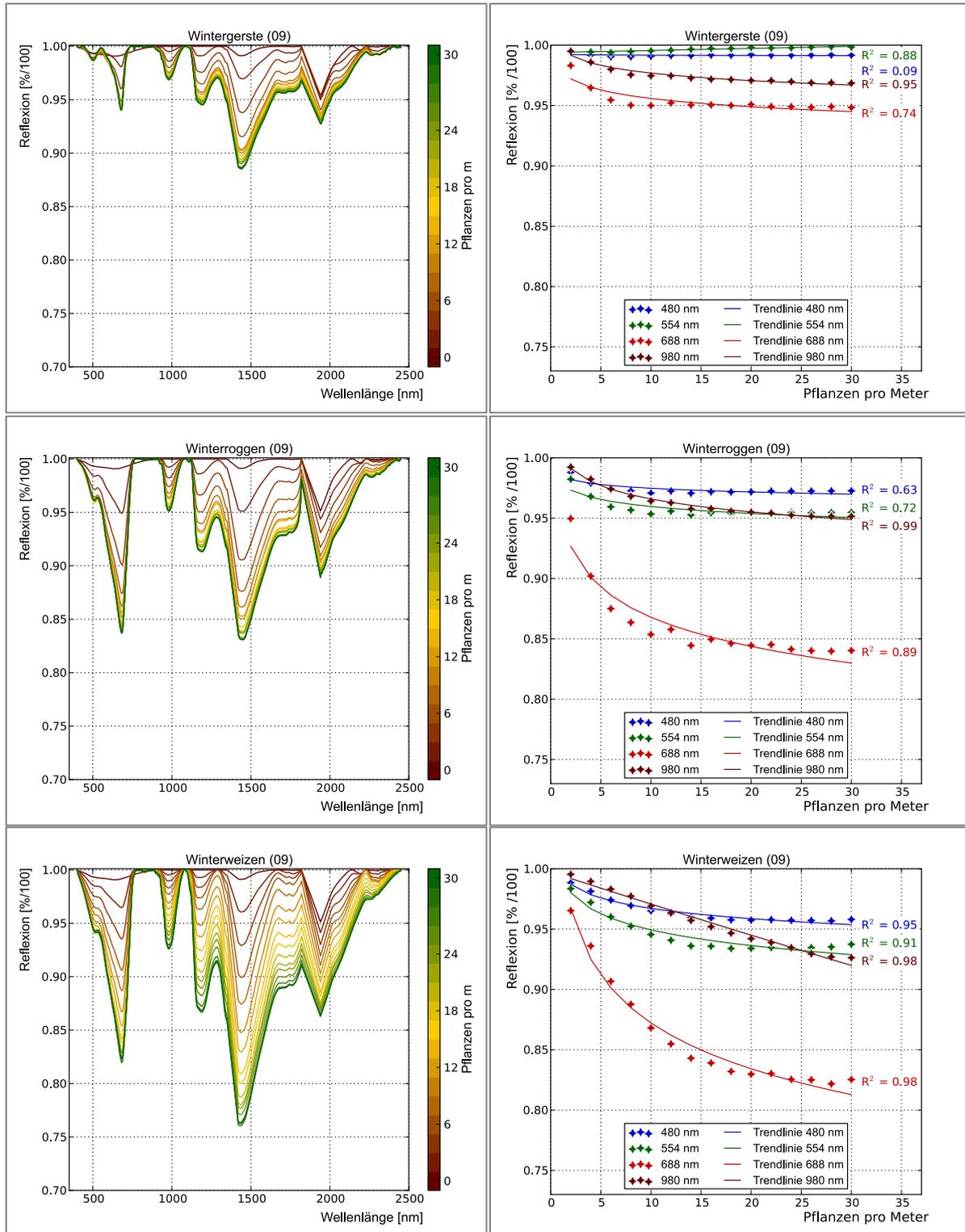


Abb. 6-12: Änderung des Reflexionsverhaltens (linke Spalte) und Regressionsanalyse des Einflusses der Pflanzendichte auf das Reflexionsverhalten bei Wellenlängen von 480 nm, 554 nm, 686 nm und 868 nm von Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen zum Ende der Frucht und Samenreife, Stadium 9 (rechte Spalte).

6.5 Einfluss des Bodensignals am Beispiel Bodenfeuchte

Neben den Pflanzen- und Bestandsparametern beeinflusst der Boden das Reflexionsverhalten eines Bestandes beträchtlich. Zum einen bestimmt er die Wachstumsvoraussetzungen der Pflanzen und damit deren strukturellen Aufbau, sowie deren Inhaltsstoffe und damit das Reflexionsverhalten des Organismus. Zum anderen besitzt der Boden einen direkten Einfluss auf das Reflexionssignal, was durch seine mineralische Zusammensetzung und weitere Eigenschaften, wie Feuchtigkeitsgehalt oder Verkrustung bestimmt ist.

In dieser Arbeit wird ausschließlich der direkte Einfluss des Bodensignals bei konstanten optischen und strukturellen Pflanzeigenschaften auf das Reflexionsverhalten des Bestandes untersucht. Variationen des Pflanzenwachstums aufgrund unterschiedlicher Nährstoffversorgung, bedingt durch Bodenunterschiede, stellen keine zentrale Fragestellung der Studie dar und werden nicht erörtert. Da ein Schlag üblicherweise durch relativ homogene Bodenverhältnisse geprägt ist, kennzeichnet die Bodenfeuchte, unter optischen Gesichtspunkten, den veränderlichsten Bodenparameter eines Standortes.

Zur Simulation wird für die drei Getreidearten, bei einem Reihenabstand von 13 - 17 cm, der Bodenfeuchtegehalt des Bodens variiert. Die Datengrundlage bilden im Labor schrittweise befeuchtete Bodenproben des Untersuchungsgebietes Wittbrietzen, die mit einem *ASD Fieldspec HiRes* gemessen wurden (siehe Kapitel 4.4.1 - Methodik der spektroskopischen Messungen). Die Veränderung der Bodenproben in Zusammenhang mit der spektralen Signatur sind in Abb. 6-13 dargestellt. Alle weiteren Simulationsparameter bleiben indes während der Simulation konstant (Tab. 6-9), sodass die Ergebnisse allein die Reflexionsänderung aufgrund der variierten Bodenfeuchte repräsentieren.

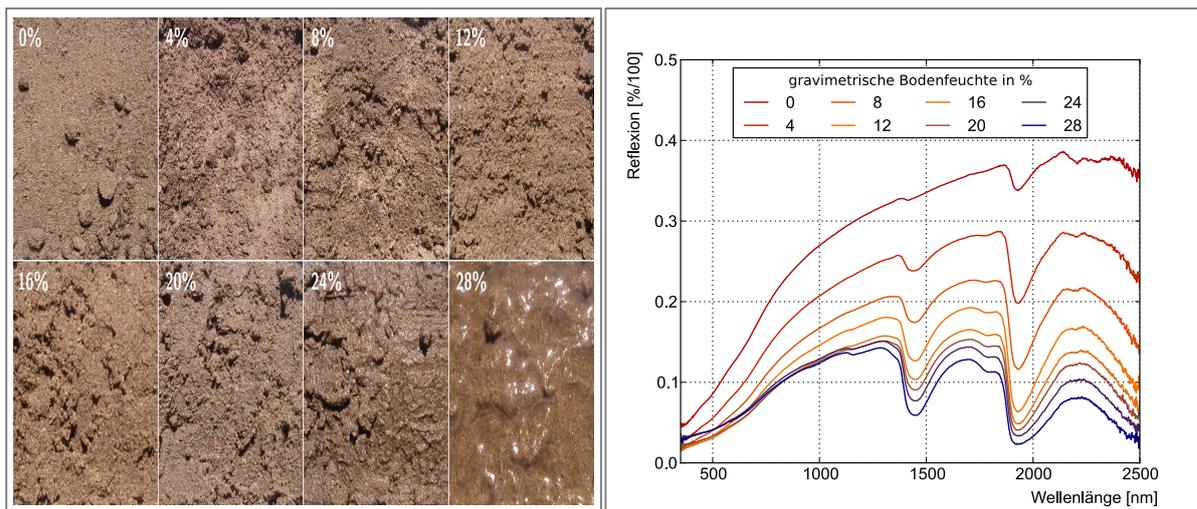


Abb. 6-13: Optische (links) und spektrale (rechts) Veränderung der für die Simulation verwendeten Bodenprobe mit zunehmender Bodenfeuchte.

Tab. 6-9: Simulationskonfiguration für die Analysen des Einflusses des Bodens.

Reihenabstand [cm]	Pflanzendichte [pro m]	Reihen- orientierung	Wachstum- stadien	spektrale Infor- mation Pflanzen	spektrale Infor- mation Boden
13 - 17	16	0°	alle	je Stadium	Bodenfeuchte variiert

Die Simulationsergebnisse zeigen einen signifikanten Einfluss der Bodenfeuchte auf das Reflexionsverhalten des Gesamtbestandes in Abhängigkeit von der phänologischen Entwicklung (Abb. 6-14) Dabei wird deutlich, dass in den frühen Entwicklungsstadien der Blattentwicklung (BBCH 0 - 9) und Bestockung (BBCH 10 - 19) der Einfluss der Bodenfeuchte auf die Bestandsreflexion aufgrund des geringen Verhältnisses von Pflanzen zu offenem Boden sehr hoch ist (Beispiel siehe Abb. 6-15, links). Der über alle Wellenlängen gemittelte Variationskoeffizient variiert in diesen Stadien zwischen ca. 50 % und ca. 30 %.

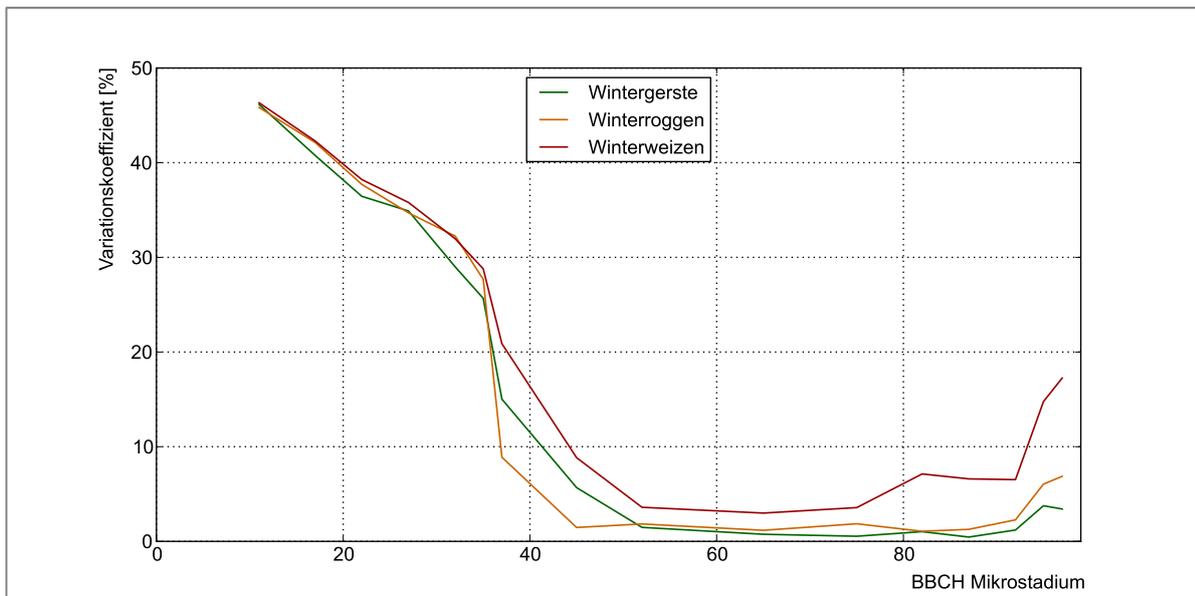


Abb. 6-14: Einfluss der Bodenfeuchte auf die Bestandsreflexion in Abhängigkeit von der phänologischen Entwicklung (BBCH).

Die mit dem Schossen (ab BBCH 30) verbundene rapide Zunahme des LAI und die damit einhergehende Änderung der Bestandsstruktur zieht eine starke Verringerung des Bodeneinflusses auf die Gesamtreflexion nach sich und führt mit dem Ährenschieben (ab BBCH 50) zu Variationskoeffizienten $< 5\%$ (Beispiel siehe Abb. 6-15, rechts). Kurzzeitige Schwankungen der Bodenfeuchte, die keine signifikante Änderung der Wasser- und Nährstoffversorgung der Pflanzen und damit der optischen Pflanzeigenschaften zur Folge haben, besitzen somit nahezu keinen Einfluss auf das Reflexionsverhalten eines Bestandes. Erst mit der zunehmenden Austrocknung und dem Absterben, was mit einer Reduzierung der sichtbaren Blattfläche einhergeht (ab BBCH 90), gewinnt der Boden wieder an Bedeutung.

Zudem fällt auf, dass der Einfluss des Bodens in Winterweizenbeständen stets größer ist als bei Winterroggen und Wintergerste. Es liegt nahe, dass die Grannen von Winterroggen und Wintergerste und die damit vergrößerte Volumenstreuung zu einer Homogenisierung der Bestandsreflexion führen und der Einfluss des Bodens im Vergleich zu Winterweizen minimiert wird. Die Ergebnisse aller Entwicklungsstadien der drei Getreidearten sind in Anhang I dargestellt.

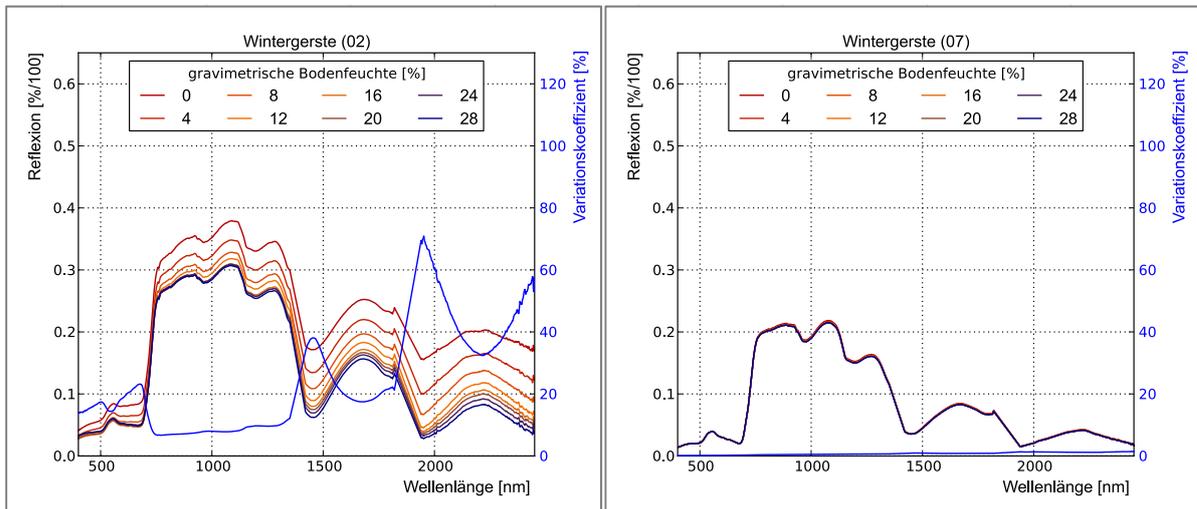


Abb. 6-15: Einfluss der Bodenfeuchte auf die Bestandsreflexion von Wintergerste für die Wachstumsstadien Bestockung (Stadium 2) und Ende Ährenschieben (Stadium 7).

6.6 Einfluss der Beleuchtungs- und Aufnahmegeometrie

Änderungen in der Beleuchtungs- sowie Aufnahmegeometrie ziehen stets Änderungen des Reflexionssignals eines Bestandes nach sich. Dabei kommt es innerhalb bzw. zwischen den Datensätzen aufgrund des FOV eines Sensors sowie optionaler Schwenkeigenschaften von Sensoren (z.B. *Chris/Proba* und *EnMAP*) zu blickwinkelabhängigen Variationen der Bestandsreflexion, die in der BRDF eines Bestandes abgebildet wird. Der Einfluss variierender Beobachtungswinkel auf das Reflexionsverhalten von Vegetationsbeständen ist in zahlreichen Studien zur BRDF untersucht worden (Hapke & Wells 1981; Sandmeier et al. 1998; Roberts 2001; Kuester 2011). Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen erstmals die Einflüsse einer variierenden Beobachtungsposition für einen kompletten phänologischen Zyklus von Getreidebeständen.

Neben den BRDF bedingten Einflüssen sind multitemporale Analysen stets durch Variationen des Sonnenstands beeinflusst, welcher in Abhängigkeit von der Struktur des Bestandes das Verhältnis von besonnten zu beschatteten Flächen maßgeblich bestimmt. Bei Satellitendaten mit sonnensynchroner Umlaufbahn liegen innerhalb einer Szene gleiche Einstrahlungsbedingungen vor. Bei multitemporal aufgezeichneten Daten eines

Gebietes führt dies jedoch zu einer Veränderung des Zenitwinkels der Sonne. Die Erfassung größerer Untersuchungsgebiete mit flugzeuggestützten Systemen erfordert oft die Aufzeichnung mehrerer Flugstreifen, was mit einer Veränderung des Sonnenstandes einhergeht. Je nach Schwadbreite des Sensors und Größe der Testfläche können von der Aufnahme des ersten bis zum letzten Flugstreifen mehrere Stunden vergehen.

Für die Untersuchung einstrahlungsbedingter Reflexionsunterschiede werden für das Untersuchungsgebiet Wittbrietzen die Azimut- (θ_s) und Zenitwinkel (ϕ_s) der Sonne für 7 Tage zwischen März und September zu jeder vollen Stunde ± 3 h des Sonnenhöchststandes (11 Uhr UTC) berechnet (grafische Darstellung der Sonnenposition siehe Abb. 6-16). Für jeden dieser Sonnenstände und jedes modellierte phänologische Stadium werden zusätzlich Simulationen quer zur Hauptebene (engl. *cross plane*) durchgeführt, wobei der Sensorwinkel um $\pm 30^\circ$ vom Zenit aus in 5° Schrittweiten variiert wurde. Die bestandsstrukturellen und bestandsoptischen Komponenten bleiben für diese Simulationen hingegen konstant (siehe Tab. 6-10). Die Variation der drei Parameter Sensorblickwinkel, Aufnahmezeit und -datum ermöglicht die separate Analyse des jeweiligen Einflusses, wobei lediglich einer dieser Parameter in den Untersuchungen geändert wird.

Tab. 6-10: Simulationskonfiguration für die Analysen des Einflusses der Beleuchtungs- und Aufnahmegeometrie.

Reihenabstand [cm]	Pflanzendichte [pro m]	Reihenorientie- rung	Wachstums- stadien	spektrale Infor- mation Pflanzen	spektrale Infor- mation Boden
13 - 17	16	0°	alle	je Stadium	konstant

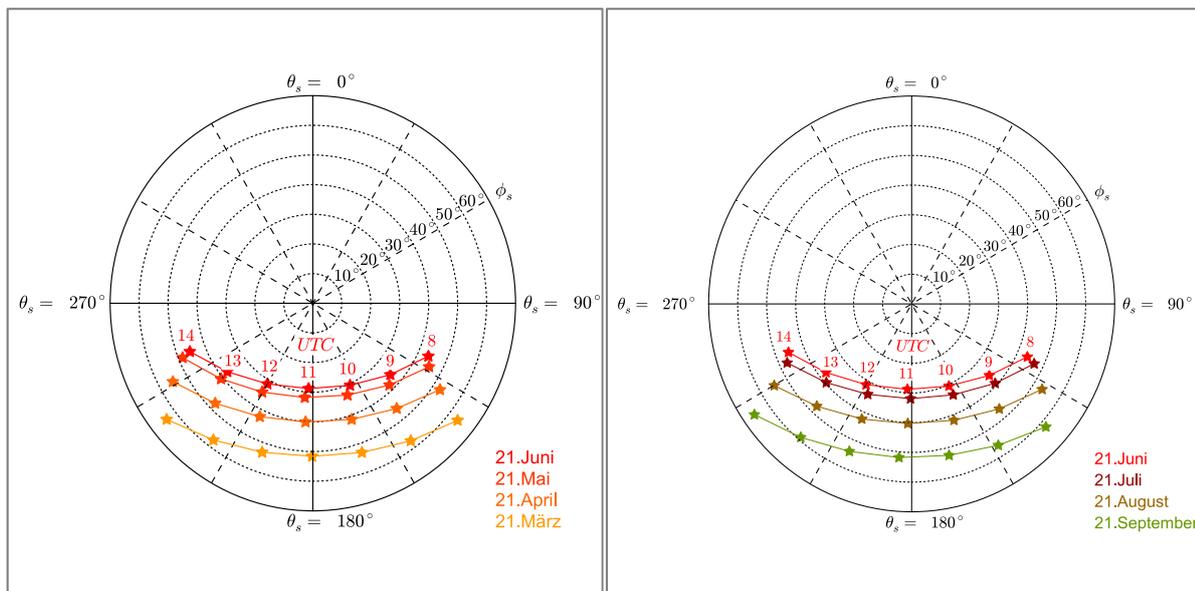


Abb. 6-16: Veränderung des Sonnenstandes für das UG-Wittbrietzen in Abhängigkeit von Aufnahmedatum und Uhrzeit (UTC), Angabe des Zenitwinkels (ϕ_s) und des Azimutwinkels (θ_s) der Sonne.

6.6.1 Einfluss des Sensorblickwinkels

Die Variation des Sensorzenitwinkels quer zur Hauptachse führt in den simulierten Daten, in Abhängigkeit von der phänologischen Entwicklung und der Pflanzenart, zu durchschnittlichen Reflexionsunterschieden von bis zu 13 % (vgl. Abb. 6-17). In den frühen Wachstumsstadien bis zum Ende des Schossens zeigt sich eine stete Erhöhung der spektralen Variabilität der simulierten Daten, was aus der zunehmenden Pflanzenhöhe und der damit verbundenen Änderung des vom Sensor erfassten Pflanzen/Boden-Verhältnisses resultiert. Das Auftreten der Ähren, welches den sichtbaren Vegetationsanteil im Bezug zum Boden nochmals anhebt, resultiert bei allen drei Arten bis zur Frucht- und Samenreife in einer deutlichen Erhöhung der spektralen Variabilität. Im weiteren Verlauf der phänologischen Entwicklung und der damit verbundenen Austrocknung der Pflanzen knicken die Ähren zunehmend ab und die Blattfläche wird durch zusammenrollen und abbrechen von Blättern reduziert. Dies führt wiederum zu einer Homogenisierung der Bestandsreflexion, sodass die Variationskoeffizienten sinken.

Die in Abb. 6-18 dargestellten Ergebnisse zeigen diesen Verlauf anhand von vier phänologischen Phasen für Winterroggen beispielhaft auf. Der wellenlängenspezifische Einfluss wird hierbei sehr deutlich, da es trotz gleicher Winkelvariationen aus dem Zenit ($+30^\circ$ vs. -30°) zu Unterschieden im Reflexionsverhalten kommt. Hierfür können sowohl die Reihenorientierung als auch die Orientierung der Ähren verantwortlich sein, welche sich in der BRDF eines Bestandes widerspiegeln können.

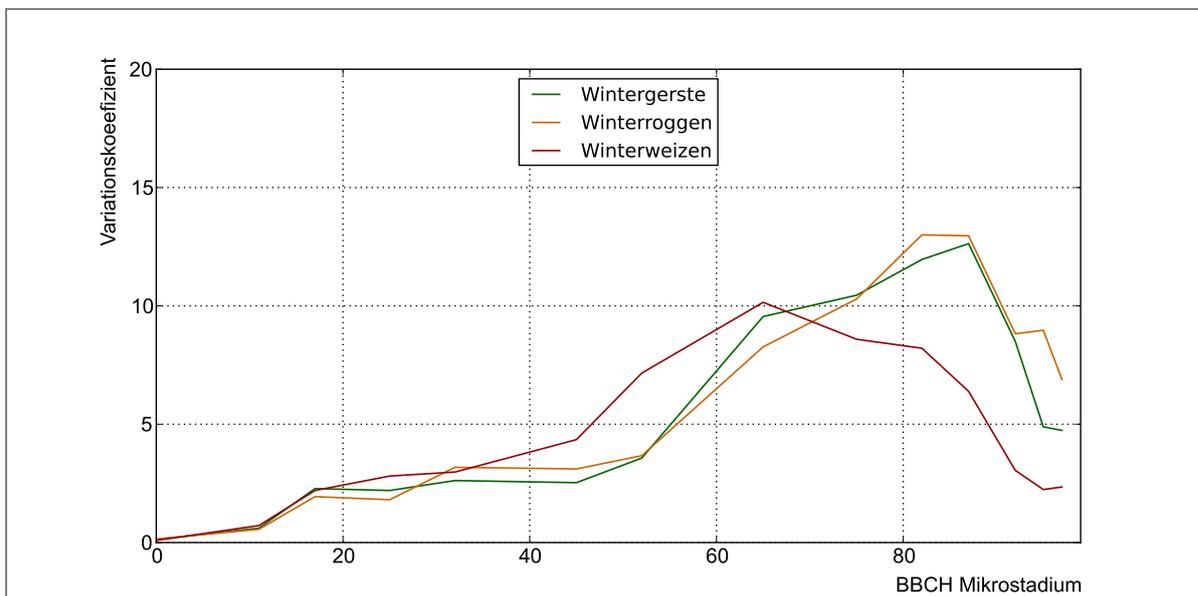


Abb. 6-17: Veränderung des Variationskoeffizienten bei variierendem Sensorzenitwinkel für Wintergerste, Winterroggen und Winterweizen.

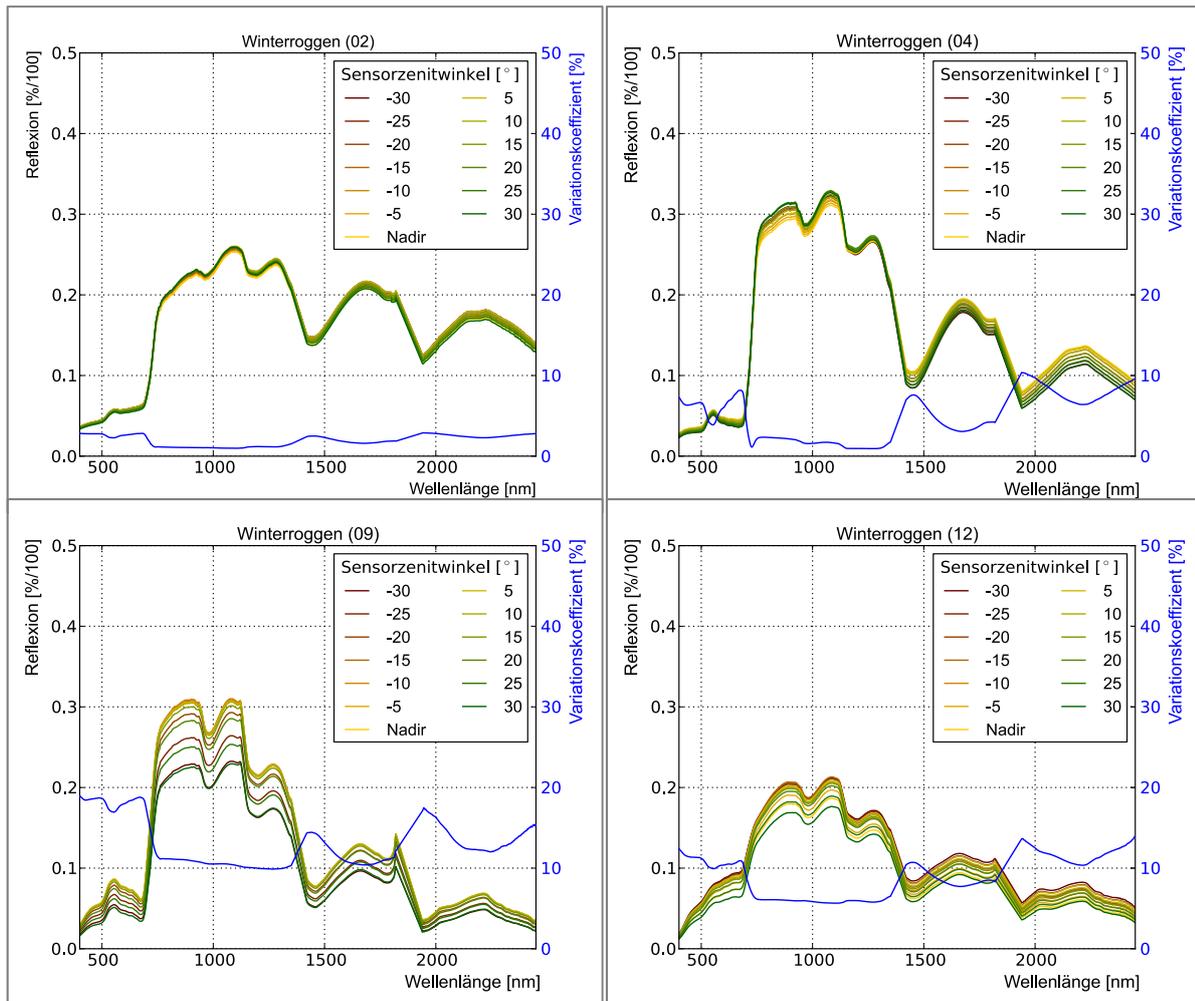


Abb. 6-18: Einfluss des Sensorzenitwinkels auf das Reflexionsverhalten am Beispiel von Winterroggen in den Stadien Bestockung (02), Schossen (04), Beginn der Frucht- und Samenreife (09) und Absterben (12) bei einem Sonnenstand vom 21.06.2012 für das UG-Wittbrietzen.

6.6.2 Einfluss der Aufnahmezeit

Die Simulationsergebnisse zeigen für alle Arten und phänologische Stadien ein analoges Verhalten, welches anhand zweier Wachstumsstadien (Schossen - 04 und Beginn Frucht- und Samenreife - 09) dargestellt ist (Abb. 6-19, links und Abb. 6-20, links). Die mittleren wellenlängenspezifischen Variationen der Bestandsreflexion sind bei Nadirbeobachtung für alle analysierten Arten und Wachstumsphasen sehr gering (im Durchschnitt $< 3\%$). Die Unterschiede ergeben sich aus Variationen des Schattenwurfes, was auf den geänderten Sonnenstand zurückzuführen ist. Darüber hinaus zeigen sich bei gleichen zeitlichen Abständen vor bzw. nach dem Sonnenhöchststand vergleichbare Albedowerte in den simulierten Daten. Geringe Unterschiede lassen sich wieder auf eine Beeinflussung durch die gleichartige Ausrichtung der Pflanzreihen sowie der Pflanzen bzw. der Ähren erklären. Weicht der Aufnahmewinkel des Sensors vom Nadir ab, vergrößert sich mit Zunahme des Zenitwinkels der Einfluss des Sonnenstandes je nach Entwicklungsstand des Bestandes zum Teil beträchtlich (Abb. 6-19, rechts und

Abb. 6-20, rechts). Des Weiteren führt die veränderte Aufnahmegeometrie dazu, dass die Reflexion im Bereich der Vorwärts- bzw. Rückwärtsstreuung stattfindet, was zu einer gerichteten Entwicklung in der Albedo des Bestandes führt. In den Abb. 6-19 und Abb. 6-20 werden für die Nicht-Nadir Aufnahmen der Sensorblickwinkel jeweils $\pm 30^\circ$ gewählt, was mit fortschreitender Uhrzeit zu einer kontinuierlichen Anhebung bzw. Absenkung der Albedo der simulierten Bestandsreflexion führt.

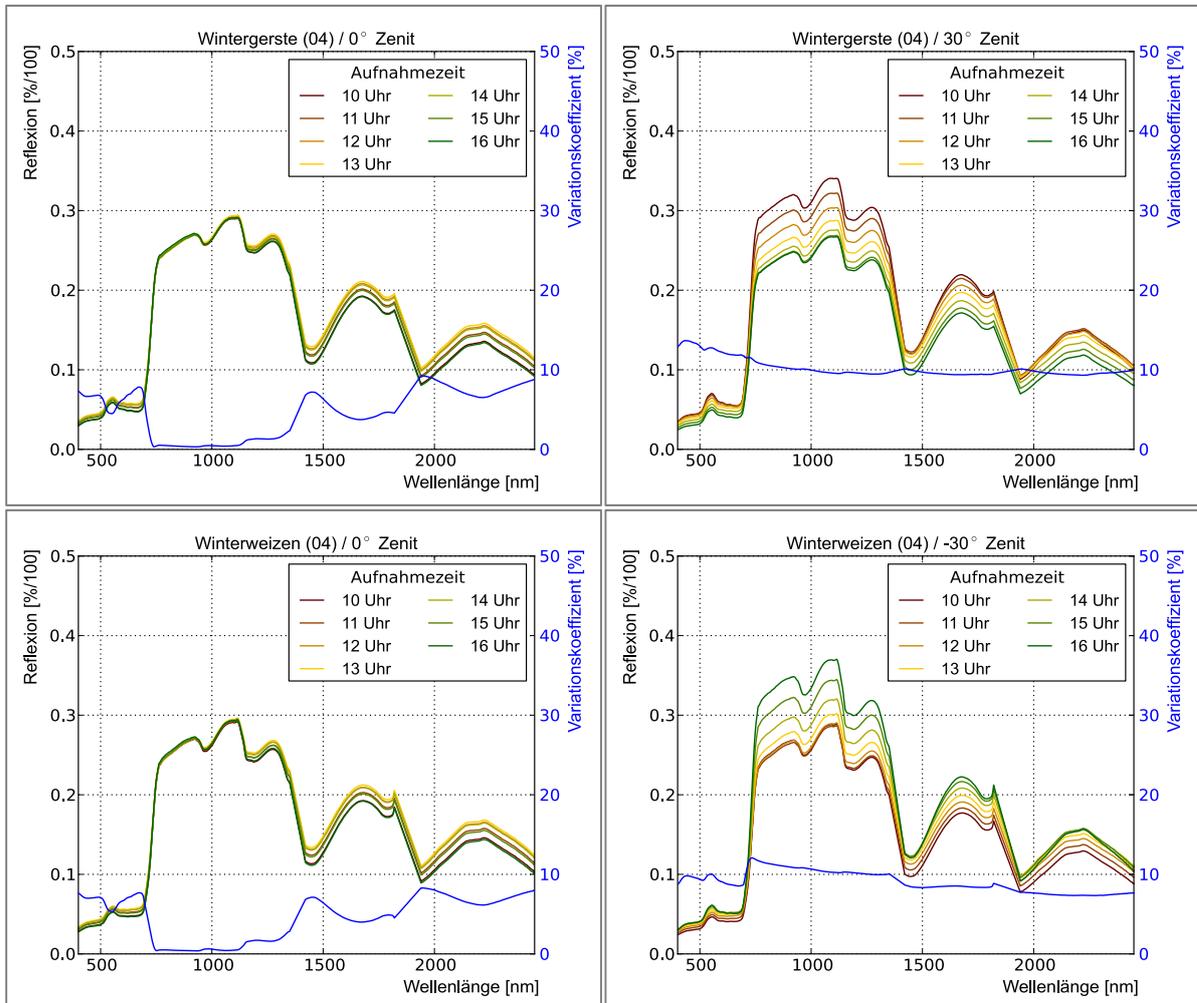


Abb. 6-19: Einfluss von Aufnahmezeit und Sensorblickwinkel auf die Reflexion von Winterroggen und Winterweizen im Schossen (Sonnenstand am 21.06.2012).

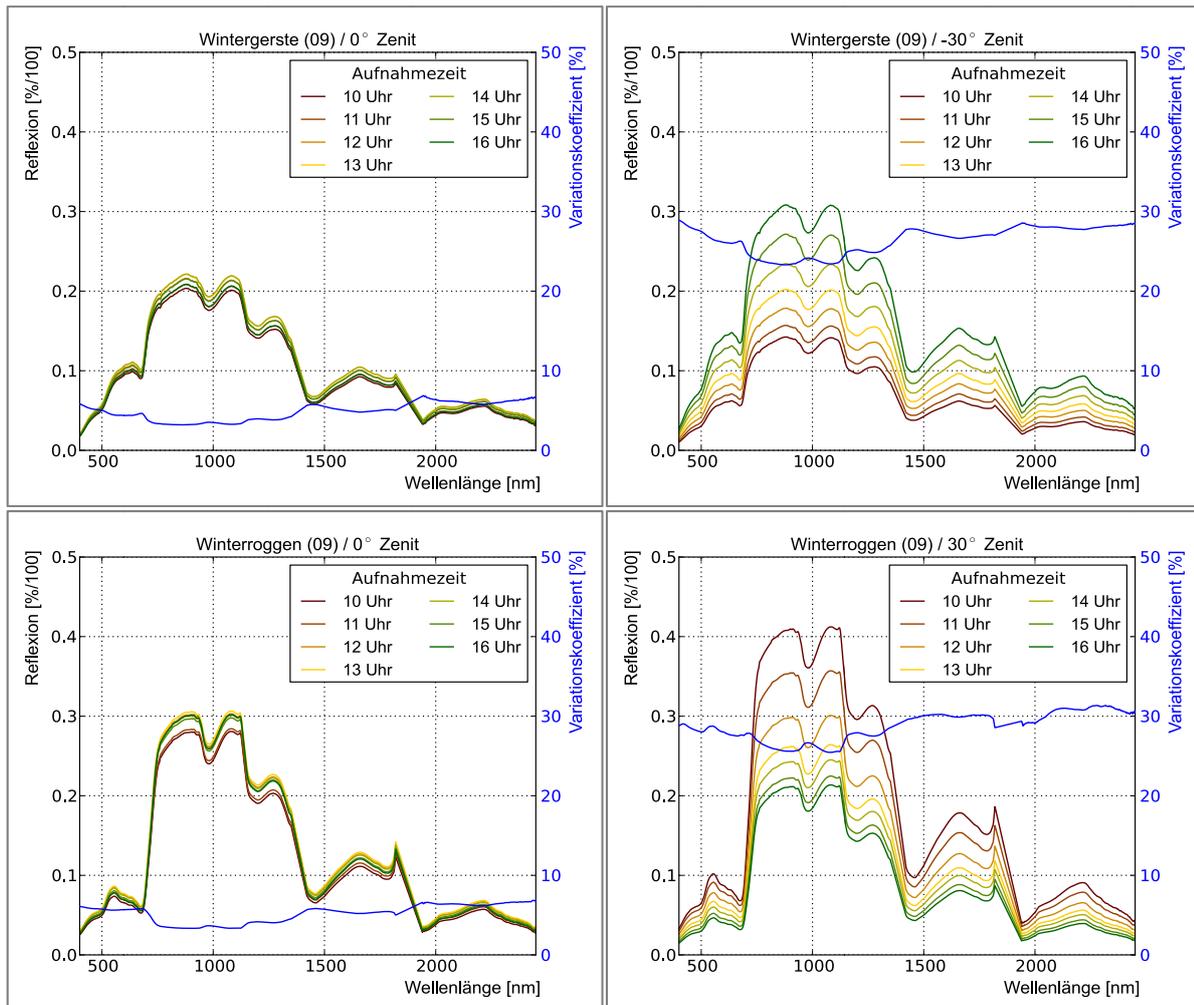


Abb. 6-20: Einfluss von Aufnahmezeit und Sensorblickwinkel auf die Reflexion von Wintergerste und Winterweizen in der Frucht- und Samenreife (Sonnenstand am 21.06.2012).

6. 7 Bedeutung der analysierten Parameter auf das Reflexionssignal von Pflanzenbeständen und deren Relevanz für die Klassifizierung

Die Analyse des Einflusses bestandsstruktureller Parameter auf die Bestandsreflexion stellt eine der Kernfragestellungen der vorliegenden Arbeit dar. Die zuvor beschriebenen Ergebnisse zeigen eine enge Kopplung der Intensität des Einflusses der untersuchten Parameter von der phänologischen Entwicklung der Pflanzenbestände. Für die Generierung von Trainingsdaten für die Klassifizierung ist daher die Simulation aller in den Bilddatensätzen potenziell vorkommenden Arten und Wachstumszustände notwendig.

Der Reihenabstand (siehe Abschnitt 6. 2) beeinflusst die Bestandsreflexion speziell in den mittleren Entwicklungsstadien (Schossen bis Ende der Fruchtentwicklung) sehr stark. Dabei sind die Variationen des Reflexionssignals im Bereich des VIS, sowie des SWIR (1400 - 2500) besonders ausgeprägt und können in Abhängigkeit der Wellenlänge bis zu 50% betragen. Da von Variationen des Reihenabstands innerhalb eines Schlages

jedoch aufgrund von maschineller Saat nicht auszugehen ist, kann ein konstanter Reihenabstand für die Simulation von Trainingsdaten angenommen werden.

Für die Reihenorientierung ergeben sich mit Ausnahme des weiten Reihenabstandes (22 - 26 cm) nur sehr geringe Variationskoeffizienten von $< 3\%$, sodass dieser Parameter keine besondere Relevanz zur Realisierung der natürlichen Variabilität der Bestandsreflexion besitzt. Im Gegensatz dazu ist der Einfluss der Pflanzendichte auf die Bestandsreflexion erwartungsgemäß sehr hoch. In der Natur können aufgrund heterogener Boden-, Wasser-, oder Nährstoffverhältnisse innerhalb eines Schlates mitunter deutliche Schwankungen in der Pflanzendichte auftreten. Die Abbildung natürlicher und potenziell heterogener Standortverhältnisse erfordert somit eine starke Variation der Pflanzendichte im Simulationsprozess.

Neben der Bedeutung struktureller Bestandsparameter verdeutlichen die Ergebnisse die Relevanz der Beleuchtungs- und Aufnahmegeometrie. Die Simulation der Trainingsdaten sollte den FOV des Sensors und die zur Aufnahmezeit des zu analysierenden Datensatzes vorherrschenden Beleuchtungsgeometrie berücksichtigen.

7 **Klassifizierung optischer Fernerkundungsdaten auf der Basis modellierter Reflexionsdaten**

Die am häufigsten verwendete Methode zur Klassifizierung von Fernerkundungsdaten beruht auf der Parametrisierung eines Klassifizierers anhand von Trainingsgebieten innerhalb des zu bewertenden Bilddatensatzes. Zur Auswahl dieser Flächen sind detaillierte Kenntnisse über die Verteilung der zu klassifizierenden Oberflächen notwendig. Die Validierung dieser Daten ist dabei oft mit erheblichem Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Sind derartige Informationen für einen Bilddatensatz nicht verfügbar, schränkt dies die Klassifizierungsmöglichkeiten stark ein. Die Verwendung simulierter Reflexionsdaten als Trainingsdaten stellt daher eine potenzielle Alternative für die Klassifizierung von Fernerkundungsdaten dar, wobei eine Ground-Truth-Daten unabhängige Parametrisierung des Klassifizierers erfolgt. In den folgenden Abschnitten wird das Potenzial simulierter Reflexionsdaten auf Basis realitätsnaher virtueller 4D-Bestände als Trainingsdaten für eine Klassifizierung, anhand von Anwendungsbeispielen auf multi- und hyperspektralen Fernerkundungsdaten, untersucht.

7.1 **Simulation von Trainingsdaten für die Klassifizierung**

Die Simulation der für die Parametrisierung eines Klassifizierers notwendigen Trainingsdaten erfolgt auf Basis der im Kapitel 6 beschriebenen Analysen. Da die phänologische und damit strukturelle Entwicklung eines Bestandes die bedeutendste Änderung von Vegetationsbeständen darstellt, werden für jeden zu klassifizierenden Datensatz, auf Grundlage der vom Deutschen Wetterdienst zu Verfügung gestellten Daten zum Auftreten phänologischer Phasen im 50-jährigen Mittel in Brandenburg (1960 - 2009), die zum Aufnahmezeitpunkt möglichen Wachstumsstadien bestimmt und spezifisch simuliert (Abb. 7-1).

Für die Simulationen wird der mittlere Reihenabstand auf 13 -17 cm festgelegt, welcher den Referenzmessungen des Untersuchungsgebietes Wittbrietzen entspricht. Da für un-

bekannte Untersuchungsgebiete nicht von der spezifischen Kenntnis über die vorherrschenden Reihenabstände ausgegangen werden kann, wird bewusst auf eine Anpassung an die tatsächlichen Bedingungen der weiteren Untersuchungsgebiete verzichtet. Weil ebenfalls keine Kenntnisse über die schlagspezifischen Bodenverhältnisse vorausgesetzt werden können, ist in gleicher Weise ein „Standardboden“ für alle Simulationen zu integrieren. Die potenziell sehr starken Schwankungen der Pflanzendichte, welche sich auf unterschiedlichste Gründe zurückführen lassen, werden über die Variation der Pflanzendichte von sehr lichten Beständen mit 6 PpM bis zu sehr dichten Beständen mit 38 PpM abgebildet.

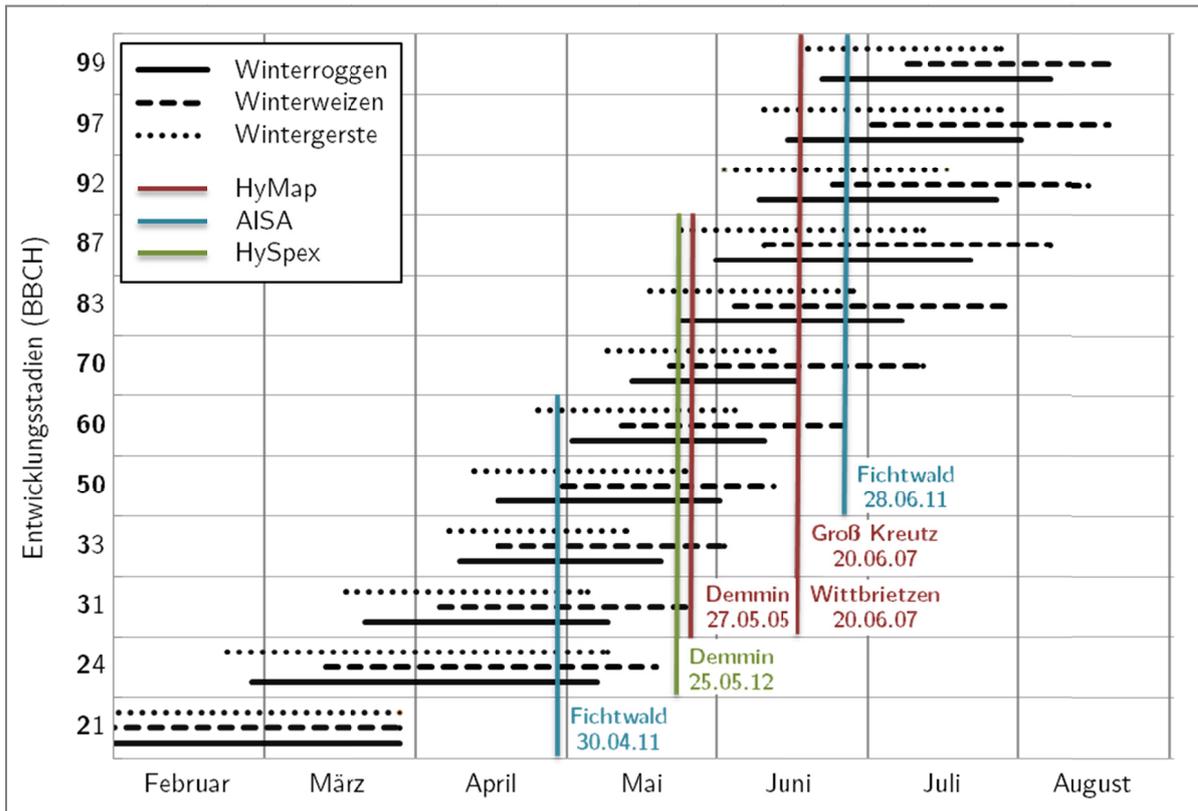


Abb. 7-1: Darstellung der für die Aufnahmezeitpunkte der Bilddaten möglichen Entwicklungsstadien für Winterroggen, Winterweizen und Wintergerste.

Neben der Bedeutung struktureller Bestandsparameter ist die Beleuchtungs- und Aufnahmegeometrie von großer Relevanz für das Reflexionsverhalten eines Getreidebestandes. Die Aufnahmegeometrie der genutzten Fernerkundungssysteme unterscheidet sich sehr stark voneinander. Der Öffnungswinkel und damit der Blickwinkel auf die Erdoberfläche variiert systembedingt von 24° (AISA) bis zu $61,3^\circ$ (HyMap). Da eine sensorspezifische Modellierung aufgrund hoher Rechenzeiten nicht für jede Bildspalte realisierbar ist, werden für die Simulationen sieben verschiedene Sensorblickwinkel simuliert. Für den HyMap Sensor bedeutet das z.B. eine Variation von $\pm 30^\circ$ aus dem Zenit in 5° Schritten. Die Beleuchtungsgeometrie ist an das jeweilige Untersuchungsgebiet und die Aufnahmezeit der zu klassifizierenden Bilddaten angepasst. Aus diesen Variationen resultieren pro Pflanzenart und Wachstumsstadium 780 simulierte Bestandsreflexions-

spektren, welche die Datengrundlage für die sich anschließende Klassifizierung bilden. Die verwendeten Parameter und der Sensorblickwinkel sind in Tab. 7-1 zusammengefasst.

Für die Testgebiete Wittbrietzen (2007), Groß Kreutz (2007) und Demmin (2005) stehen hyperspektrale Flugzeugscannerdaten (Systeminformationen siehe Kapitel 2.2.2) des *HyMap* Sensors zur Verfügung, die im Rahmen der HyEurope Kampagne des DLR-Oberpfaffenhofen befliegen wurden. Im Jahr 2012 erfolgte eine Befliegung des UG Demmin mit dem *HySpex* Sensor, im Rahmen der Inbetriebnahmephase (engl. *Commissioning Phase*) des Systems des DLR-Oberpfaffenhofen. Für das Untersuchungsgebiet Fichtwald werden *AISADual* Daten für die Klassifizierung verwendet. Die räumlichen Auflösungen der Befliegungen variieren von 2 m (*AISADual*) bis zu 4 m für die *HyMap* und *HySpex* Daten. Alle weiteren Aufnahmeparameter sind in Anhang B in der Tab. B-1 dargestellt.

Tab. 7-1: Parametervariation für die Generierung modellierter Trainingsdaten.

Reihenabstand [cm]	Pflanzendichte pro m	Reihenorientierung	Pflanzenorientierung	Wachstumsstadien	spektrale Information Pflanzen	spektrale Information Boden	Sensorblickwinkel
13 - 17	6, 10, 14, 18, 22, 26, 30, 34, (30° Intervall) 38	0° – 180°	bis Ährenschieben - willkürlich ab Blüte - gerichtet	angepasst an Datensatz (siehe Abb. 7.1)	je Stadium	konstant	13 Blickwinkel - abhängig vom Sensor

7. 2 Anwendung klassischer Klassifizierungsverfahren in Kombination mit modellierten Trainingsdaten auf hyperspektrale Bilddaten

Die modellierten Reflexionsdaten dienen als Trainingsdaten für die Klassifizierung des hyperspektralen Bilddatensatzes der Testfläche Wittbrietzen. Ausgehend von den theoretisch vorkommenden Wachstumsphasen zum Zeitpunkt der Datenaufnahme setzen sich die Trainingsdaten aus den elf Klassen Winterroggen (WR) 08, WR09, WR10, Winterweizen (WW) 07, WW08, WW09, WW10, Wintergerste (WG) 09, WG10, WG11 und WG12 zusammen. Alle im folgenden Abschnitt verwendeten Klassifizierungsmethoden werden mit diesen modellierten Daten trainiert.

Aufgrund der in der Validierung beschriebenen möglichen Albedounterschiede zwischen den modellierten Daten und Bilddaten werden neben den ursprünglichen Reflexionsdaten vorverarbeitete Eingabedatensätze zur Klassifizierung genutzt. Zur Minimierung von Albedounterschieden wird eine Normalisierung des Ausgangsdatsatzes durchgeführt, bei der jedes Pixel durch seinen maximalen Reflexionswert dividiert wird, sodass die maximale Albedo eines Pixels gleich eins ist. Der dritte Eingabedatensatz wurde Kontinuum bereinigt, wodurch spektrale Absorptionsmerkmale in den Fokus rücken, welche der Klassifizierung dienen.

Für die Klassifizierung werden die Eingabedatensätze anhand von Vektordaten, welche die Schlaggrenzen und Anbauinformation enthalten, maskiert, sodass lediglich Schläge auf denen die in der Simulation umgesetzten Pflanzenarten existent sind, selektiert werden. Die Klassifizierung des hyperspektralen *HyMAP* Datensatzes des Untersuchungsgebietes Wittbrietzen führt zu den in Tab. 7-2 aufgeführten Ergebnissen. Es wird deutlich, dass die Klassifizierung der Trainingsdaten mit Ausnahme der Minimum-Distanz-Methode auf den Reflektanzdaten (67 %) und der Maximum-Likelihood-Methode auf Kontinuum bereinigten Daten (8 %) mit sehr hoher Genauigkeit (> 82 %) erfolgt. Die Übertragung dieser sehr guten Ergebnisse auf die Klassifizierungsgenauigkeit der realen Bilddaten kann jedoch nicht erfolgreich durchgeführt werden. Die meisten Ansätze resultieren in Genauigkeiten von unter 50 %. Die größte Genauigkeit wird bei der Verwendung des Minimum-Distanz-Klassifizierers in Kombination mit der Nutzung Kontinuum bereinigter Daten, mit einer Klassifizierungsgenauigkeit von 54 % für die Bestimmung der Getreideart und des Wachstumsstadiums, erreicht.

Es stellt sich nun die zentrale Frage, worin die Ursachen für die unzureichenden Klassifizierungsgenauigkeiten der realen Bilddaten begründet sind? Raudys und Pikelis (1980) beschreiben, dass die Leistungsfähigkeit eines Klassifizierers durch vier Faktoren bestimmt wird:

1. *Separierbarkeit der Klassen*
2. *Umfang der Trainingsdaten*
3. *Dimensionalität der Daten*
4. *Klassifizierungsmethode*

Separierbarkeit der Klassen

Aus der Tab. 7-2 geht anhand der Klassifizierungsergebnisse der Trainingsdaten hervor, dass diese Daten mittels verschiedener Methoden voneinander zu trennen sind. Zur Untersuchung der Trennbarkeit der Zielklassen des *HyMap* Datensatzes wird eine überwachte Maximum Likelihood Klassifizierung durchgeführt, bei der die Trainingsdaten direkt aus dem Bilddatensatz entnommen werden. Dies stellt eine gängige Praxis bei der Klassifizierung hyperspektraler Bilddaten dar. Eine Gesamtklassifizierungsgenauigkeit von 99,93 % beweist, dass neben den Trainingsdaten auch die Zielklassen deutlich voneinander zu unterscheiden sind. Eine mangelhafte Separierbarkeit der Klassen als Ursache der unzureichenden Klassifizierungsgenauigkeit kann damit ausgeschlossen werden.

Tab. 7-2: Klassifizierungsgenauigkeiten unterschiedlicher Klassifizierungsmethoden und Eingabedatensätze für das Untersuchungsgebiet Wittbrietzen.

Klassifizierungsmethode	Datensatz	Klassifizierungsgenauigkeit Trainingsdaten	Klassifizierungsgenauigkeit Validierungsdaten
<i>Minimum Distanz</i>	original	67 %	0 %
	normalisiert	89 %	44 %
	Kontinuum bereinigt	82 %	54 %
<i>Mahalanobis Distanz</i>	original	100 %	12 %
	normalisiert	100 %	0 %
	Kontinuum bereinigt	100 %	3 %
<i>Spectral Angle Mapper</i>	original	93 %	44 %
	normalisiert	93 %	44 %
	Kontinuum bereinigt	92 %	45 %
<i>Maximum Likelihood</i>	original	100 %	0 %
	normalisiert	100 %	0 %
	Kontinuum bereinigt	88 %	44 %
<i>Spectral Feature Fitting</i>	Kontinuum bereinigt	93 %	3 %
<i>Support Vector Machine</i>	original	99 %	26 %
	normalisiert	99 %	38 %
	Kontinuum bereinigt	-	-

Umfang der Trainingsdaten

Der Umfang der Trainingsdaten umfasst 780 modellierte Datensätze pro Klasse mit unterschiedlichen Bestandsparametern, welche Variationen des Reflexionssignals mit sich bringen. Die Varianz der modellierten Trainingsdaten im Vergleich zu der des Bilddatensatzes ist für die drei Zielklassen des *HyMap* Datensatzes in der Abb. 7-2 dargestellt. Die Berechnung der statistischen Verteilung der Reflexionswerte erfolgt auf Basis aller Pixel eines Schlages bzw. aller modellierten Trainingsdaten eines bestimmten Entwicklungsstadiums einer Pflanzenart. Für die Berechnung des maximalen und minimalen Spektrums wird der Mittelwert aller Spektren berechnet und das Spektrum mit dem größten bzw. kleinsten Mittelwert herangezogen. Die Ergebnisse für Winterweizen (Abb. 7-2, unten) zeigen eine nahezu optimale Beschreibung der realen Daten durch die modellierten Trainingsdaten. Form- und Albedounterschiede treten, wie bei den zwei übrigen Klassen, lediglich im Bereich der Wasserbanden bei 950 nm und 1190 nm auf. Da die Unterschiede auch zu den zeitgleich zum Überflug aufgezeichneten ASD Messungen vorhanden sind, liegt die Vermutung nahe, dass es im Zuge der Prozessierung der *HyMap* Daten zur Veränderung der Reflexionssignale kommt. Eine eindeutige Ursache dieser Diskrepanz kann jedoch nicht ermittelt werden. Die deutlich sichtbaren Albedounterschiede bei Winterroggen und Wintergerste ab ca. 1000 nm, werden in dieser

Betrachtung außer Acht gelassen, da deren Einfluss durch die Normalisierung bzw. Kontinuumbereinigung des Datensatzes reduziert ist.

Die hohen Albedowerte der Klasse Winterroggen unterscheiden sich im spektralen Verlauf im Bereich des sichtbaren Lichts deutlich von den realen Daten. Die Daten niedriger Albedo weisen hingegen ein zu den Bilddaten vergleichbares Reflexionsverhalten auf. Daraus geht hervor, dass zwar Unterschiede des spektralen Verhaltens der Trainingsdaten zur Zielklasse vorhanden sind, jedoch die spektrale Varianz der Zielklasse durch die Trainingsdaten ausreichend beschrieben wird. Bei Wintergerste existieren, wie bereits bei den Validierungsergebnissen (vgl. Abschnitt 5.4.3) beschrieben, durch vitale Begleitvegetation hervorgerufene Verlaufsunterschiede. Diese bringen zwangsläufig eine Beeinträchtigung der Klassifizierungsgenauigkeit mit sich.

Dimensionalität der Daten

Eines der größten Probleme bei der Klassifizierung hyperspektraler Fernerkundungsdaten stellt das Hughes - Phänomen (Hughes 1968) dar. Hierbei kommt es bei einer begrenzten Menge an Trainingsdaten, ab einer gewissen Dimensionalität des Merkmalsraumes, zu einer Reduktion der Klassifizierungsgenauigkeit (Dalponte et al. 2009). Durch Selektion geeigneter Merkmale, sowie einer Reduzierung der Klassenzahl, kann dieses Problem umgangen werden.

Klassifizierer als Fehlerquelle

Das Ergebnis einer Klassifizierung ist stets durch die verwendete Methode bedingt. In Abhängigkeit der drei zuvor erläuterten Punkte führen die unterschiedlich komplexen Klassifizierungsmethoden zu unterschiedlichen Genauigkeiten. Bei der Auswahl des Verfahrens sind stets, neben dem Umfang der Trainingsdaten, auch die Verteilung der Daten zu berücksichtigen. Einen ausführlichen Überblick über die Grundlagen von Klassifizierungsmethoden geben die Standardwerke der Fernerkundung von Richards & Jia (2005) sowie Schowengerdt (2006).

Da sowohl der Umfang der Trainingsdaten, als auch die Klassenseparierbarkeit als potenzielle Fehlerquellen ausgeschlossen werden können, steht die Reduktion des Merkmalsraumes in Kombination mit der Definition eines geeigneten Klassifizierers im Fokus der folgenden Betrachtungen.

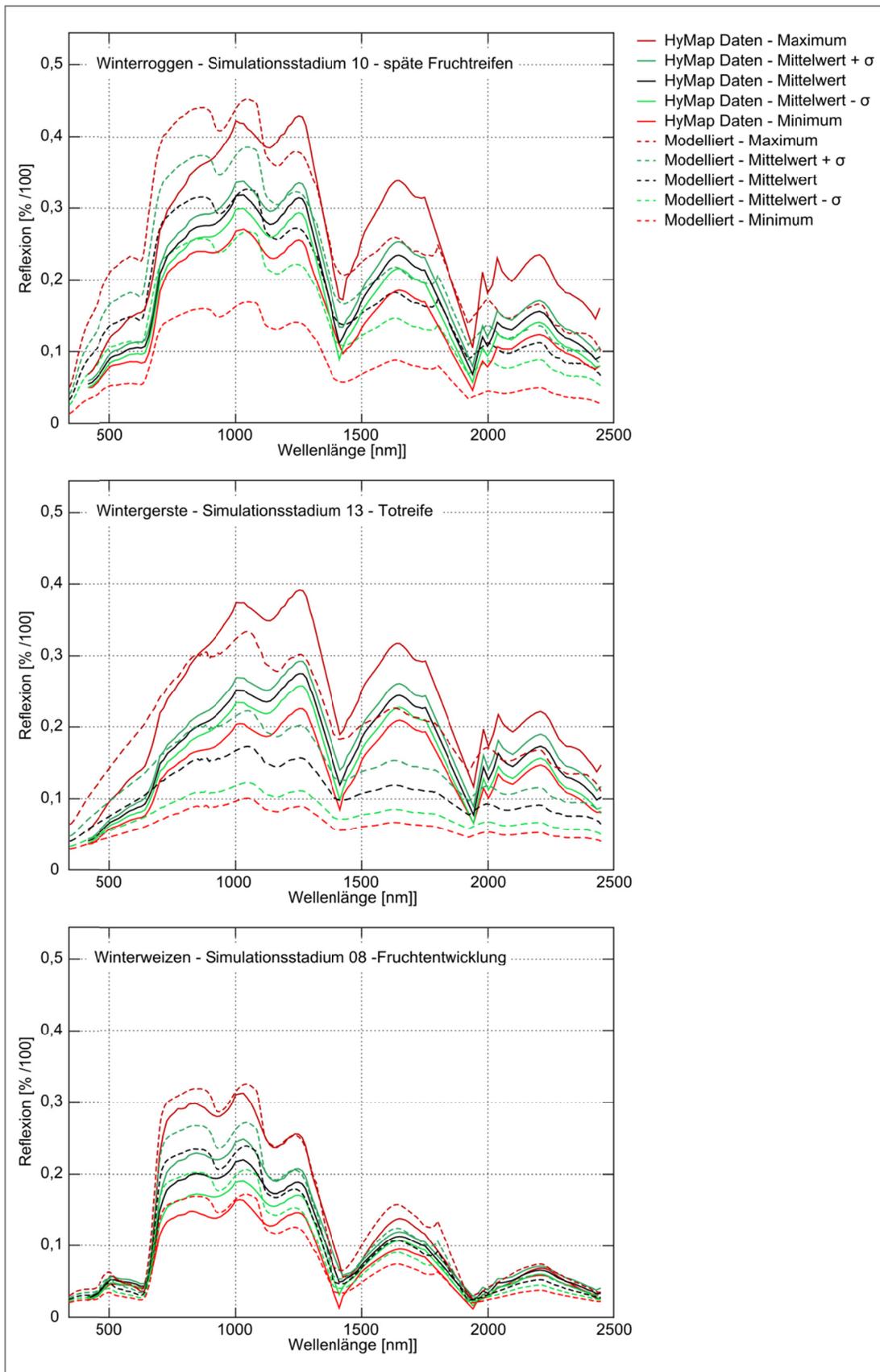


Abb. 7-2: Statistische Verteilung der modellierten Daten (gestrichelt) im Vergleich zu den *HyMap* Daten der Testflächen des Untersuchungsgebietes Wittbrietzen (durchgezogen).

7.3 Verfahren zur Reduzierung des Merkmalsraumes

Eine Reduktion des Merkmalsraumes zur Entfernung redundanter Informationen kann auf zwei unterschiedliche Wege realisiert werden (Young & Fu 1986). Der erste Ansatz ist die Auswahl bestimmter spektraler Merkmale (spektrale Bänder), welche zu einer Erhöhung der Klassentrennung beitragen. Dieses Verfahren der Dimensionsreduzierung wird als Merkmalsselektion oder Bandselektion bezeichnet. Ein anderer Ansatz ist die Verwendung aller Daten des ursprünglichen Merkmalsraumes und eine darauf aufbauende Extrahierung relevanter Merkmale sowie nützlicher Informationen zu einem geringer dimensionalen Merkmalsraum. Dies wird als Merkmalsextraktion bezeichnet und umfasst Verfahren, die sowohl im Ortsraum, wie z.B. die Hauptkomponententransformation, die *Discriminant Analysis Feature Extraction* (Kuo & Landgrebe 2001) und die *Decision Boundary Feature Extraction* (Lee & Landgrebe 1993), als auch im Frequenzraum wie z.B. die *Fourier Feature Extraction* und die *Wavelet Feature Extraction* (Kaewpijit et al. 2003; Hsu 2007) berechnet werden. Einige dieser Verfahren sind an die statistische Grauwertverteilung des zu klassifizierenden Bilddatensatzes gekoppelt, womit die Entwicklung eines übertragbaren Klassifizierungsansatzes nicht realisierbar ist, da die Ergebnisse der Transformation von Bild zu Bild variieren.

Ein weiteres Verfahren stellt die automatisierte Merkmalsselektion abgeleiteter spektraler Merkmale von K. Segl dar. Diese Methode wurde als Teil des Algorithmus zur Ableitung der Flächenanteile urbaner Oberflächen aus hyperspektralen Bilddaten am GFZ Potsdam in der Sektion Fernerkundung entwickelt (Roessner et al. 2001; Segl et al. 2003; Segl et al. 2006; Bochow 2009). Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Methoden, setzt das Verfahren im Vorfeld aufgebaute spektrale Datenbanken der zu trennenden Oberflächen voraus, auf deren Basis spektrale Merkmale neu berechnet werden. Die spektralen Bibliotheken können sowohl aus Bilddaten extrahierten Spektren, oder wie im Falle dieser Arbeit aus simulierten Daten aufgebaut werden. Je größer dabei die Vielfalt der Trainingspektren ist, desto sicherer können die zur bestmöglichen Klassentrennung erforderlichen Merkmale selektiert werden. Das Verfahren zeichnet sich zum einen durch eine sehr hohe Robustheit gegenüber spektralen Variationen der Oberfläche und Störeffekten (Heiden et al. 2007) aus und ermöglicht zum anderen eine einfache Integration der simulierten Daten in den Klassifizierungsprozess. Aus diesem Grund eignet sich dieses Verfahren optimal für die in dieser Arbeit zu analysierenden Klassifizierungsfragestellungen.

7.4 Paarweise-Maximum-Likelihood-Klassifizierung mit wissensbasierter Merkmalsauswahl

Im Gegensatz zu Klassifizierungen die direkt auf Reflexionswerten basierend vorgenommen werden, unterscheidet der am GFZ entwickelte Paarweise-Maximum-Likelihood-Klassifizierer (pMLK) die Oberflächen anhand abgeleiteter spektraler Merkmale. Die Grundmenge der berechneten Merkmale wird dabei sowohl aus statistischen Grundfunk-

tionen, wie Mittelwert und Standardabweichung, als auch aus Ratios, Absorptionsbandentiefen und Koeffizienten von Polynomapproximationen (1. - 3. Ordnung) gebildet, die jeweils über definierte Intervalle berechnet werden.

7.4.1 Klassifizierungsablauf

Für die Klassifizierung wird der am GFZ entwickelte *Paarweise-Maximum-Likelihood-Klassifizierer* (*pMLK*) angewandt (siehe Abb. 7-5). Zuerst werden basierend auf Trainingsdaten, die für jede Klasse in einer spektralen Datenbank gespeichert sind, alle potenziell möglichen spektralen Merkmale über definierte Intervalle berechnet. Auf der Grundlage dieser Merkmale werden dann Einzelklassifizierungen mit *ML*-Klassifizierern, die jeweils nur 2 Klassen unterscheiden, parametrisiert. Dabei wird für jedes Klassenpaar ein separater Klassifizierer aufgebaut. Für die endgültige Klassifizierungsentscheidung ist daher ein zusätzlicher Schritt erforderlich, wobei sich die letztendliche Klassifizierungsentscheidung eines Pixels aus den Ergebnissen der Einzelklassifizierungen ergibt. Das Verfahren weist gegenüber der gleichzeitigen Klassifizierung aller Klassen den entscheidenden Vorteil auf, dass jede Klassenpaarklassifizierung in einem für sich optimierten Merkmalsraum von geringer Dimensionalität erfolgt. Für die gleichzeitige Klassifizierung aller Klassen werden hingegen sehr viel mehr Merkmale benötigt, wodurch der Merkmalsraum sehr groß werden kann. Speziell bei begrenzter Trainingsmenge kann dies zu einer Reduzierung der Klassifizierungsgenauigkeit führen. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Hughes-Phänomens kann durch die Reduzierung auf zwei Klassen jedoch sehr stark minimiert werden.

Die Merkmalsselektion ist der entscheidende Schritt beim Aufbau des *pMLK*. Für jedes Klassenpaar werden aus den zuvor berechneten potenziellen spektralen Merkmalen, in einem iterativen Prozess eine Anzahl von Merkmalen ausgewählt, anhand derer diese Klassen optimal voneinander getrennt werden können. Dies erfolgt für alle möglichen Paarungen der Zielklassen. Das Auswahlverfahren erfolgt nach dem *Sequential Forward Selection* (SFS) Verfahren (Whitney 1971). Für die Merkmalsauswahl eines Klassenpaares wird mit jedem möglichen Merkmal eine separate *ML*-Klassifizierung, also in einem eindimensionalen Merkmalsraum, durchgeführt (Abb. 7-3). Das Merkmal, welches den geringsten *Omission* Fehler für beide Klassen aufweist (Mittelwert), wird in die Merkmalsliste des Klassenpaares aufgenommen. Falls mehrere Merkmale eine fehlerfreie Trennung der Zielklassen ermöglichen, wird das Merkmal ausgewählt, bei dem die Bhattacharyya-Distanz zwischen den beiden Klassen im Merkmalsraum am größten ist. Wird keine fehlerfreie Trennung der Trainingsdaten anhand dieses Merkmals erreicht, so ist der Prozess mit den verbliebenen Merkmalen erneut zu durchlaufen und jeweils eines von ihnen mit dem zuvor definierten Merkmal aus der Merkmalsliste zu einem zweidimensionalen Merkmalsraum zu kombinieren. Die Ergebnisse aller *ML*-Klassifizierungen des Klassenpaares werden wiederum auf den geringsten Fehler hin untersucht und das Merkmal, welches in Kombination mit dem zuerst definierten Merkmal den geringsten Fehler aufweist, in die Merkmalsliste übernommen. Dieser Vorgang erfolgt solange bis eine Merkmalsliste aufgebaut ist, anhand derer das Klassenpaar mittels eines

ML-Klassifizierers optimal voneinander getrennt werden kann. Die iterative Merkmalsauswahl erfolgt bis eines der folgenden drei Abbruchkriterien eintritt (Bochow 2009):

- ❖ fehlerfreie Trennung des Klassenpaares.
- ❖ die Klassifizierungsgenauigkeit verbessert sich nicht mehr signifikant von einer Iteration zur nächsten, d.h. keines der verbliebenen Merkmale erhöht in Kombination mit den zuvor gewählten Merkmalen die Trennbarkeit des Klassenpaares.
- ❖ eine maximale Anzahl an Iterationen, deren Anzahl mit Blick auf die Menge der Trainingsdaten der Klassen definiert werden sollte, wurde erreicht.

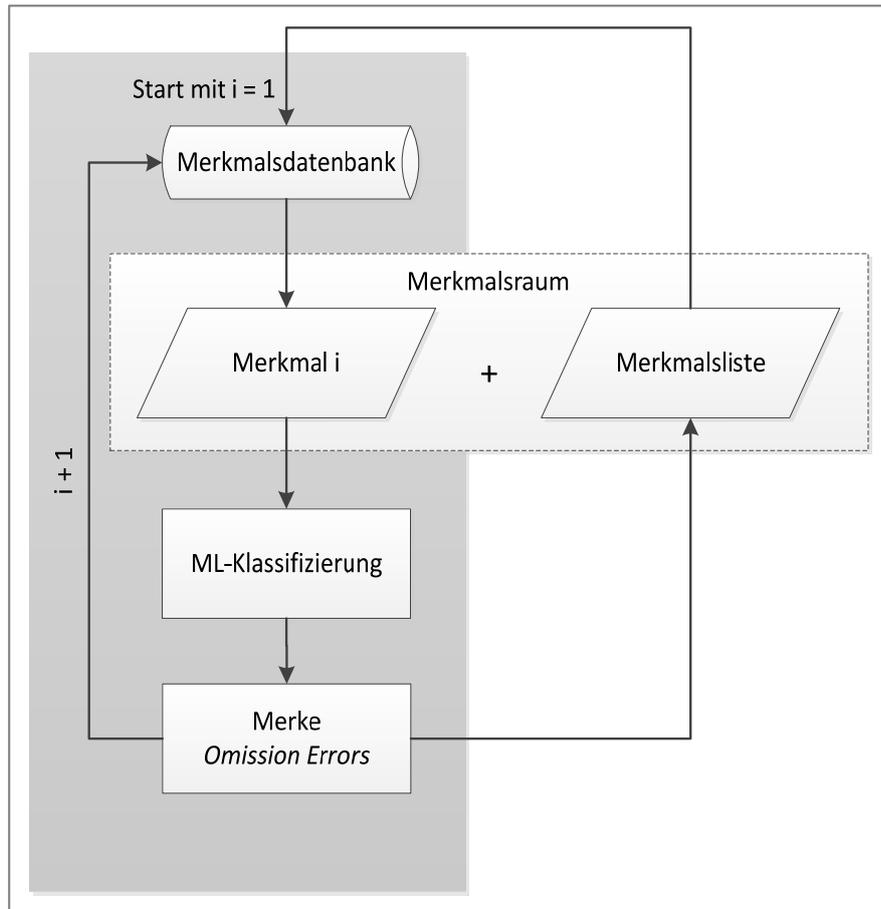


Abb. 7-3: Ablauf der iterativen Merkmalsselektion (n = Anzahl potenzieller Merkmale) (verändert nach Bochow 2009).

Die Klassifizierung eines Pixels auf der Basis der selektierten Merkmale ist anhand eines Beispiels mit drei potenziellen Zielklassen erklärt (Abb. 7-4). Für das zu klassifizierende Pixel müssen lediglich die zuvor in der Merkmalsliste definierten Merkmale aus dem Spektrum des Pixels berechnet werden. Dabei beschreibt jede Merkmalsliste einen für die *ML*-Klassifizierung eines Klassenpaares optimierten Merkmalsraum. Das Ergebnis jeder Klassifizierung gibt für beide Klassen eine Bayes'sche Wahrscheinlichkeit an. Die Gewinnerklasse des Pixels wird mittels eines nacheinander angewandten Mittelwert- und Maximumoperators ermittelt. Die Wahrscheinlichkeit der Klassenzugehörigkeit eines Pixels berechnet sich aus dem Mittelwert der Wahrscheinlichkeiten, die eine Klasse bei

den paarweise durchgeführten *ML*-Klassifizierungen mit den anderen Klassen hat. Die Gewinnerklasse ergibt sich anschließend aus der höchsten Zugehörigkeitswahrscheinlichkeit (MAX pro Klasse) und wird zusammen mit der Klassenentscheidung im Ergebnisbild abgespeichert. Die Klassifizierungsergebnisse unter Nutzung eines Minimum Operators liefern jedoch geringfügig schlechtere Ergebnisse.

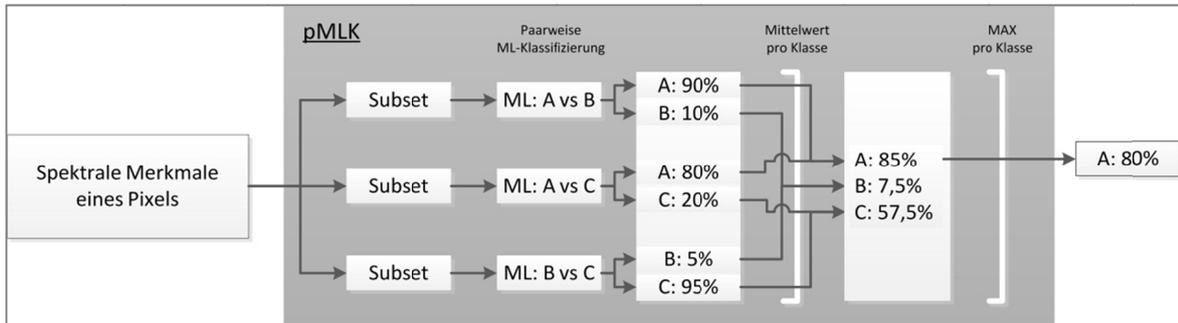


Abb. 7-4: Anwendung des *pMLK* zur Klassifizierung eines Pixels mit drei möglichen Zielklassen (verändert nach Bochow 2009).

Der auf die zuvor beschriebene und mittels der simulierten Trainingsdaten parametrisierte *pMLK*, nachfolgend als *pMLKsim* bezeichnet, wird analog zur dargestellten Klassifizierung eines einzelnen Pixels auf eine gesamte zu klassifizierende Fernerkundungsszene angewandt (Abb. 7-5, links). In einer zweiten Analyse werden zur Definition der Merkmale eines Klassenpaares neben den simulierten Spektren, für jede im Bild tatsächlich existente Klasse, äquivalent zur Anzahl der simulierten Trainingsdaten, willkürlich verteilte Trainingsdaten aus dem Bilddatensatz genutzt. Die dabei entstehende Merkmalsliste enthält die Merkmale eines jeden Klassenpaares für eine optimale Trennung der Gesamtheit der Trainingsdaten, die in diesem Fall sowohl durch die simulierten, als auch die aus dem Bilddatensatz extrahierten Spektren gebildet werden. Die Merkmalsliste definiert für die nochmalige Parametrisierung der Paarweiseklassifizierer die dabei zu verwendenden spektrale Merkmale. Im Gegensatz zum 1. Durchlauf werden die Paarweiseklassifizierer diesmal lediglich mit den simulierten Trainingsdaten, jedoch unter Nutzung der vordefinierten Merkmalslisten, aufgebaut. Die für die Klassifizierung notwendigen statistischen Verteilungen errechnen sich somit wiederum nur aus den simulierten Trainingsdaten. Dieser Klassifizierungsmodus wird nachfolgend als *pMLKsim+* bezeichnet. Dies stellt einen maßgeblichen Unterschied zu Klassifizierungen dar, bei denen die Trainingsdaten aus dem Bild extrahiert wurden.

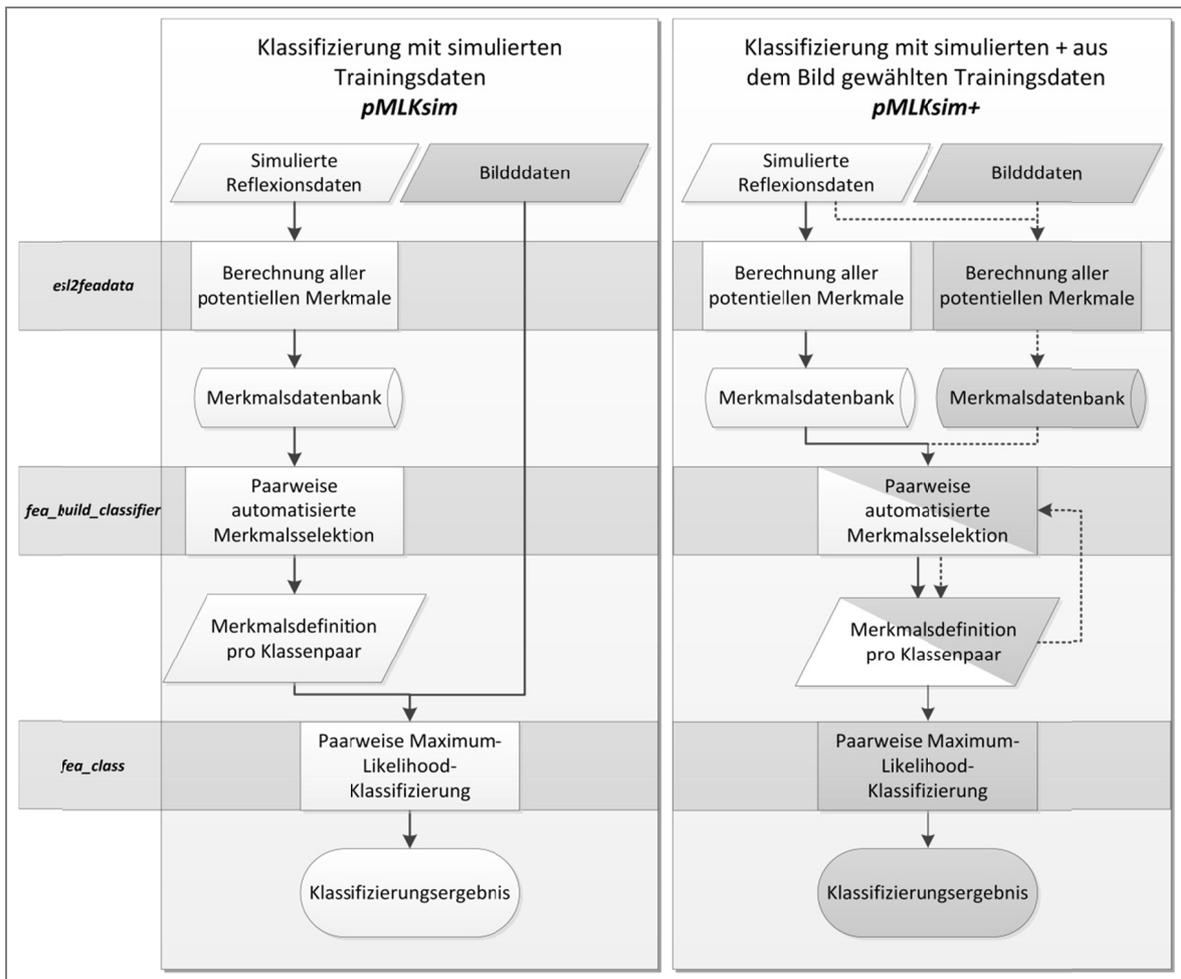


Abb. 7-5: Ablaufdiagramm der Klassifizierung bei Verwendung des *pMLKsim* (links) und des *pMLKsim+* (rechts).

7.4.2 Simulation multispektraler Bilddaten

Neben der Anwendung der Klassifizierungsmethoden auf hyperspektrale Bilddaten sollen die Potenziale aktueller und zukünftiger multispektraler Systeme evaluiert werden. Es werden sowohl die hyperspektralen Bilddaten der vorgestellten abbildenden Spektrometer als auch die simulierten Spektren (933 Bänder) unter Einbeziehung der Sensorparameter (Lage der Zentrumswellenlänge und soweit vorhanden Response Funktion) der Zielsysteme (*Landsat TM7*, *Sentinel-2*, *WorldView-2* und *RapidEye*) auf deren spektrale Auflösung umgerechnet (siehe Tab. 7-3). Hierfür werden zwei von K. Segl am GFZ entwickelte Softwareprodukte zum spektralen Resampling von Spektralbibliotheken und von Bilddaten genutzt. Eine Anpassung der räumlichen Auflösung sowie eine Einbeziehung systembedingter Unterschiede (z.B. FOV und SNR) erfolgt nicht.

Tab. 7-3: Bandkonfiguration der simulierten Sensoren.

Band	Landsat TM7	RapidEye	WorldView-2	Sentinel-2
1	450-520	440-510	396-458	433-453
2	530-610	520-590	442-515	477-503
3	630-690	653-685	506-586	550-570
4	700-1300	690-730	584-632	658-673
5	1570-1780	760-850	630-690	698-713
6	(10420-11660)		699-749	733-748
7	2100-2350		765-901	765-785
8			856-1043	735-950
9				855-875
10				930-950
11				1365-1385
12				1565-1655
13				2100-2270

7.4.3 Klassifizierungsergebnisse

Die Klassifizierungsergebnisse für die Anwendung des *pMLK* auf die hyperspektralen und die daraus simulierten multispektralen Fernerkundungsdaten sind in diesem Abschnitt zusammengefasst. Aufgrund der Beschränkung der simulierten Daten auf drei Arten werden die Bilddatensätze anhand von Schlaggrenzen maskiert, sodass lediglich Schläge für die Klassifizierung berücksichtigt werden, die mit den Arten Wintergerste, Winterroggen oder Winterweizen bestanden sind. Die Klassifizierung der Datensätze erfolgt jeweils mit dem *pMLKsim* und dem *pMLKsim+*. Eine Ausnahme bildet hierbei der Datensatz des Untersuchungsgebietes Demmin vom 27.05.2005, für den lediglich die Anbaukulturen und keine phänologischen Daten zur Verfügung stehen. Für diesen Datensatz kann daher keine Integration von Bildspektren in den Merkmalsauswahlprozess und somit auch keine Nutzung des *pMLKsim+* erfolgen.

Die Zielklassen umfassen neben der Arteninformation zudem eine phänologische Zuordnung. Für die Bewertung der Klassifizierungsgenauigkeit zur Artendetektion werden die Klassen gleicher Art unabhängig von ihrer phänologischen Entwicklung zusammengefasst, sodass schlussendlich für jeden klassifizierten Datensatz vier Ergebnisbilder, mit folgendem Inhalt zur Verfügung stehen:

- a) Klassifizierer pMLKsim nach Getreideart und Phänologie
- b) Klassifizierer pMLKsim nach Getreideart
- c) Klassifizierer pMLKsim+ nach Getreideart und Phänologie
- d) Klassifizierer pMLKsim+ nach Getreideart

Die Validierung der Klassifizierungsergebnisse erfolgt durch die Berechnung der Konfusionsmatrix, wobei alle Pixel der Schläge als unabhängige Validierungsdaten eingehen, da diese nicht für die Parametrisierung der Klassifizierer angewendet werden. Die Güte der Klassifizierung wird über die Gesamtgenauigkeit ($oAcc$ in %), die sich aus der Addition der korrekt klassifizierten Pixel aller Zielklassen und der anschließenden Division durch die Gesamtmenge der Validierungsdaten ergibt, und den Cohens-Kappa-Koeffizienten, der die richtig klassifizierten Pixel in Bezug auf eine zufällig korrekte Zuweisung bewertet, angegeben. Landis und Koch (1970) geben für die Beurteilung des Kappa Wertes folgende Einteilungen an: $\kappa = < 0$ - „schlechte Übereinstimmung“, $0 < \kappa < 0,21$ - „leichte Übereinstimmung“, $0,21 < \kappa < 0,41$ - „ausreichende Übereinstimmung“, $0,41 < \kappa < 0,61$ - „moderate Übereinstimmung“, $0,61 < \kappa < 0,81$ - „gute Übereinstimmung“ und $0,81 < \kappa < 1,00$ - „sehr gute Übereinstimmung“. Zur besseren Bewertung der Klassifizierungsergebnisse sind die Tabellen nach folgenden Gesichtspunkten farbig codiert:

Tab. 7-4: Güteinteilung der Klassifizierungsergebnisse

„sehr gute Ergebnisse“	$oAcc \geq 90\%$ $aAcc \geq 90\%$ $Kappa \geq 0,81$
„gute Ergebnisse“	$oAcc \geq 75\% < 90\%$ $aAcc \geq 75\% < 90\%$ $Kappa \geq 0,61 < 0,81$
„mäßige Ergebnisse“	$oAcc \geq 60\% < 75\%$ $aAcc \geq 60\% < 75\%$ $Kappa \geq 0,21 < 0,61$
„schlechte Ergebnisse“	$oAcc < 60\%$ $aAcc < 60\%$ $Kappa < 0,21$

Die Anwendung des pMLK auf die Trainingsdaten selbst, welche in 30% Trainingsdaten und 70% Validierungsdaten aufgeteilt wurden, zeigen mit Ausnahme der Daten des Untersuchungsgebietes Demmin vom 27.05.2005 sehr gute Klassifizierungsergebnisse. Die Abweichungen des Demmin-Datensatzes gehen auf Fehlzugeordnungen im Stadium Schos-

sen zurück. Diese Validierung zeigt die potenzielle Eignung der gewählten Klassifizierung zur Separierung der Zielklassen.

Tab. 7-5: Gesamtgenauigkeiten (oAcc), mittlere Genauigkeiten (aAcc) und Kappawerte der Ergebnisse der *pMLKsim* Klassifizierungen für die Arten- und Phänologiebestimmung.

pMLKsim (Art + Phäno.)	Güte- maß	WB 070620	GK 070620	FW 110430	FW 110628	DEM 120525	DEM 050527
HyMap/AISA/ HySpex	oAcc [%]	100	100	100	100	100	86
	aAcc [%]	100	100	100	100	100	86
	Kappa	1,00	-	1,00	1,00	1,00	0.85
Sentinel-2	oAcc [%]	100	100	100	100	100	86
	aAcc [%]	100	100	100	100	100	86
	Kappa	1,00	-	1,00	1,00	1,00	0.85
WorldView-2	oAcc [%]	100	99	100	100	100	86
	aAcc [%]	100	99	100	100	100	86
	Kappa	1,00	-	1,00	1,00	1,00	0.85
TM7	oAcc [%]	99	100	100	98	100	86
	aAcc [%]	99	100	100	98	100	86
	Kappa	0,99	-	1,00	0.98	1,00	0.85
RapidEye	oAcc [%]	99	99	100	99	100	86
	aAcc [%]	99	99	100	99	100	86
	Kappa	0,99	-	1,00	0.99	1,00	0.85

Die in der Abb. 7-6 dargestellten Ergebnisse der Klassifizierung eines Ausschnittes des *HyMap* Datensatzes des Untersuchungsgebietes Wittbrietzen zeigen exemplarisch die für jeden Datensatz erzeugten vier Klassifizierungsergebnisse mit Angabe der Gütemaße. Die Ergebnisse zeigen die signifikante Verbesserung der Klassifizierungsergebnisse von *pMLKsim* zu *pMLKsim+*. Die auf Grundlage von Klassifizierungen weiterer Datensätze berechneten Gesamtklassifizierungsgenauigkeiten sowie die Kappa-Koeffizienten sind in den Tab. 7-6 bis Tab. 7-9 für die vier analysierten Klassifizierungsfälle dargestellt.

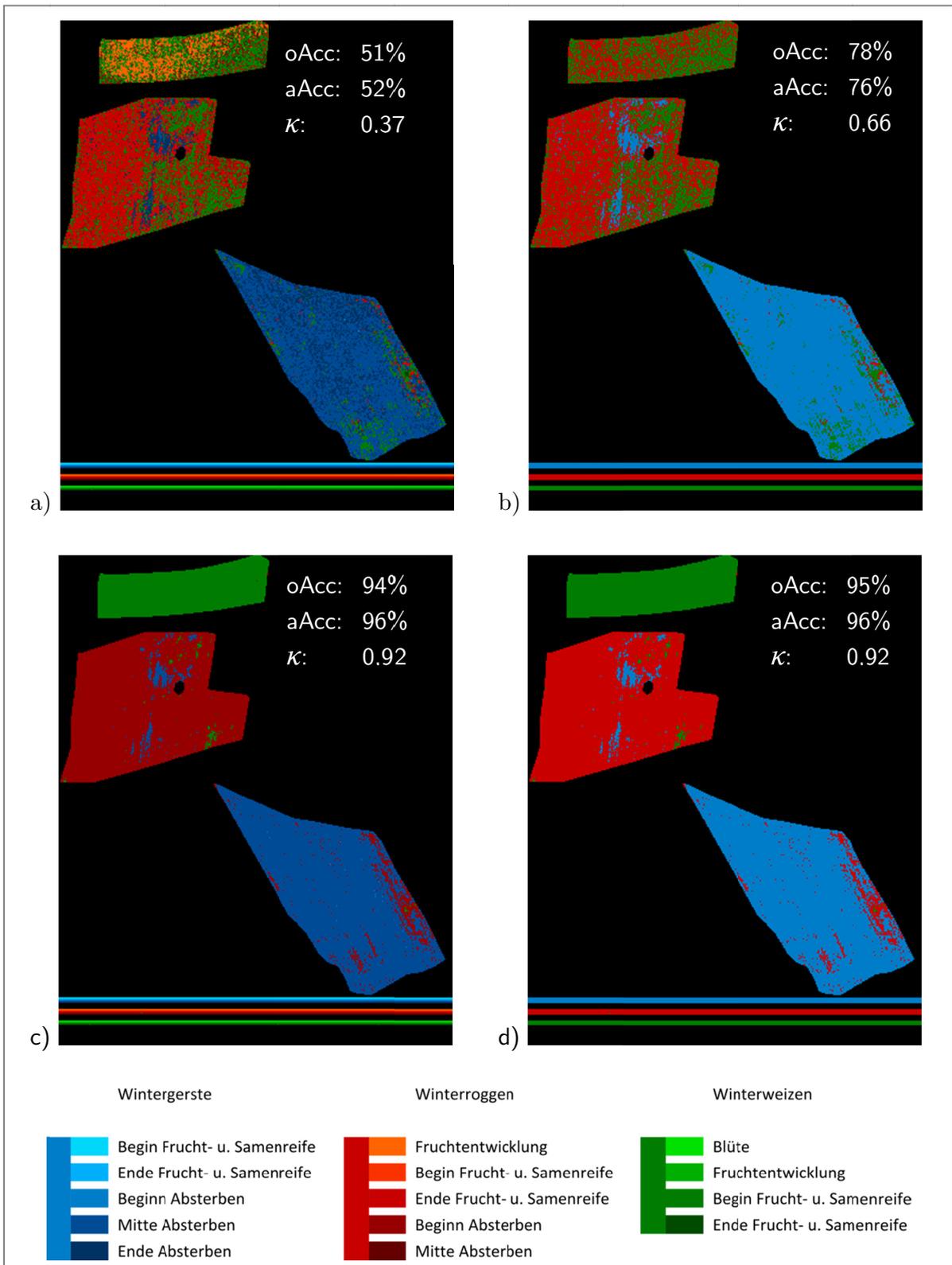


Abb. 7-6: Klassifizierungsergebnisse des *pMLKsim* (a, b) und des *pMLKsim+* (c, d) für die gemeinsame Bestimmung der Pflanzenart und der Phänologie (a, c), sowie nur der Pflanzenart (b, d) für einen Ausschnitt der *HyMap* Daten des UG-Wittbrietzen (20.06.2007).

Tab. 7-6: Gesamtgenauigkeiten (oAcc), mittlere Genauigkeiten (aAcc) und Kappawerte der Ergebnisse der *pMLKsim* Klassifizierungen für die Arten- und Phänologiebestimmung.

pMLKsim (Art + Phäno.)	Güte- maß	WB 070620	GK 070620	FW 110430	FW 110628	DEM 120525	DEM 050527
HyMap/AISA/ HySpex	oAcc [%]	51	0	38	8	1	-
	aAcc [%]	52	0	45	13	1	-
	Kappa	0,37	-	0,02	0,03	0,00	-
Sentinel-2	oAcc [%]	15	0	36	1	3	-
	aAcc [%]	24	0	31	1	5	-
	Kappa	0,08	-	0,14	0,01	0,01	-
WorldView-2	oAcc [%]	13	0	17	23	1	-
	aAcc [%]	22	0	29	33	0	-
	Kappa	0,08	-	0,10	0,12	0,00	-
TM7	oAcc [%]	46	0	24	40	35	-
	aAcc [%]	54	0	41	28	48	-
	Kappa	0,36	-	0,02	0,02	0,01	-
RapidEye	oAcc [%]	30	0	23	32	48	-
	aAcc [%]	42	0	20	23	22	-
	Kappa	0,23	-	0,02	0,09	0,09	-

Tab. 7-7: Gesamtgenauigkeiten (oAcc), mittlere Genauigkeiten (aAcc) und Kappawerte der Ergebnisse der *pMLKsim* Klassifizierungen für die Artenbestimmung.

pMLKsim (Art)	Güte- maß	WB 070620	GK 070620	FW 110430	FW 110628	DEM 120525	DEM 050527
HyMap/AISA/ HySpex	oAcc [%]	78	100	20	44	86	55
	aAcc [%]	76	100	31	42	50	32
	Kappa	0,66	-	0,01	0,16	0,01	0,06
Sentinel-2	oAcc [%]	77	98	40	26	75	11
	aAcc [%]	73	98	39	39	45	26
	Kappa	0,64	-	0,02	0,11	0,01	0,03
WorldView-2	oAcc [%]	57	20	42	58	63	71
	aAcc [%]	57	20	47	62	37	39
	Kappa	0,33	-	0,20	0,28	0,13	0,20
TM7	oAcc [%]	55	52	26	63	5	23
	aAcc [%]	63	52	43	46	6	52
	Kappa	0,39	-	0,00	0,14	0,01	0,08
RapidEye	oAcc [%]	75	83	24	53	74	55
	aAcc [%]	78	83	20	51	53	24
	Kappa	0,63	-	0,00	0,25	0,07	0,06

Tab. 7-8: Gesamtgenauigkeiten (oAcc), mittlere Genauigkeiten (aAcc) und Kappawerte der Ergebnisse der *pMLKsim+* Klassifizierungen für die Arten- und Phänologiebestimmung.

pMLKsim+ (Art + Phäno.)	Güte- maß	WB 070620	GK 070620	FW 110430	FW 110628	DEM 120525	DEM 050527
HyMap/AISA/ HySpex	oAcc [%]	94	93	42	25	43	-
	aAcc [%]	96	93	56	18	37	-
	Kappa	0,92	-	0,08	-0,08	0,08	-
Sentinel-2	oAcc [%]	58	51	70	53	71	-
	aAcc [%]	64	51	51	42	35	-
	Kappa	0,39	-	0,08	0,12	0,04	-
WorldView-2	oAcc [%]	27	0	52	56	26	-
	aAcc [%]	42	0	37	45	43	-
	Kappa	0,17	-	0,00	0,17	0,04	-
TM7	oAcc [%]	67	0	44	65	40	-
	aAcc [%]	73	0	52	55	36	-
	Kappa	0,54	-	0,12	0,34	0,06	-
RapidEye	oAcc [%]	57	62	85	55	26	-
	aAcc [%]	66	62	78	41	36	-
	Kappa	0,49	-	0,64	0,16	0,03	-

Tab. 7-9: Gesamtgenauigkeiten (oAcc), mittlere Genauigkeiten (aAcc) und Kappawerte der Ergebnisse der *pMLKsim+* Klassifizierungen für die Artenbestimmung.

pMLKsim+ (Art)	Güte- maß	WB 070620	GK 070620	FW 110430	FW 110628	DEM 120525	DEM 050527
HyMap/AISA/ HySpex	oAcc [%]	95	99	42	58	60	-
	aAcc [%]	96	99	56	39	43	-
	Kappa	0,92	-	0,08	0,02	0,16	-
Sentinel-2	oAcc [%]	75	52	71	77	86	-
	aAcc [%]	78	52	52	62	52	-
	Kappa	0,61	-	0,09	0,30	0,09	-
WorldView-2	oAcc [%]	76	97	52	70	59	-
	aAcc [%]	81	97	38	55	74	-
	Kappa	0,62	-	0,00	0,28	0,21	-
TM7	oAcc [%]	68	10	41	81	56	-
	aAcc [%]	74	10	51	76	64	-
	Kappa	0,53	-	0,12	0,55	0,12	-
RapidEye	oAcc [%]	77	86	85	62	86	-
	aAcc [%]	81	86	78	51	53	-
	Kappa	0,65	-	0,64	0,06	0,07	-

8 Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wird das Anwendungspotenzial simulierter Bestandsreflexionsdaten für die Charakterisierung von Getreidearten analysiert. In diesem Kapitel werden die ausstehenden zwei zentralen Kernfragestellungen diesbezüglich diskutiert:

- 1. Ist es möglich auf der Grundlage modellierter Trainingsdaten aus 4D-Bestandsmodellen, Getreidearten und deren phänologische Entwicklungsphase mittels optischer Fernerkundungsdaten eines einzelnen Aufnahmezeitpunktes zu bestimmen?*
- 2. Welchen Vorteil bringen hyperspektrale Fernerkundungsdaten im Vergleich zu multispektralen Daten?*

8.1 Evaluierung des Potenzials synthetischer Trainingsdaten auf der Basis von 4D-Bestandsmodellen zur Bestimmung von Getreidearten und deren Phänologie

8.1.1 Bewertung der Klassifizierungsergebnisse

Die Klassifizierungsergebnisse müssen aufgrund der großen Genauigkeitsunterschiede differenziert betrachtet werden. Generell weisen die Datensätze der Untersuchungsgebiete Wittbrietzen und Groß Kreutz die besten Klassifizierungsergebnisse auf, wohingegen die Ergebnisse für die Untersuchungsgebiete Fichtwald und Demmin zumeist unzureichend sind.

Die alleinige Verwendung simulierter Trainingsdaten zur Parametrisierung des pMLKsim mit dem Ziel die Pflanzenart und die phänologische Entwicklung eines Bestandes zu determinieren, führt unabhängig von der genutzten Datenquelle mittels des gewählten Klassifizierungsansatzes zu sehr mangelhaften Ergebnissen (siehe Tab. 7-6). Für keinen der Datensätze konnten die Arten in Verbindung mit den im Feld ermittelten phänologi-

schen Entwicklungen der Bestände in ausreichender Qualität bestimmt werden. Die Konfusionsmatrix (siehe Tab. 8-1) der Klassifizierungsergebnisse des *HyMAP* Datensatzes des Untersuchungsgebietes Wittbrietzen vom 20.06.2007 zeigt exemplarisch die Zuordnung der Pixel in die Zielklassen (Konfusionsmatrizen der weiteren Klassifizierungsergebnisse siehe Anhang J). Es wird dabei deutlich, dass ein Großteil der Fehler auf benachbarte Klassen, bzw. angrenzende phänologische Entwicklungsstadien entfällt. Aufgrund der Auswahl der Feldbeprobungstransekte, die im Bezug zur Gesamtgröße der klassifizierten Schläge nur einen sehr geringen Teil dieser abdecken, sind potenzielle Abweichungen von \pm einem phänologischen Entwicklungsstadium innerhalb der analysierten Bestände nicht auszuschließen. Heterogene Bodenverhältnisse und damit ein verändertes Wasserdargebot für die Pflanzen könnten diese Wachstumsunterschiede bedingen.

Tab. 8-1: Konfusionsmatrix der *pMLKsim* Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des *HyMap* Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.

	wb 09	wb 10	wb 11	wb 12	wb 13	wr 08	wr 09	wr 10	wr 11	wr 12	ww 07	ww 08	ww 09	ww 10	
wb 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 12	0	2	4	11224	2811	0	0	201	32	0	0	0	1092	28	15394
wb 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 11	0	1	5	102	926	0	0	6387	3610	0	0	2	3478	43	14554
wr 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 09	0	0	0	0	0	1159	0	184	594	0	3	185	3451	222	5798
ww 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	3	9	11326	3737	1159	0	6772	4236	0	3	187	8021	293	35746

Durch die Einbeziehung der direkt benachbarten phänologischen Entwicklungsstadien, zu den im Feld ermittelten Werten, steigen die Klassifizierungsgenauigkeiten der Datensätze der Untersuchungsgebiete Wittbrietzen und Groß Kreuz deutlich (siehe Tab. 8-2). Es werden dabei annähernd die Genauigkeiten der Ergebnisse der reinen

Artenbestimmung erreicht. Die Daten des hyperspektralen *HyMap* Systems, sowie den multispektralen *Sentinel-2* und *RapidEye* Daten weisen die besten Ergebnisse auf, wohingegen die Klassifizierungsgenauigkeiten für *WorldView-2* und *TM7* im Vergleich dazu deutlich geringer sind.

Tab. 8-2: Veränderung der Genauigkeiten der *pMLKsim* Klassifizierung durch Einbeziehung benachbarter phänologischer Entwicklungsphasen für die Arten- und Phänologiebestimmung der Datensätze der UG Wittbrietzen und Groß Kreutz.

pMLKsim (Art + Phäno.)	Güte- maß	WB 070620	WB 070620 ± 1 phänol. Phase	GK 070620	GK 070620 ± 1 phänol. Phase
HyMap	oAcc [%]	51	78	0	100
	aAcc [%]	52	75	0	100
	Kappa	0,37	0,66	-	-
Sentinel-2	oAcc [%]	15	77	0	98
	aAcc [%]	24	73	0	98
	Kappa	0,08	0,64	-	-
WorldView-2	oAcc [%]	13	55	0	20
	aAcc [%]	22	56	0	20
	Kappa	0,08	0,33	-	-
TM7	oAcc [%]	46	55	0	0
	aAcc [%]	54	63	0	0
	Kappa	0,36	0,39	-	-
RapidEye	oAcc [%]	30	72	0	82
	aAcc [%]	42	75	0	82
	Kappa	0,23	0,61	-	-

Die Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der simulierten Bestandreflexionen zu den tatsächlich im Feld vorgefundenen, zeigt im Gegensatz zur Analyse der Klassen des *HyMap* Datensatzes Wittbrietzen (siehe Abb. 7-2) für die Datensätze Fichtwald (30.04.2011 und 28.06.2011) und Demmin (25.05.2012) deutlich schlechtere Übereinstimmungen auf (siehe Abb. 8-1 bis Abb. 8-3). Für die Daten Fichtwald vom 30.04.2011 zeigen die simulierten Bestandsspektren speziell im visuellen Bereich deutlich zu geringe Albedowerte und starke Verlaufsunterschiede im Vergleich zu den Bilddaten. Die Unterschiede des Datensatzes Fichtwald vom 28.06.2011 sind sowohl für die Albedo als auch bei den Verlaufsunterschieden etwas geringer, jedoch noch zu beträchtlich um auf der Basis der simulierten Daten ein qualitativ hochwertige Klassifizierung zu ermöglichen. Die Simulationsergebnisse für die Daten des UG Demmin vom 25.05.2012 weisen für Winterroggen in der Blüte und Winterweizen im Schossen sehr deutliche Verlaufs- und Albedounterschiede zu den Bilddaten auf. Demgegenüber entsprechen die simulierten Winterweizendaten zum Zeitpunkt des Ährenschwelens denen des Bilddatensatzes sehr gut.

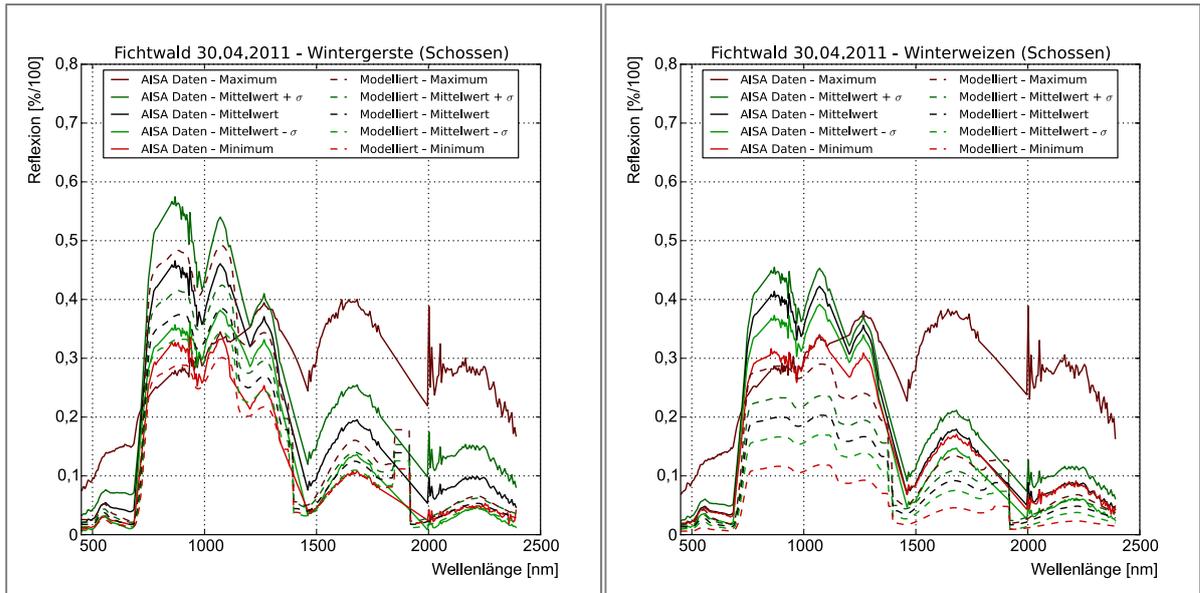


Abb. 8-1: Statistische Verteilung der modellierten Daten (gestrichelt) im Vergleich zu den AISA Daten der Testflächen des UG Fichtwald am 30.04.2011 (durchgezogen)

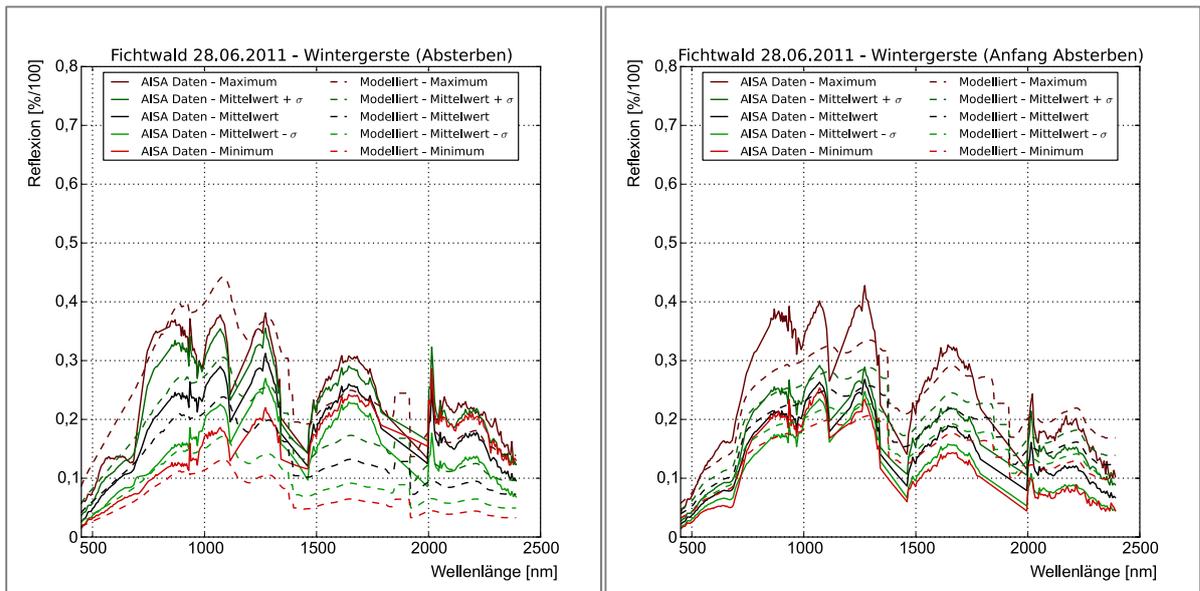


Abb. 8-2: Statistische Verteilung der modellierten Daten (gestrichelt) im Vergleich zu den AISA Daten der Testflächen des UG Fichtwald am 28.06.2011 (durchgezogen)

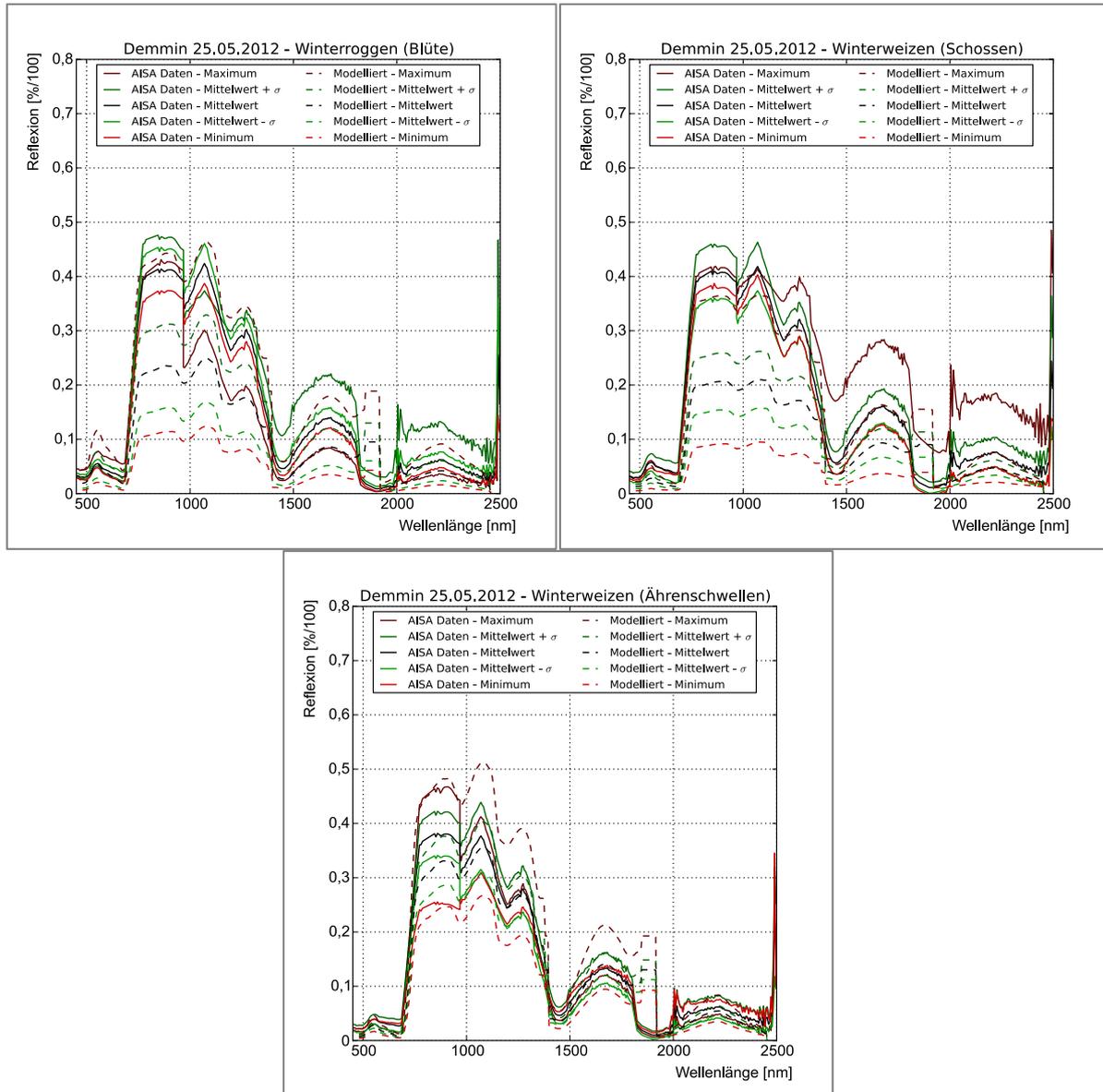


Abb. 8-3: Statistische Verteilung der modellierten Daten (gestrichelt) im Vergleich zu den *HySpex* Daten der Testflächen des UG Demmin am 25.05.2012 (durchgezogen)

8.1.2 Bedeutung der Merkmalsselektion

Die Einbeziehung von Bilddaten in den Prozess der Merkmalsselektion des *pMLKsim+* führt im Vergleich zur reinen Verwendung der simulierten Daten mit wenigen Ausnahmen zu einer deutlichen Steigerung der Klassifizierungsgenauigkeiten. Für die Bestimmung der Art und der phänologischen Entwicklung steigen die oAcc im Durchschnitt für alle Datensätze um 31 %, die aAcc um Ø 27 % und Kappa um Ø 13 % (siehe Tab. 8-3). Für die Bestimmung der Art ergeben sich entsprechende durchschnittliche Steigerungsraten von oAcc 13 %, aAcc 11 % und Kappa 10 %.

Tab. 8-3: Mittlere Änderung der Klassifizierungsgenauigkeiten zwischen den *pMLKsim* und den *pMLKsim+* Klassifizierungsergebnissen für die Bestimmung der Art und der Phänologie

Genauigkeits- steigerung	HyMap AISA HySpex	Sentinel-2	WorldView-2	Landsat TM7	RapidEye
oAcc [%]	33	41	18	12	25
aAcc [%]	32	30	14	8	29
Kappa [%]	12	8	2	13	18

Die Ursache dieser mitunter deutlichen Steigerungsraten muss im Prozess der Merkmalsselektion liegen, da hierbei offensichtlich nicht die optimalen Merkmale zur Trennung der Zielklassen in den Bilddaten selektiert wurden. Die Merkmalsauswahl ist so programmiert, dass stets diejenigen Merkmale ausgewählt werden, welche die höchsten Genauigkeiten für die Trennung der Trainingsdaten liefern. Im Zuge der Merkmalsauswahl müssen demnach im Falle des *pMLKsim* Merkmale selektiert worden sein, die offensichtlich weniger gut auf die realen Bilddaten übertragen werden können.

Aus der Analyse der selektierten Merkmale, die jeweils für die *pMLKsim* bzw. die *pMLKsim+* Klassifizierung verwendet werden, geht hervor, dass sich die Unterschiede auf jene Klassenpaare beschränken, welche die Klassen wb12, wr11 und ww09 enthalten. In diese Klassen flossen im Rahmen der *pMLKsim+* Klassifizierungsabläufe die Bilddaten ein, sodass sich die Unterschiede erklären. Im Gegensatz dazu blieben die selektierten Merkmale der übrigen Klassenpaare stabil.

Für zukünftige Arbeiten ergibt sich daraus, dass die Merkmalsselektion um eine Art Robustheitsprüfung erweitert werden muss, welche die aus den simulierten Daten abgeleiteten Merkmale auf ihre Übertragbarkeit auf unabhängige Bilddaten testet. Eine Grundlage hierfür kann nur eine Vielzahl von Bilddaten darstellen, wobei mittels eines iterativen Prozesses die relevanten übertragbaren Merkmale sensorspezifisch bestimmt werden müssen. Nur so kann in zukünftigen Untersuchungen die Wahrscheinlichkeit der Selektion von nicht optimal zur Klassentrennung geeigneten Merkmalen schrittweise minimiert werden.

Die Diskrepanz zwischen den selektierten Merkmalen der *pMLKsim* und der *pMLKsim+* Klassifizierung ist für den *HyMap* Datensatz des UG Wittbrietzen in der Tab. 8-4 dargestellt. Es wird deutlich, dass bei alleiniger Verwendung der simulierten Trainingsdaten zumeist ein Merkmal ausreichend ist um die Trainingsdaten voneinander zu separieren. Es kommen dabei besonders häufig auf Flächenberechnung basierende Merkmale zu Anwendung. Die Einbeziehung von Bilddaten in den *pMLKsim+* Merkmalsauswahlpro-

zess führt zu einer Vergrößerung des Merkmalsraumes, sodass in einigen Klassen die Kombination von Merkmalen notwendig wird (z.B. Klassepaar wb12 – wr11), um eine optimale Klassentrennung der Trainingsdaten zu realisieren. Eine Häufung genutzter Merkmalstypen lässt sich hierbei jedoch nicht erkennen.

Tab. 8-4: Unterschiede in der Merkmalsselektion zwischen *pMLKsim* und *pMLKsim+* für die *HyMap* Daten Wittbrietzen.

		<i>pMLKsim</i>				<i>pMLKsim+</i>			
Kl. 1	Kl. 2	Merkmalstyp	spektrale Vorprozessierung	WVL 1	WVL 2	Merkmalstyp	spektrale Vorprozessierung	WVL 1	WVL 2
wb12	wb09	Fläche	Kont. ber. (absolut)	747,6	776,0	Pol. 2 (x0)	Kont. ber. (absolut)	660,8	747,6
wb12	Wb10	Pol. 1 (x1)	normalisiert	2141,2	2248,0	Pol. 2 (x0)	normalisiert	761,8	847,1
wb12	wb11	Fläche	normalisiert	1991,1	2141,2	Ratio	-	1599,6	1702,3
						Pol. 1 (x1)	Kont. ber. (relativ)	1664,5	1714,9
wb12	wb13	Pol. 2 (x1)	-	790,2	1638,9	Ratio	Kont. ber. (absolut)	469,0	587,8
wb12	wr08	Pol. 1 (RMSE)	Kont. ber. (absolut)	776,0	832,9	Fläche	normalisiert	733,2	776,0
wb12	wr09	Fläche	Kont. ber. (absolut)	747,6	790,2	Pol. 2 (x0)	Kont. ber. (absolut)	631,8	790,2
wb12	wr10	Pol. 1 (RMSE)	Kont. ber. (absolut)	718,9	776,0	Fläche	normalisiert	587,8	675,4
						Pol. 2 (x0)	-	631,8	790,2
						Fläche	-	1546,5	2248,0
wb12	wr11	Pol. 2 (x0)	Kont. ber. (absolut)	874,7	1519,0	Pol. 2 (x2)	normalisiert	761,8	832,9
						Ratio	-	483,9	528,4
						Fläche	-	483,9	704,5
wb12	wr12	Fläche	Kont. ber. (absolut)	818,8	1991,1	Fläche	Kont. ber. (absolut)	832,9	2010,4
wb12	ww07	Fläche	Kont. ber. (absolut)	907,7	1505,2	Fläche	normalisiert	733,2	776,0
wb12	ww08	Pol. 2 (x2)	Kont. ber. (absolut)	747,6	832,9	Pol. 2 (x1)	Kont. ber. (absolut)	631,8	790,2
wb12	ww09	Fläche	Kont. ber. (absolut)	818,8	847,1	Pol. 2 (x1)	normalisiert	747,6	847,1
wb12	ww10	Fläche	Kont. ber. (absolut)	907,7	1505,2	Pol. 1 (x1)	Kont. ber. (absolut)	704,5	832,9
wr11	wb09	Fläche	Kont. ber. (absolut)	733,2	761,8	Pol. 1 (RMSE)	Kont. ber. (absolut)	690,0	747,6
wr11	wb10	Pol. 2 (x1)	Kont. ber. (absolut)	675,4	761,8	Fläche	normalisiert	747,6	776,0
wr11	wb11	Fläche	Kont. ber. (absolut)	2176,6	2212,4	Pol. 1 (RMSE)	Kont. ber. (absolut)	747,6	847,1
wr11	wb13	Fläche	Kont. ber. (absolut)	2176,6	2212,4	Pol. 2 (x0)	Kont. ber. (relativ)	617,3	704,5
wr11	wr08	Pol. 1 (x0)	Kont. ber. (relativ)	1651,7	1702,3	Ratio	Kont. ber. (relativ)	1664,5	1677,2
wr11	wr09	Pol. 1 (RMSE)	Kont. ber. (absolut)	733,2	832,9	Pol. 1 (x0)	Kont. ber. (relativ)	1714,9	2193,9
wr11	wr10	Pol. 1 (RMSE)	Kont. ber. (absolut)	887,7	1519,0	Pol. 1 (x1)	Kont. ber. (relativ)	1714,9	2193,9
wr11	wr12	Fläche	Kont. ber. (absolut)	832,9	1991,1	Fläche	Kont. ber. (absolut)	469,0	832,9
wr11	ww07	Ratio	-	660,8	690,0	Ratio	Kont. ber. (relativ)	558,1	675,4
wr11	ww08	Ratio	-	617,3	631,8	Ratio	Kont. ber. (relativ)	558,1	675,4
wr11	ww09	Pol. 1 (x2)	Kont. ber. (relativ)	631,8	704,5	Ratio	-	498,7	543,3
wr11	ww10	Fläche	Kont. ber. (absolut)	718,9	761,8	Pol. 1 (x0)	-	1599,6	1677,2
ww09	wb09	Pol. 1 (x1)	Kont. ber. (absolut)	832,9	907,7	Pol. 1 (RMSE)	Kont. ber. (absolut)	690,0	747,6
ww09	wb10	Fläche	Kont. ber. (relativ)	602,6	646,2	Ratio	normalisiert	675,4	1664,5
ww09	wb11	Fläche	Kont. ber. (absolut)	818,8	847,1	Fläche	Kont. ber. (absolut)	2176,6	2212,4
ww09	wr08	Ratio	-	2159,2	2248,0	Ratio	Kont. ber. (relativ)	558,1	690,0
ww09	wr09	Pol. 1 (x1)	Kont. ber. (absolut)	818,8	874,7	Fläche	Kont. ber. (absolut)	602,6	818,8
ww09	wr10	Pol. 1 (RMSE)	Kont. ber. (absolut)	887,7	1519,0	Ratio	Kont. ber. (absolut)	660,8	675,4
ww09	wr12	Pol. 2 (x2)	Kont. ber. (absolut)	832,9	923,1	Fläche	normalisiert	498,7	543,3
ww09	ww07	Ratio	-	2159,2	2248,0	Fläche	Kont. ber. (absolut)	469,0	818,8
ww09	ww08	Ratio	-	2141,2	2265,7	Ratio	Kont. ber. (relativ)	558,1	690,0
		Fläche	-	1546,5	2141,2	Ratio	Kont. ber. (absolut)	2212,4	2367,4
ww09	ww10	Pol. 1 (RMSE)	Kont. ber. (relativ)	2048,4	2248,0	Ratio	Kont. ber. (relativ)	469,0	718,9

Polynom 1: $y = x_0 + x_1 * wave$
Polynom 2: $y = x_0 + x_1 * wave + x_2 * wave^2$

8.1.3 Interpretation der Fehlklassifikationen

Neben der Merkmalsselektion kommen weitere Kovariate für die mitunter mangelhaften Klassifizierungsergebnisse in Betracht. Einer der Hauptgründe für die Fehlklassifizierungen, in den Datensätzen Wittbrietzen (20.06.2007) und Fichtwald (30.04.2010), ist die Durchsetzung der zu klassifizierenden Bestände mit auftretender Begleitvegetation. Am Beispiel des *HyMap* Datensatzes des Untersuchungsgebietes Wittbrietzen vom 20.06.2007 lassen sich die Fehlklassifizierungen einiger lokaler Bereiche, der mit Wintergerste und Winterroggen bestandenen Schläge, auf eine zum Teil sehr starke Durchsetzung der Bestände mit *Centaurea cyanus* (Kornblume) zurückführen (siehe Abb. 8-4). Das Reflexionssignal der Bestände wird durch die grünen vitalen Pflanzenbestandteile, sowie die intensive Blütenfarbe der Begleitvegetation so sehr verändert, dass die simulierten Trainingsdaten keine geeignete Grundlage für die Klassifizierung dieser Flächen darstellen.



Abb. 8-4: Durchsetzung von Teilflächen der Bestände von Wintergerste (links) und Winterroggen (rechts) des UG Wittbrietzen am 20.06.2007 mit Begleitvegetation.

Eine Bestätigung für die Durchsetzung und der damit verbundenen potenziellen Verdrängung der angebauten Kulturen wird in den Ertragsergebnissen (siehe Abb. 8-5, rechts) sehr gut widerspiegelt. Auffällig ist dabei, dass die unterschiedlichen Erträge des Winterweizenschlages keine Minderung der Klassifizierungsgenauigkeit nach sich ziehen, sodass davon ausgegangen werden kann, dass der Schlag zwar sehr heterogene Ertragspotenziale aufweist, die Bestandsreflexion jedoch vornehmlich durch Winterweizen bestimmt wird. Im Gegensatz dazu lassen sich für den Winterroggenschlag sehr große Übereinstimmungen zwischen den Ertragsergebnisse und den Klassifizierungsergebnisse ziehen. In besonderem Maße trifft dies auf die zentralen Bereiche des Schlages zu, für welche die zum Teil starke Durchsetzung mit Begleitvegetation bekannt ist. Eine Analyse der Ertragsergebnisse und der fehlklassifizierten Bereiche des Wintergersteschlages ist leider aufgrund fehlender Ertragsdaten nicht möglich.

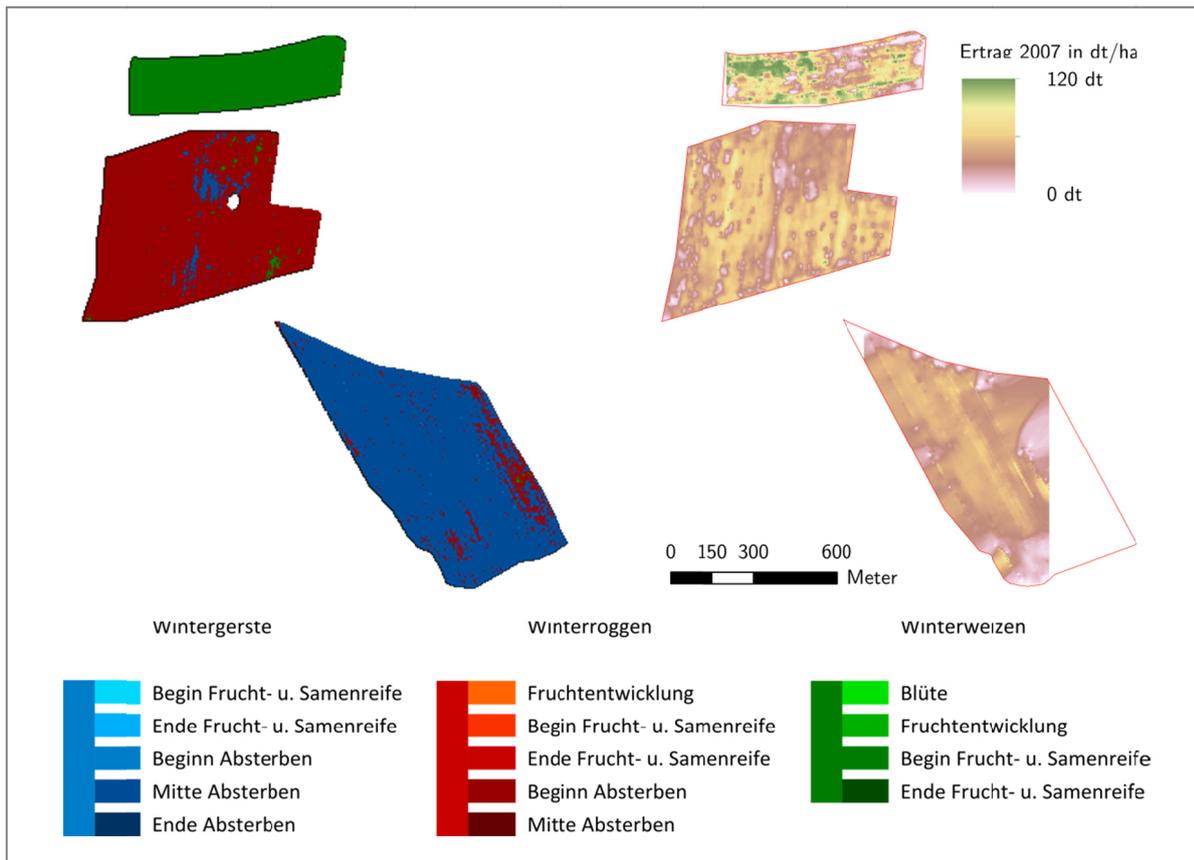


Abb. 8-5: Gegenüberstellung des *pMLKsim+* Klassifizierungsergebnisses des *HyMap* Datensatzes (links) und der Mähdrescher basierten Ertragsmessungen (rechts) für das UG Wittbrietzen im Jahr 2007.

Für den *AISA*-Datensatz des Untersuchungsgebietes Fichtwald vom 30.04.2011 stellt die bestandsdominierende Begleitvegetation auf den analysierten Schlägen ebenfalls ein großes Problem dar. Die Wintergerste- und Winterweizenpflanzen bedecken im Stadium des beginnenden Schossens lediglich ca. 5 % der Fläche bei einer Gesamtvegetationsbedeckung von ca. 30 % auf dem Winterweizenschlag und ca. 80 % auf dem Wintergerstesschlag (siehe Abb. 8-6).



Abb. 8-6: Durchsetzung der Bestände von Wintergerste (links) und Winterweizen (rechts) des UG Fichtwald am 30.04.2011 mit Begleitvegetation.

Mit fortschreitender phänologischer Entwicklung nimmt der Einfluss der Begleitvegetation im Untersuchungsgebiet Fichtwald deutlich ab. Der Wintergersteschlag ist zum Aufnahmezeitpunkt des AISA-Datensatzes am 28.06.2011 weitgehend frei von vitaler Begleitvegetation (siehe Abb. 8-7, links). Das Foto des Winterweizenschlages (Abb. 8-7, rechts) zeigt in den oberen Bildbereichen eine Durchsetzung einiger Bereiche mit *Apera spica-venti* (Gemeiner Windhalm), welcher zum Aufnahmezeitpunkt ca. 5 % der Schlagfläche bedeckt. Der Einfluss der Begleitvegetation ist somit im Vergleich zur Aufnahme vom 30.04.2011 deutlich reduziert. Dennoch sind die Klassifizierungsergebnisse des Datensatzes sehr fehlerbehaftet, sodass das Reflexionssignal der Bestände neben der Begleitvegetation, durch weitere Kovariate von den simulierten Trainingsdaten abweicht. Diese Vermutung erhärtet sich bei der Betrachtung der Bestände des Untersuchungsgebietes Demmin, die zum Aufnahmezeitpunkt (25.05.2012) nicht durch Begleitvegetation beeinflusst (siehe Abb. 8-8) sind.



Abb. 8-7: Bestände von Wintergerste (links) und Winterweizen (rechts) des UG Fichtwald am 28.06.2011.



Abb. 8-8: Bestände von Wintergerste (links) und Winterweizen (rechts) des UG Demmin am 25.05.2012 ohne Begleitvegetation.

Weitere bekannte Unterschiede zwischen der Anbausituation des Untersuchungsgebietes Wittbrietzen, die der Simulation zu Grunde liegt und den Untersuchungsgebieten Fichtwald und Demmin, stellen die veränderten Bodenverhältnisse, sowie ein veränderter Reihenabstand dar. In die Simulation ist lediglich ein standorttypischer Boden des Untersuchungsgebietes Wittbrietzen mit einer konstanten Bodenfeuchte integriert. Wie aus den Untersuchungen des Kapitels 6. 5 hervorgeht, nimmt der Einfluss des Bodens erst mit dem Beginn des Schossens rapide ab. Speziell für junge Entwicklungsstadien ist somit eine Implementierung standorttypischer Bodendaten in den Simulationsprozess unerlässlich, um eine realitätsnahe Simulation zu ermöglichen. Hierfür ist der Aufbau einer umfassenden Bodendatenbank erforderlich. Die standortspezifische Auswahl geeigneter Bodenspektren aus der Datenbank könnte mittels vegetationsfreier Hyperspektraldaten realisiert werden.

Der in der Simulation verwendete Reihenabstand von ca. 13 - 17 cm unterscheidet sich zu den Reihenabständen von ca. 10 cm der UG Fichtwald und UG Demmin. In Abhängigkeit der Art und der phänologischen Entwicklung der Bestände führt das zu deutlichen Unterschieden in der Bestandsreflexion (siehe Kapitel 6. 2).

Über diese bekannten Abweichungen hinaus lassen sich auch sortenspezifische Unterschiede, welche zu einer veränderten Pflanzengeometrie sowie abweichenden optischen Eigenschaften der Pflanzen führen können, nicht vollends ausschließen. Eine weitere Möglichkeit kann eine stärker als erwartete Kopplung der optischen Eigenschaften der Pflanzenteile an die Boden- und Nährstoffverhältnisse eines Standortes sein. Damit würde eine Übertragung von Reflexionsdaten der Untersuchungsgebiete Wittbrietzen und Groß Kreuz auf die weiteren Standorte deutlich erschwert werden. Visuell wurde diese Vermutung bislang nicht bestätigt, kann jedoch auch nicht gänzlich ausgeschlossen werden, da keine vergleichenden Messungen gleicher Arten und Sorten durchgeführt wurden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass jegliche äußere Einflüsse, welche nicht in der Simulation der Bestandsreflexion berücksichtigt sind, zu einer verstärkten Diskrepanz zwischen den simulierten Trainingsdaten und den Bilddaten führen. Dies wiederum geht mit einem verminderten Anwendungspotenzial dieser Daten für die Klassifizierung einher.

8. 2 Einfluss der spektralen Auflösung auf die Klassifizierungsgenauigkeit

Aufgrund der vielfältigen potenziellen Fehlerquellen auf die Klassifizierungsergebnisse basiert die Analyse des Einflusses der spektralen Auflösung lediglich auf den Klassifizierungsergebnissen der Daten des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007. Die Ergebnisse für die kombinierte Bestimmung der Pflanzenart und der Phänologie sind unabhängig von den verwendeten Aufnahmesystemen bei Nutzung des *pMLKsim* unzureichend. Für die Erfassung der Art weisen die Daten der Sensoren *HyMap*, *Sentinel-2* und *RapidEye* vergleichbare Ergebnisse, wohingegen die Daten von *WorldView-2* und *Landsat TM7* die

Güte nicht erreichen. Die deutlich höhere spektrale Auflösung der *HyMap* Daten resultiert also in keiner signifikanten Verbesserung der Genauigkeiten.

Die Analyse der *pMLKsim+* Klassifizierungsergebnisse, welche auf einer optimierten Merkmalsauswahl basiert, weisen hingegen deutlich Unterschiede zwischen den klassifizierten *HyMap* Daten und den Klassifizierungen auf Basis der multispektralen Daten auf. Sofern eine optimale Merkmalsauswahl sichergestellt werden kann und keine beeinträchtigenden Randfaktoren wie z.B. Begleitvegetation oder Pflanzenkrankheiten existieren, erlauben hyperspektrale Daten die hochgenaue Klassifizierung der Pflanzenart und der phänologischen Entwicklung eines Bestandes auf Grundlage eines Datensatzes eines einzelnen Aufnahmezeitpunktes. Die hohe spektrale Auflösung gestattet die Berechnung charakteristischer spektraler Bestandsmerkmale für eine detaillierte Vegetationsbeschreibung. Den entscheidenden Punkt für eine erfolgreiche Klassifizierung stellt, wie schon in Abschnitt 8.1.2 beschrieben, die Merkmalsselektion dar.

Zwischen den verschiedenen aufgelösten Multispektraldaten lassen sich nur geringe Unterschiede in den Klassifizierungsgenauigkeiten erkennen. Die Klassifizierungsgenauigkeiten der 5-kanaligen *RapidEye* Daten entsprechen nahezu identisch denen der 13-kanaligen *Sentinel-2* Daten.

Da diese Analysen lediglich auf einem Zeitpunkt basieren, ist eine generelle Aussage über die Potenziale der einzelnen Systeme aktuell nicht möglich. Bezüglich der hyperspektralen Daten ist zu jeglichen Aufnahmezeitpunkten mit sehr guten Ergebnissen zu rechnen, sofern die simulierte Bestandsreflexion den tatsächlichen Gegebenheiten entspricht. Auch zwischen den multispektralen Systemen sind Unterschiede zu bestimmten Aufnahmezeitpunkten wahrscheinlich. In Phasen der Chlorophylländerung wird z.B. für das *Sentinel-2* System, aufgrund der Bänder im Bereich des *RedEdge*, eine deutlich detaillierte Beschreibung des Bestandes erwartet, als z.B. für das 5-kanalige *RapidEye* System.

9 Schlussfolgerung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das Potenzial simulierter Reflexionsdaten, zur detaillierten Beschreibung von Getreidebeständen und Eignung dieser Daten als Klassifizierungsgrundlage für Fernerkundungsdaten untersucht.

Die Grundlage für die Analysen stellt das zunächst dafür entwickelte spektrale, räumlich und zeitlich variable, auf detaillierten 4D-Pflanzenmodellen basierende, Modell zur Simulation bodennaher Getreidebestandsreflexion dar. Die sich anschließende Analyse der Einflüsse verschiedener bestandsstruktureller, optischer, und aufnahmegeometrischer Parameter trägt maßgeblich zum Verständnis des Einflusses der analysierten Parameter auf das Reflexionssignal bei. Auf Basis dieser Untersuchungen konnten die Rahmenbedingungen für die Simulation realitätsnaher Getreidebestandsreflexion zur Generierung von Trainingsdaten für die Klassifizierung optischer Fernerkundungsdaten festgelegt werden. Die simulierten Daten wurden im Anschluss unter Verwendung bestehender und weiterentwickelter Klassifizierungsmethoden auf die Fernerkundungsdaten von sechs verschiedenen Aufnahmezeitpunkten in vier Untersuchungsgebieten angewendet. Die Klassifizierungen wurden dabei jeweils auf realen hyperspektralen Flugzeugscannerdaten der Systeme *AISADual*, *HyMap* und *HySpex*, sowie daraus simulierten multispektralen Daten der Systeme *Landsat-TM7*, *RapidEye*, *Sentinel-2* und *WorldView-2* angewandt.

Aus der Arbeit lassen sich zusammenfassend folgende Erkenntnisse ableiten:

- ❖ Die Nutzung detaillierter 4D-Bestandsmodelle in Kombination mit Monte-Carlo Raytracing stellt eine sehr gute Methode zur Simulation realitätsnaher Bestandsreflexion dar. Der Aufbau der komplexen 4D-Pflanzenmodelle und die damit einhergehende Erfassung der geometrischen und optischen Eigenschaften, sowie der Informationen über das Verhalten der Pflanzenorgane über einen phänologischen Zyklus ist zwar mit beträchtlichem Aufwand verbunden, muss jedoch nur einmal erfolgen. Dafür werden im Anschluss zeitlich hochaufgelöste phänologiebezogene Analysen möglich, die mit statischen Pflanzenmodellen eines Wachstumszustands nicht realisierbar wären. Ist die phänologische Entwicklung der Pflanzen nicht von Bedeutung für eine zu analysierende Fragestellung, kann die Nutzung bestehender Pflanzenmodelle, wie z.B. die kostenlosen Modelle der *XfrogPlants* (*Xfrog Inc. 2013*) und *The Free 3D Models* (*The Free 3D Models 2013*) oder kommerziell erhältliche, wie z.B.

XfrogPlants und *Laubwerk Plants* (Laubwerk 2013), eine zeitsparende Alternative darstellen. Der Aufbau der Materialdatenbank für die einzelnen Pflanzenelemente ist dennoch notwendig. Für zukünftige Materialerhebungen sind neben der Verwendung laborbasierter abbildender Spektroskopie, welche eine zeiteffiziente analoge Messung sehr vieler Einzelmaterialspektren erlaubt, auch die Anwendungsversuche mit simulierten Materialspektren (z.B. mit *Prospect*) geplant.

- ❖ In der Arbeit wurden erstmalig synthetische Trainingsdaten auf der Basis simulierter 4D-Vegetationsbestände für die Klassifizierung von optischen Fernerkundungsdaten genutzt. Bei optimaler Nachbildung eines Pflanzenbestands, sowie geringem Einfluss von Störfaktoren (z.B. Begleitvegetation, Chlorosen), lassen sich bei Verwendung geeigneter Klassifizierungsmethoden sehr gute Klassifizierungsergebnisse zur Bestimmung der Pflanzenart und der phänologischen Entwicklung eines Bestandes erzielen. Dies konnte anhand der Daten des UG Wittbrietzen demonstriert werden. Unter der Voraussetzung, dass eine realitätsnahe Simulation der Bestandsreflexion erfolgt, ist für einen operativen Einsatz des Klassifizierungsverfahrens die Integration weiterer Pflanzenarten notwendig. Darüber hinaus erfolgt in der derzeitigen Form keine Zurückweisung von Klassen, sodass bei einer Klassifizierung ohne die Maskierung der von Getreide bestehenden Flächen, alle Pixel des gesamten Datensatzes zu einer der drei Klassen zugeordnet werden. Dieses Problem könnte zukünftig über Vorklassifizierungen oder die Integration von Schwellwerten gelöst werden.
- ❖ Die Übertragbarkeit des Klassifizierungsansatzes auf weitere Datensätze und unbekannte Untersuchungsgebiete ist aktuell als problematisch zu bewerten. Der Einfluss potenzieller Störfaktoren ist groß und die möglichen Ursachen sind vielfältig. Eine Anwendung dieser Methode ist daher gegenwärtig nur für Gebiete empfehlenswert für die gewisse Vorkenntnisse vorhanden sind (z.B. Bodenarten, Reihenabstand), sodass diese Parameter standortspezifisch in den Simulationsprozess integriert werden können.

Im Hinblick auf die weitere Nutzung der entwickelten Klassifizierungsmethodik ist neben der geplanten Integration weiterer Getreidearten und Feldfrüchte die Übertragung auf natürliche Offenlandschaften denkbar, wie z.B. Grünlandflächen, Heidelandschaften oder aufgegebene Truppenübungsplätze, deren ökosystemare Überwachung zunehmend in den Fokus rückt (Delalieux et al. 2012; Thoonen et al. 2012; Neumann et al. 2013). Hierfür sind jedoch spezifische Kenntnisse über räumliche und zeitliche Verteilungsmuster der Arten innerhalb einer Pflanzengemeinschaft notwendig (Dierschke 1994). Die Generierung dieser natürlichen Verteilungsmuster ist in der Landschaftsvisualisierung gegenwärtig eine der zentralen Fragestellungen (Deussen 2003; Benes & Guerrero 2004; Röhrich & Clasen 2005).

Eine Übertragung auf Forstbestände ist theoretisch möglich, jedoch mit sehr großem Aufwand zur Generierung der hoch komplexen 4D-Pflanzenmodelle für Bäume sowie dem Aufbau der optischen Materialdatenbank verbunden. Nach Förster et al. (2010)

existiert noch kein Modell, dass die räumlichen Verteilungsmuster nur einer Art mit einem Wachstumsmodell koppelt, sodass der aktuelle Schwerpunkt in der Forstwirtschaft zunächst in der Modellierung realistischer Bestände liegt. Eine weitere Limitierung in einer potenziellen Anwendung für die Forstwirtschaft stellt die im Vergleich zu landwirtschaftlichen Beständen viel ausgedehntere benötigte Simulationsszenengröße mit entsprechend deutlich mehr Szenenelementen dar, die zu einer entsprechenden Potenzierung der erforderlichen Rechenzeit führen.

Im Umkehrschluss wirft das die Frage auf, wie komplex die Pflanzenmodelle überhaupt sein müssen und ab welchem Punkt eine Erhöhung der Anzahl der Teilflächen pro Pflanze keine signifikante Änderung des Reflexionssignals eines Bestandes bedingt. Diese Fragestellung wird aktuell im Rahmen einer Diplomarbeit (Pischel 2013) untersucht.

Generell stellt jedoch die in dieser Arbeit genutzte Methode zur Simulation des Reflexionssignals von Pflanzenbeständen ein sehr wirkungsvolles und vielfältig anwendbares Werkzeug dar. Neben der Analyse des Einflusses von Bestandsparametern auf das Reflexionssignal und der Nutzung als Eingabedaten für eine Klassifizierung, die in dieser Studie thematisiert waren, findet das Simulationsverfahren aktuell Anwendung für die Korrektur BRDF-bedingter Einflüsse auf Vegetationsindizes (Kuester 2011), sowie für die Quantifizierung von Bodenfeuchte unter Getreidebeständen (Spengler et al. 2011; Spengler et al. 2013). Zudem kann das Modellierungssystem Eingabedaten für die Datensimulation zukünftiger Fernerkundungssysteme, wie z.B. *EnMap* oder *Sentinel-2* bereitstellen.

Literaturverzeichnis

- Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). *World agriculture towards 2030/2050: the 2012 Revision*, ESA Working paper No. 12-03. Rom: FAO.
- Allen, W.A., Gausman, H.W., Richardson, A.J., & Thomas, J.R. (1969). Interaction of Isotropic Light with a Compact Plant Leaf. *J. Opt. Soc. Am.*, *59*, 1376-1379.
- Analytic Spectral Devices Inc. (2010). *FieldSpec 3 User Manual*. Colorado, USA.
- Anderson, G.P., Berk, A., Acharya, P.K., Bernstein, L.S., Adler-Golden, S.M., Lee, J., & Muratov, L. (2009). Reformulated Atmospheric Band Model Method for Modeling Atmospheric Propagation at Arbitrarily Fine Spectral Resolution and Expanded Capabilities, *U.S. Patent #7593835*.
- Asner, G.P. (1998). Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, *20*.
- Baghestani, M., Zand, E., & Soufizadeh, S. (2006). Iranian winter wheat's (*Triticum aestivum* L.) interference with weeds: II. Growth analysis. *Pakistan Journal of Weed Science Research*, *12*, 131-144.
- Barczi, J.-F., Rey, H., Caraglio, Y., De Refeye, P., Barthélémy, D., Xue Dong, Q., & Fourcaus, T. (2008). AmapSim: A structural whole-plant simulator based on botanical knowledge and designed to host external functional models. *Annals of Botany*, *101*, 1125-1138.
- Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J., & Makin, I.W. (2000). Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*, *46*, 137-155.
- Bauriegel, A., Kühn, D., Schmidt, R., Hering, J., & Hannemann, J. (2001). Bodenübersichtskarte des Landes Brandenburg 1 : 300 000 (BÜK 300). In Kleinmachnow: Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg.
- Bégué, A. (1992). Modeling hemispherical and directional radiative fluxes in regular-clumped canopies. *Remote Sensing of Environment*, *40*, 219-230.
- Belward, A.S. (1991). Spectral Characteristics of vegetation, soil and water in the visible, near-infrared and middle infrared wavelengths. In Belward, A.S. & Valenzuela, C.R.

- (Hrsg.), *Remote Sensing and Geographical information Systems for Resource Management in developing countries*. Kluwer, Niederlande.
- Ben-Dor, E. (2002). Quantitative Remote Sensing of Soil Properties. *Advances in Agronomy*, 75, 173-243.
- Ben-Dor, E., Taylor, R.G., Hill, J., Dematte, J.A.M., Whiting, M.L., Chabrillat, S., & Sommer, S. (2008). Imaging Spectrometry for Soil Applications. *Advances in Agronomy*, 97, 321-392.
- Benes, B., & Guerrero, J.M.S. Clustering in Virtual Plant Ecosystems. *WSCG*, 2004. Plzen, Tschechische Republik.
- Bijonski, S., Schläpfer, D., Schaepman, M.E., Keller, J., & Itten, K.I. (2004). Aerosol mapping over land with imagery spectroscopy using spectral autocorrelation. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 367-375.
- Blackburn, G.A. (2006). Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *Journal of Experimental Botany*, 1-13.
- Bochow, M. (2009). Automatisierungspotenzial von Stadtbiotopkartierungen durch Methoden der Fernerkundung. Dissertation. Universität Osnabrück.
- Borel, C., Gerstl, S.A.W., & Powers, B.J. (1991). The radiosity method in optical remote sensing of structured 3-D surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 36, 13-44.
- Botha, E.J., Leblon, B., Zebarth, B., & Watmough, J. (2006). Non-destructive estimation of potato leaf chlorophyll from canopy hyperspectral reflectance using the inverted PROSAIL model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 1-15.
- Bresinsky, A., Körner, C., Kadereit, J.W., Neuhaus, G., & Sonnewald, U. (2008). *Strasburger - Lehrbuch der Botanik*. Spektrum Akademischer Verlag.
- Champagne, C.M., Staenz, K., Bannari, A., McNairn, H., & Deguise, J.-C. (2003). Validation of a hyperspectral curve-fitting model for the estimation of plant water content of agricultural canopies. *Remote Sensing of Environment*, 87, 148-160.
- Cheng, Y.-B., Zarco-Tejada, P.J., Riaño, D., Rueda, C.A., & Ustin, S.L. (2006). Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote Sensing of Environment*, 105, 354-366.
- Chmielewski, F.-M., & Köhn, W. (1999). The long-term agrometeorological field experiment at Berlin-Dahlem, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96, 39-48.
- Clark, R.N. (1999). Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy In Rencz, A. (Hrsg.), *Manual of Remote Sensing*. New York John Wiley and Sons, Inc.
- Cocks, T., Jensen, R., Stewart, A., Wilson, I., & Shields, T. The HyMap airborne hyperspectral sensor: the system, calibration and performance. *Proc. of the 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, 1998. Zürich.

- Cohen, M.F., & Wallace, J.R. (1993). *Radiosity and realistic image synthesis*. San Deigo: Academic Press Professional.
- Cordon, G.B., & Lagorio, M.G. (2007). Absorption and Scattering Coefficients: A Biophysical-Chemistry Experiment Using Reflectance Spectroscopy. *Journal of Chemical Education*, 84, 1167.
- Curran, P.J. (1985). *Principles of Remote Sensing*. London: Longman Group Limited.
- Curran, P.J. (1989). Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sensing of Environment*, 30, 271-278.
- Dalponte, M., Bruzzone, L., Vescovo, L., & Gianelle, D. (2009). The role of spectral resolution and classifier complexity in the analysis of hyperspectral images of forest areas. *Remote Sensing of Environment*, 113, 2345-2355.
- Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Atzberger, C., & van Wieren, S. (2008). Estimation of vegetation LAI from hyperspectral reflectance data: Effects of soil type and plant architecture. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10, 358-373.
- Daughtry, C.S.T. (2001). Discriminating Crop Residues from Soil by Shortwave Infrared Reflectance. *Agronomy Journal*, 93, 125-131.
- Dawson, T.P., Curran, P.J., & Plummer, S.E. (1998). LIBERTY—Modeling the Effects of Leaf Biochemical Concentration on Reflectance Spectra. *Remote Sensing of Environment*, 65, 50-60.
- de Reffye, P., Edelyn, C., Francon, J., Jäger, M., & Puech, C. Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development. *Computer Graphics*, 1988. 22 (S. 151-158).
- de Reffye, P., Elguero, E., & Costes, E. (1991). Growth construction in trees: a stochastic approach. *Acta biotheoretica*, 39, 325-342.
- Delalieux, S., Somers, B., Haest, B., Spanhove, T., Vanden Borre, J., & Mùcher, C.A. (2012). Heathland conservation status mapping through integration of hyperspectral mixture analysis and decision tree classifiers. *Remote Sensing of Environment*, 126, 222-231.
- Delta-T Devices Ltd. (2002). *SunScan Canopy Analysis System - User Manual SS1-UM-1.05*. Cambridge, Großbritannien.
- Deussen, O. (2003). Modellierung von Bewuchs, Eine Landschaft entsteht. *Computergenerierte Pflanzen*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Deussen, O., & Lintermann, B. (2005). *Digital Design of Nature - Computer Generated Plants and Organics*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Dierschke, H. (1994). *Pflanzensoziologie: Grundlagen und Methoden*. Stuttgart: UTB.
- Disney, M., Lewis, P., Knott, R., Hobson, P., Evans-Jones, K., & Barnsley, M.J. Validation of a manual measurement method for deriving 3D canopy structure using the BPMS. *Proceedings of IGARSS*, 1998. Seattle, WA.

- Disney, M., Lewis, P., & Saich, P. (2006). 3D modelling of forest canopy structure for remote sensing simulations in the optical and microwave domains. *Remote Sensing of Environment*, 100, 114-132.
- Drews, S., Neuhof, D., Juroszek, P., & Köpke, U. (2002). Einfluss von Sortenwahl, Reihenweite, und Drilldichte auf die Konkurrenzkraft von Winterweizen im Organischen Landbau. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII*, 527-532.
- Feret, J.-B., François, C., Asner, G.P., Gitelson, A.A., Martin, R.E., Bidel, L.P.R., Ustin, S.L., le Maire, G., & Jacquemoud, S. (2008). PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. *Remote Sensing of Environment*, 112.
- Fischer, J., & Grassl, H. (1984). Radiative transfer in an atmosphere-ocean system: an azimuthally dependent matrix-operator approach. *Applied Optics*, 23, 1032-1039.
- Förster, M., Spengler, D., Buddenbaum, H., Hill, J., & Kleinschmit, B. (2010). Ein Überblick über die Kombination spektraler und geometrischer Modellierung zur Anwendung in der forstlichen Fernerkundung. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation - PFG*, 4, 253-265.
- Fourty, T., Baret, F., Jacquemoud, S., Schmuck, G., & Verdebout, J. (1996). Leaf optical properties with explicit description of its biochemical composition: Direct and inverse problems. *Remote Sensing of Environment*, 56, 104-117.
- Frauendorf, J. (2002). Entwicklung und Anwendung von Fernerkundungsmethoden zur Ableitung von Wasserqualitätsparametern verschiedener Restseen des Braunkohlentagebaus in Mitteldeutschland. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- Ganapol, B.D., Johnson, L.F., Hammer, P.D., Hlavka, C.A., & Peterson, D.L. (1998). LEAFMOD: A New Within-Leaf Radiative Transfer Model. *Remote Sensing of Environment*, 63, 182-193.
- Gao, W. (1993). A simple bidirectional-reflectance model applied to a tallgrass canopy. *Remote Sensing of Environment*, 45, 209-224.
- Gastellu-Etchegorry, J.-P., Demarez, V., Pinel, V., & Zagolski, F. (1996). Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment*, 58, 131-156.
- Gastellu-Etchegorry, J.-P., Martin, E., & Gascon, F. (2004). DART: a 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 73-96.
- Gausman, H.W., Allen, W.A., & Escobar, D.E. (1974). Refractive Index of Plant Cell Walls. *Applied Optics*, 13, 109-111.

- Gerighausen, H., Borg, E., Wloczyk, C., Fichtelmann, B., Günther, A., H.H., V., Rosenberg, M., Schulz, M., & Engler, H.G. Demmin - a test site for the validation of Remote Sensing data products. General description and application during AgriSAR 206. *Proceedings on AGRISAR and EAGLE Campaigns Final Workshop*, 2007. Noordwijk, Niederlande.
- Gerstl, S.A.W., & Borel, C.C. (1992). Principles of radiosity method versus radiative transfer for canopy reflectance modelling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 271-275.
- Gitelson, A.A., & Merzlyak, M.N. (2004). Non-destructive assessment of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in higher plant leaves: Principles and algorithms. *Remote Sensing for Agriculture and the Environment*.
- Gitelson, A.A., Vinˆa, A.s., Ciganda, V., Rundquist, D.C., & Arkebauer, T.J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32, 1-4.
- Gobbetti, E., Spanò, L., & Agus, M. (2003). Hierarchical Higher Order Face Cluster Radiosity for Global Illumination Walkthroughs of Complex Non-Diffuse Environments. *Computer Graphics Forum*, 22, 563-572.
- Goel, N.S. (1988). Models of vegetaion canopy reflectance and their use in the estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*, 4, 1-222.
- Goel, N.S., Rozehnal, I., & Thompson, R.I. (1991). A computer graphics based model for scattering from objects of arbitrary shapes in optical region. *Remote Sensing of Environment*, 36, 73-104.
- Goetz, A.F.H., Kindel, B.C., Ferri, M., & Qu, Z. (2003). HATCH: Results from simulated radiances, AVIRIS and HYPERION. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 1215-1221.
- Govaerts, Y.M., & Verstraete, M.M. (1998). Raytran: a Monte Carlo ray-tracing model to compute light scattering in three-dimensional heterogeneous media. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 36, 493-505.
- Guanter, L., Alonso, L., & Moreno, J. (2005). A method for the surface reflectance retrieval from PROBA/CHRIS data over land: Application to ESA SPARC campaigns. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43, 2908-2917.
- Guanter, L., Estellés, V., & Moreno, J. (2007). Spectral calibration and atmospheric correction of ultra-fine spectral and spatial resolution remote sensing data. Application to CASI-1500 data. *Remote Sensing of Environment*, 109, 54-65.
- Guedon, Y., Barthélémy, D., Caraglio, Y., & Costes, E. (2001). Pattern analysis in branching and axillary flowering sequences. *Journal of Theoretical Biology*, 212, 481-520.
- Guyot, G., Baret, F., & Jacquemoud, S. (1992). Imaging spectroscopy for vegetation studies. In Toselli, F. & Bodechtel, J. (Hrsg.), *Imaging Spectroscopy: Fundamentals and prospective Applications* (S. 145-165). London: Kluwer Academic Publisher.

- Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J., & Strachan, I.B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90, 337-352.
- Hapke, B., & Wells, E. (1981). Bidirectional Reflectance Spectroscopy 2. Experiments and Observations. *Journal of Geophysical Research*, 86, 3055 - 3060.
- Haubrock, S., Chabrillat, S., Lemnitz, C., & Kaufmann, H. (2008). Surface soil moisture quantification models from reflectance data under field conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 3-29.
- Heiden, U., Segl, K., Roessner, S., & Kaufmann, H. (2007). Determination of robust spectral features for identification of urban surface materials in hyperspectral remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 111, 537-552.
- Heim, B., Oberhaensli, H., Fietz, S., & Kaufmann, H. (2005). Variation in Lake Baikal's phytoplankton distribution and fluvial input assessed by SeaWiFS satellite data. *Global and Planetary Change*, 46(1), 9-27.
- Helbert, J., Berthelot, B., & Soler, C. (2004). HYEMALIS: Un simulateur d'images de paysages tridimensionnels complexes. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 27-35.
- Hildebrand, G. (1996). *Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie*. Herbert Wichmann Verlag.
- Hoffer, R.M. (1978). Biological and Physical Considerations in Applying Computer-Aided Analysis Techniques to Remote Sensor Data. In Swain, P.H. & Davis, S.M. (Hrsg.), *Remote Sensing: the quantitative approach* (S. 227-289). McGraw Hill, New York:
- Hsu, P.-H. (2007). Feature extraction of hyperspectral images using wavelet and matching pursuit. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 62, 78-92.
- Hughes, G. (1968). On the mean accuracy of statistical pattern recognizers. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 14, 55-63.
- Itzerott, S., & Kaden, K. (2006). Ein neuer Alorithmus zur Klassifizierung landwirtschaftlicher Fruchtarten auf Basis spektraler Normkurven. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 6, 509-518.
- Itzerott, S., & Kaden, K. (2008). Die schlagbezogene Schätzung des Düngereinsatzes - ein Beispiel für das Flächennutzungsmonitoring mit Fernerkundungsdaten. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 2, 93-107.
- Jacquemoud, S., & Baret, F. (1990). PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34, 75-91.
- Kaewpijit, S., Le Moigne, J., & El Ghazawi, T. (2003). Automatic reduction of hyperspectral imagery using wavelet spectral analysis. *IEEE Transections on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 863-871.

- Kanemasu, E. (1974). Seasonal canopy reflectance patterns of wheat, sorghum, and soybean. *Remote Sensing of Environment*, 3, 43-47.
- Kokaly, R.F., Asner, G.P., Ollinger, S.V., Martin, M.E., & Wessman, C.A. (2009). Characterizing canopy biochemistry from imaging spectroscopy and its application to ecosystem studies. *Remote Sensing of Environment*, 113, S78-S91.
- Köller, K., & Müller, J. (1998). Moderne Sätechnik für Getreide, Raps und Leguminosen. In, *DLG-Merkblatt 306* (p. 12)
- Kotchenova, S.Y., & Vermote, E.F. (2007). Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part II. Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces. *Appl. Opt.*, 46, 4455-4464.
- Kotchenova, S.Y., Vermote, E.F., Matarrese, R., & Klemm, J.F.J. (2006). Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path radiance. *Appl. Opt.*, 45, 6762-6774.
- Kuester, T. (2011). Modellierung von Getreidebestandsspektren zur Korrektur BRDF-bedingter Einflüsse auf Vegetationsindizes im Rahmen der EnMAP-Mission. Dissertation. Humboldt Universität Berlin.
- Kuester, T., Spengler, D., Barczy, J.-F., Segl, K., Hostert, P., & Kaufmann, H. (2013). Simulation of multitemporal and hyperspectral vegetation canopy bidirectional reflectance using detailed virtual 3D canopy models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, [akzeptiert].
- Kumar, L., Schmidt, K., Dury, S., & Skidmore, A. (2001). Imaging Spectroscopy and Vegetation Science. In Van der Meer, F. & De Jong, S. (Hrsg.), *Imaging Spectroscopy: Basic Principles and Prospective Applications*. Kluwer Academic Publishers.
- Kuo, B.-C., & Landgrebe, D. (2001). *Improved Statistical Estimation and Feature Extraction For Hyperspectral Data Classification*. West Lafayette, Indiana, USA.: School of Electrical & Computer Engineering, Purdue University.
- Kuusik, A. (1991). Determination of vegetation canopy parameters from optical measurements. *Remote Sensing of Environment*, 37, 207-218.
- Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (2004). Atlas zur Geologie von Brandenburg [online]. verfügbar unter: [aufgerufen 10.04.2013].
- Landis, J.R., & Koch, G.G. (1970). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33, 159-174.
- Laubwerk (2013). Laubwerk Plants [online]. verfügbar unter: <http://www.laubwerk.com/products/laubwerk-plants/> [aufgerufen 15.04.2013].
- Lee, C., & Landgrebe, D. (1993). *Feature Extraction and Classification Algorithms for High dimensional Data*, ECE Technical Reports, Paper 212.
- Lewis, P. (1996). A Botanical Plant Modelling System (BPMS) for remote sensing simulation studies. Dissertation. University College London.

- Lewis, P. (1999). Three-dimensional plant modelling for remote sensing simulation studies using the Botanical Plant Modelling System. *Agronomic*, 19, 185-210.
- Lewis, P., & Disney, M. (2007). Spectral invariants and scattering across multiple scales from within-leaf to canopy. *Remote Sensing of Environment*, 109, 196-206.
- Lewis, P., & Disney, M.I. The Botanical Plant Modelling System (BPMS): A Case Study of Multiple Scattering in a Barley Canopy. *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS '98. 1998 IEEE International*, 1998. Seattle, WA, USA, 3 (S. 1481-1483).
- Lewis, P., & Muller, J.-P. The Advanced Radiometric Ray Tracer: ARARAT for Plant Canopy Reflectance Simulation. *ISPRS*, 1992. Washington D.C.
- Lewis, P., Saich, P., Disney, M., Andrieu, B., Fournier, C., & Ljutovac, S. Modelling the radiometric response of a dynamic, 3D structural model of wheat in the optical and microwave domains. *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '03. Proceedings*, 2003. 6 (S. 3543-3545).
- LI-COR Inc. (2012). *LAI-2200 Plant Canopy Analyser. Instruction Manual*. Lincoln, USA.
- Li, X., & Yeh, A.G.-O. (2004). Analyzing spatial restructuring of land use patterns in a fast growing region using remote sensing and GIS *Landscape and Urban Planning*, 69, 335-354.
- Li, X.W., & Strahler, A. (1986). Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a coniferous forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Li and Strahler, 1986* 24, 906-919.
- Li, X.W., Strahler, A., & Woodcock, C. (1995). A hybrid geometric optical-radiative transfer approach for modeling albedo and directional reflectance of discontinuous canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 466-480.
- Liang, S., & Fang, H. (2004). An improved atmospheric correction algorithm for hyperspectral remotely sensed imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1, 112-117.
- Lindgren, D.T. (1985). *Land Use Planning and Remote Sensing*. Dordrecht: Nijhoff.
- Lucht, W., Schaaf, C.B., & Strahler, A.H. (2000). An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, 38, 977-998.
- Lüttge, U., Kluge, M., & Bauer, G. (2002). *Botanik*. Wiley-VCH.
- Maier, S.W., Lüdeker, W., & Günther, K.P. (1999). SLOP: A Revised Version of the Stochastic Model for Leaf Optical Properties. *Remote Sensing of Environment*, 68, 273-280.
- Martínez-Casasnovas, J.A., Martín-Montero, A., & Auxiliadora Casterad, M. (2005). Mapping multi-year cropping patterns in small irrigation districts from time-series analysis of Landsat TM images. *European Journal of Agronomy*, 23, 159-169.

- Meier, U. (2001). Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen. *Biologische Bundesanstalt für Land und Forstwirtschaft*, 165.
- Merzlyak, M.N., Gitelson, A.A., Chivkunova, O.B., Solovchenko, A.E., & Pogosyan, S.I. (2003). Application of Reflectance Spectroscopy for Analysis of Higher Plant Pigments. *Russian Journal of Plant Physiology*, 50, 704-710.
- Migdall, S., Bach, H., Bobert, J., Wehrhan, M., & Mauser, W. (2009). Inversion of a canopy reflectance model using hyperspectral imagery for monitoring wheat growth and estimating yield *Precision Agriculture*, 10, 508-524.
- Mouroulis, P., Green, R.O., & Chrien, T.G. (2000). Design of pushbroom imaging spectrometers for optimum recovery of spectroscopic and spatial information. *Applied Optics*, 39, 2210-2220.
- Myneni, R.B., Asrar, G., & Gerstl, A. (1990). Radiative transfer in three dimensional leaf canopies. *Remote Sensing of Environment*, 16.
- Myneni, R.B., Ross, J., & Asrar, G. (1989). A review on the theory of photon transport in leaf canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 45, 1-153.
- Neumann, C., Weiß, G., Itzerott, S., Kühling, M., Fürstenow, J., Luft, L., & Nitschke, P. (2013). *Entwicklung und Erprobung eines innovativen, naturschutzfachlichen Monitoringverfahrens auf der Basis von Fernerkundungsdaten am Beispiel der Döberitzer Heide, Brandenburg : Abschlussbericht.*, Scientific Technical Report. Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, [238].
- Ni, W., Li, X., Woodcock, C., Caetano, M., & Strahler, A. (1999). An analytical hybrid gort model for bidirectional reflectance overdiscontinuous plant canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37, 987-999.
- Norsk Elektro Optikk (2012). Website of norsk elektro optikk for hyspex sensors [online]. verfügbar unter: <http://www.hyspex.no> [aufgerufen 17.12.2012].
- North, P.R.J. (1996). Three-dimensional forest light interaction model using a Monte Carlo method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34, 946-956.
- Oenema, O., Boers, P.C.M., van Eerdt, M.M., Fraters, B., van der Meer, H.G., Roest, C.W.J., Schröder, J.J., & Willems, W.J. (1998). Leaching of nitrate from agriculture to groundwater: the effect of policies and measures in the Netherlands. *Environmental Pollution*, 102, 471-478.
- Pischel, P. (2013). Komplexitätsanalyse von 3D Pflanzenmodellen für die Simulation des Reflexionsverhaltens von Vegetationsbeständen für fernerkundliche Anwendungen. Diplomarbeit. Universität Potsdam, (voraussichtliche Abgabe 06/2013).
- Prusinkiewicz, P., & Lindenmayer, A. (2004). *The Alogirthmic Beauty of Plants*. New York: Springer-Verlag.
- Qin, W., & Gerstl, S.A.W. (2000). 3-D Scene Modeling of Semidesert Vegetation Cover and its Radiation Regime. *Remote Sensing of Environment*, 74, 145-162.

- RAMI (2009). RAdiation transfer Model Intercomparism (RAMI) [online]. verfügbar unter: <http://rami-benchmark.jrc.ec.europa.eu/HTML/Home.php> [aufgerufen 1. Ocober 2009].
- Rao, N.R., Garg, P.K., Ghosh, S.K., & Dadhwal, V.K. (2008). Estimation of leaf total chlorophyll and nitrogen concentrations using hyperspectral satellite imagery. *Journal of Agricultural Science*, 146, 65-75.
- Raudys, S., & Pikelis, V. (1980). On Dimensionality, Sample Size, Classification Error, and Complexity of Classification Algorithm in Pattern Recognition. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, PAMI-2*, 242-252.
- Raven, P., Evert, R., & Eichhorn, S. (2000). *Biologie der Pflanzen*. Walter de Gruyter.
- Rees, W. (2001). *Physical principles of remote sensing (2nd Edition)*. Cambridge: Cambride University Press.
- Richards, J.A., & Jia, X. (2005). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Berlin; New York: Springer-Verlag.
- Richter, N., Jarmer, T., Chabrillat, S., Kaufmann, H., & Hostert, P. (2009). Free iron oxide determination in Mediterranean soils using diffuse reflective spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, 73, 72-81.
- Richter, R., & Schläpfer, D. (2002). Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part2: Atmospheric/topographic correction. *Internation Journal of Remote Sensing*, 23, 2631-2649.
- Richter, T., & Fukshansky, L. (1996). Optics of a Bifacial Leaf: 1. A Novel Combined Procedure for Deriving the Optical Parameters. *Photochemistry and Photobiology*, 63, 507-516.
- Roberts, G. (2001). A review of the application of BRDF models to infer land cover parameters at regional and global scales. *Progress in Physical Geography*, 25, 483 - 511.
- Rodger, A., & Lynch, M.J. Determining atmospheric column water vapour in the 0.4-2.5 μm spectral region. *Summaries of the 11th Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, AVIRIS Workshop*, 2001. Pasadena, CA, USA: Jet Propulsion Laboratory.
- Roessner, S., Segl, K., Heiden, U., & Kaufmann, H. (2001). Automated differentiation of urban surfaces based on airborne hyperspectral imagery. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 39, 1525-1532.
- Rogaß, C., Spengler, D., Bochow, M., Segl, K., Lausch, A., Doktor, D., Roessner, S., Behling, R., Wetzell, H.-U., & Kaufmann, H. (2011). Reduction of Radiometric Miscalibration - Applications to Pushbroom Sensors. *Sensors*, 11, 6370-6395.

- Röhricht, W., & Clasen, M. multum, non multi - Hierarchische BitTrees bei der Pflanzenverteilung mit oik. In Wittmann, J. & Thinh, N.X. (Hrsg.), *Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften*, 2005. Dresden: Shaker Verlag, Aachen (S. 285-293).
- Ross, J. (1981). *The radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Den Haag-Boston-London: Dr. W.Junk Publishers.
- Ross, J.K., & Marshak, A.L. (1988). Calculation of canopy bidirectional reflectance using the Monte Carlo method. *Remote Sensing of Environment*, 24, 213-225.
- Rothmaler, W. (1999). *Exkursionsflora von Deutschland: Bd. 2 - Gefäßpflanzen. Grundband*. Heidelberg/Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Saich, P., Lewis, P., & Disney, M.I. (2003). Biophysical parameter retrieval from forest and crop canopies in the optical and microwave domains using 3D models of canopy structure. *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '03. Proceedings*, 2003. 6 (S. 3546-3548).
- Sandmeier, S., Müller, C., Hosgood, B., & Andreoli, G. (1998). Physical Mechanisms in Hyperspectral BRDF Data of Grass and Watercress. *Remote Sensing of Environment*, 66, 222-233.
- Schläpfer, D., Borel, C.C., Keller, J., & Itten, K.I. (1998). Atmospheric Precorrected Differential Absorption Technique to Retrieve Columnar Water Vapor. *Remote Sensing of Environment*, 65, 353-366.
- Schowengerdt (2006). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing (3rd Edition)*. London: Elsevier Inc.
- Segl, K., Bochow, M., Roessner, S., Kaufmann, H., & Heiden, U. Feature-based identification of urban endmember spectra using hyperspectral HyMap data. In Hostert, P., van der Linden, S. & Damm, A. (Hrsg.), *Proc. of the 1st Workshop of the EARSeL Special Interest Group of Urban Remote Sensing*, 2006. Berlin.
- Segl, K., Roessner, S., Heiden, U., & Kaufmann, H. (2003). Fusion of spectral and shape features for identification of urban surface cover types using reflective and thermal hyperspectral data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58, 99-112.
- Sims, D.A., & Gamon, J.A. (2003). Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sensing of Environment*, 84, 526-537.
- Soler, C., Sillion, F.X., Blaise, F., & Dereffye, P. (2003). An efficient instantiation algorithm for simulating radiant energy transfer in plant models. *ACM Trans. Graph.*, 22, 204-233.
- Spectral Imaging Ltd. (2010). AISA DUAL [online]. verfügbar unter: http://www.specim.fi/media/aisa-datasheets/dual_datasheet_ver2-10.pdf [aufgerufen 05-01-11].

- Spengler, D., Frick, A., Davey, C., Kuester, T., & Kaufmann, H. Estimation of surface soil moisture content using imaging spectroscopy - a simulation case study. *7th EARSeL SIG IS Workshop*, 2011. Edinburgh, Schotland.
- Spengler, D., Frick, A., & Kolbe, M. (2013). *MoLaWa - Entwicklung eines Verfahrens zum Monitoring des Landschaftswasserhaushaltes auf Basis von Fernerkundungsdaten. Abschlussbericht des ZIM-Forschungsvorhaben (Förderkennzeichen: KF 2340702SA9)*. Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, LUP - LUFTBILD UMWELT PLANUNG GmbH.
- Staenz, K., Secker, J., Gao, B.-C., Davis, C., & Nadeau, C. (2002). Radiative transfer code applied to hyperspectral data for the retrieval of surface reflectance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 194-203.
- Steven, M.D., & Clark, J.A. (Hrsg.) (1990). *Application of Remote Sensing in Agriculture*. London: Butterwoth.
- Suits, A.S. (1971). The calculation of the dirctional reflectance of a vegetative canopy. *Remote Sensing of Environment*, 2, 117-125.
- The Free 3D Models (2013). Plants 3D Models [online]. verfügbar unter: <http://thefree3dmodels.com/stuff/plants/> [aufgerufen 19.04.2013].
- Thompson, R.L., & Goel, N.S. (1998). Two models for rapidly calculating bidirectional reflectance of complex vegetation scenes: Photon spread (PS) model and statistical photon spread (SPS) model. *Remote Sensing Reviews*, 16, 157-207.
- Thoonen, G., Spanhove, T., Vanden Borre, J., & Scheunders, P. (2012). Classification of heathland vegetation in a hierarchical contextual framework. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 96-111.
- Tilman, D., Cassman, K., Matson, P.A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agriculturel sustainability and intensive production practice. *Nature*, 418, 671-677.
- Tucker, C.J., & Garratt, M.W. (1977). Leaf optical system modeled as a stochastic process. *Appl. Opt.*, 16, 635-642.
- U.S. Cencus Bureau (2010). Total Miyear Population, Area, Density - World 2050 [online]. verfügbar unter: www.census.gov/ipc/www/idb/informationGateway.php [aufgerufen 06-01-11].
- Verbrugghe, M., & Cierniewski, J. (1995). A geometrical model of plant bidirectional reflectance. *Proceedings of the International Colloquium - Photosynthesis and Remote Sensing* (S. 243-248). Montpellier, France:
- Verhoef, W. (1984). Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16, 125-141.
- Vermote, E.F., Tanre, D., Deuze, J.L., Herman, M., & Morcette, J.J. (1997). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 35, 675-686.

- Warner, T.A., Nellis, M.D., & Foody, G.M. (Hrsg.) (2009). *The SAGE Handbook of Remote Sensing*. London, UK: SAGE Publications Ltd. In English.
- Watson, D.F., & Philip, G.M. (1985). A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geo-Processing, 2*, 315-327.
- Watson, D.J. (1947). Comparative Physiological Studies on the Groth of Field Crops. 1. Variation in Net Assimilation Rate and Leaf area between species and varieties, and within and between Years. *Annals of Botany, 11*, 41-76.
- Wei, F., Yan, Z., Yongchao, T., Weixing, C., Xia, Y., & Yingxue, L. (2008). Monitoring leaf nitrogen accumulation in wheat with hyper-spectral remote sensing. *Acta Ecologica Sinica, 28*, 23-32.
- Weidenbacher, U. (2002). *Beleuchtungsmodelle. Vorlesungsmaterialien - Medieninformatik*. Universität Ulm.
- White, H.P., Miller, J.R., & Chen, J.M. (2001). Four-Scale Linear Model for Anisotropic Reflectance (FLAIR) for plant canopies. I. Model description and partial validation. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 39*, 1072-1083.
- Whitney, A.W. (1971). A Direct Method of Nonparametric Measurement Selection. *Computers, IEEE Transactions on, C-20*, 1100-1103.
- Widlowski, J.-L., Lavergne, T., Pinty, B., Verstraete, M., & Gobron, N. (2006). Rayspread: A Virtual Laboratory for Rapid BRDF Simulations Over 3-D Plant Canopies. In Graziani, F. (Hrsg.), *Computational Methods in Transport* (S. 211-231). Springer Berlin Heidelberg.
- Willstätter, R., & Stoll, A. (1918). *Untersuchungen über die Assimilation der Kohlesäure*. Berlin: Springer-Verlag.
- Xfrog Inc. (2013). XfrogPlants [online]. verfügbar unter: <http://xfrog.com/category/xfrogplants.html> [aufgerufen 13.04.2013].
- Yang, C. (2009). Airborne Hyperspectral Imagery for Mapping Crop Yield Variability. *Geography Compass, 3*, 1717-1731.
- Young, T.J., & Fu, K.S. (1986). *Handbook of Pattern Recognitions and Image Processing*. Academic Press. New York.
- Zhang, Y., Yu, Q., Liu, C., Jiang, J., & Zhang, X. (2004). Estimation of Winter Wheat Evapotranspiration under Water Stress with Two Semiempirical Approaches. *Agronomy Journal, 96*, 159-168.
- Zhumar, A.Y. (1994). Influence of processes of radiation scattering and absorption by plant leaves on the formation of vegetation reflection spectra in the range from 0.68 to 0.75 μm . *Journal of Applied Spectroscopy, 60*, 412-415.

Anhang A **Phänologieabbildung**

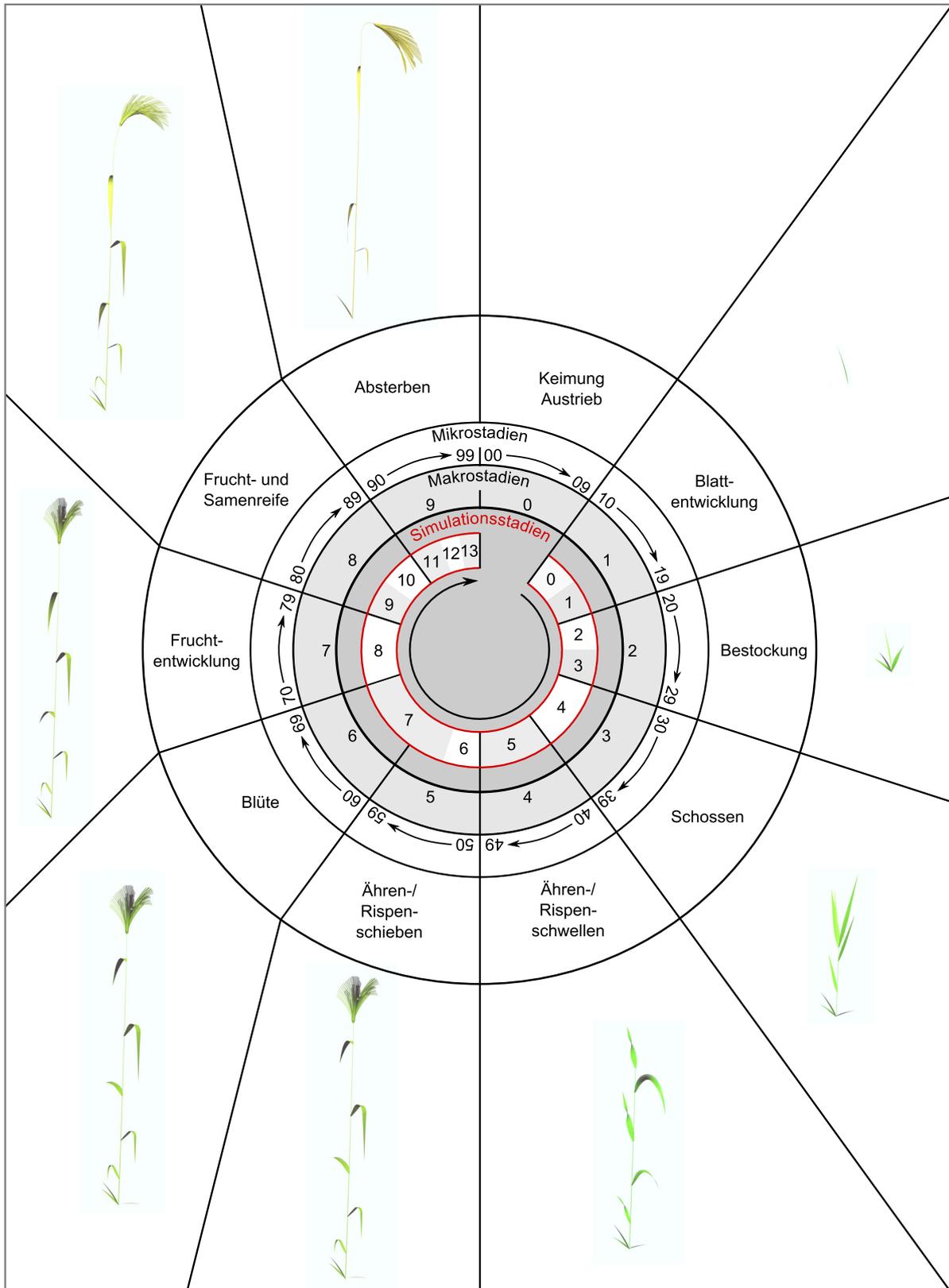


Abb. A-1: Einteilung des Entwicklungszyklus von Getreidepflanzen in Makro- und Mikro-stadien nach BBCH Skala (verändert nach Meier 2001) und der entsprechenden Simulationsstadien.

Anhang B Datengrundlage

Tab. B-1: Übersicht der Datengrundlagen und Aufnahmeparameter der hyperspektralen Flugzeugscannerdaten

<i>Datensätze</i>	<i>UG Wittbrietzen/ Groß Kreuz 2007</i>		<i>UG Fichtwald 2011</i>		<i>UG Demmin 2005</i>	<i>UG Demmin 2012</i>
<i>Anbaudaten</i>	Schlaggrenzen Pflanzenart Phänologie Ertragsdaten		Schlaggrenzen Pflanzenart Phänologie		Schlaggrenzen Pflanzenart	Schlaggrenzen Pflanzenart Phä- nologie
Hyperspektraldaten	<i>HyMap</i>		<i>AISA Dual</i>		<i>HyMap</i>	<i>HySpex</i>
<i>Flughöhe</i>	2000 m		1700 m		2000 m	2560 m
<i>Räuml. Auflösung</i>	5 m		2 m		4 m	2 m
<i>Aufnahmedatum</i>	20.06:07		30.04:11	28.06:11	27.05:05	25.05:12
<i>Aufnahmezeit (UTC)</i>	09.15 Uhr	09.45 Uhr	12.35 Uhr	13.45 Uhr	unbekannt	11.00 Uhr
<i>Sonnenazimut</i>	~ 140°	~ 145°	~ 215°	~ 242°	unbekannt	~ 180°

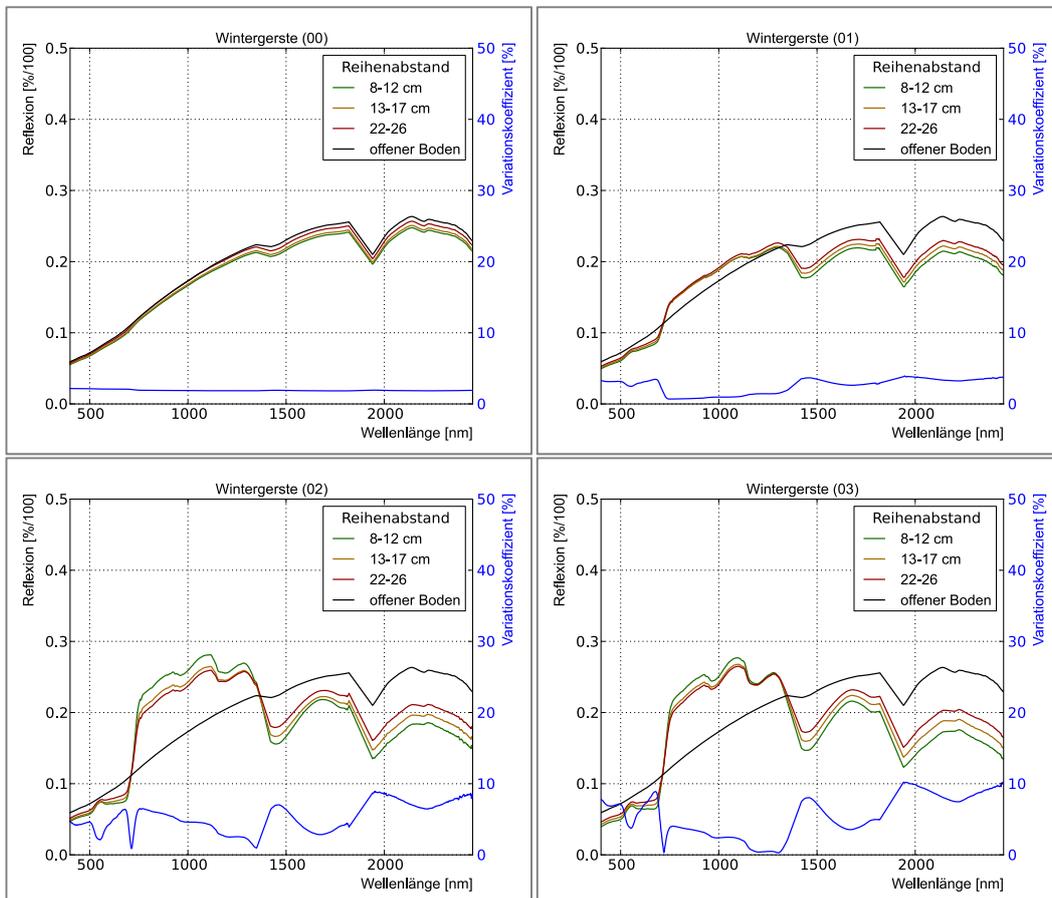
Anhang C **AmapSim Eingabeparameter**

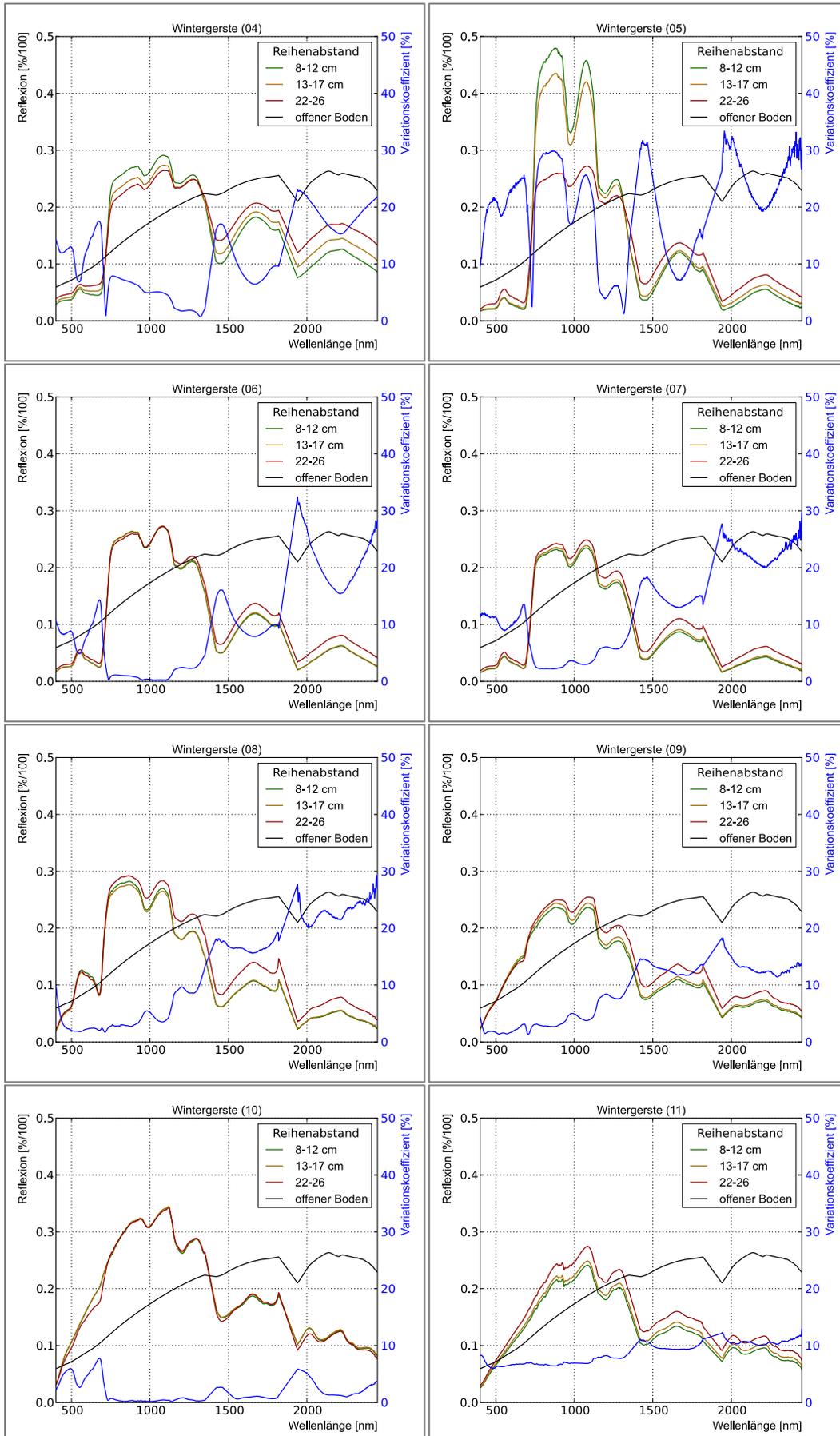
Anhang D **Bedeckungsgradanalyse - Modell vs. Realität**

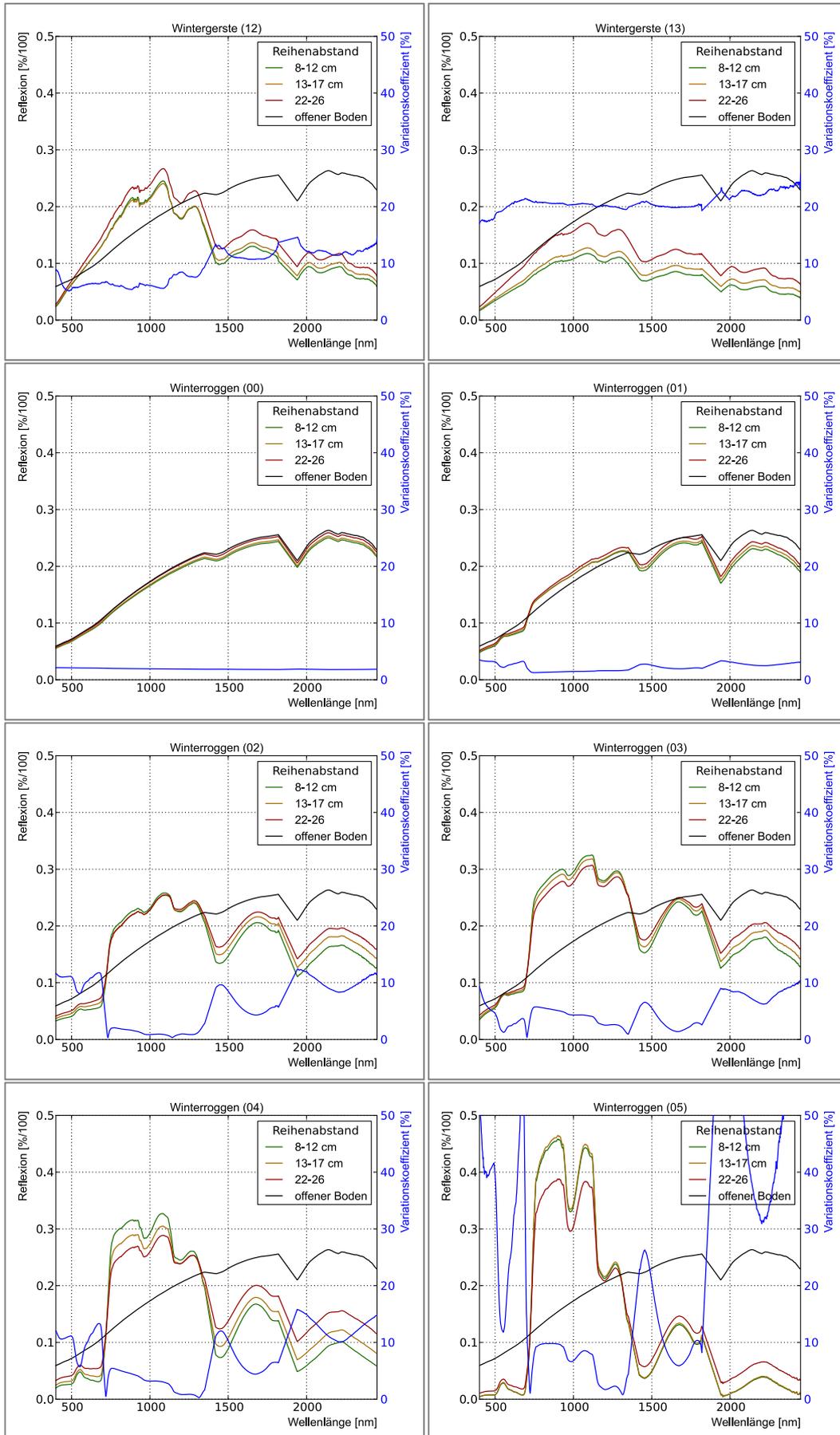
Tab. D-1: Vergleich des Bedeckungsgrades basierend auf Felddfotos und der Auswertung modellierter Daten. Jedes Stadium wurde durch mehrere, zu einem Mittelwert mit Standardabweichung zusammengefasste Datensätze abgedeckt. (Mittelwert \pm Standardabweichung in [%])

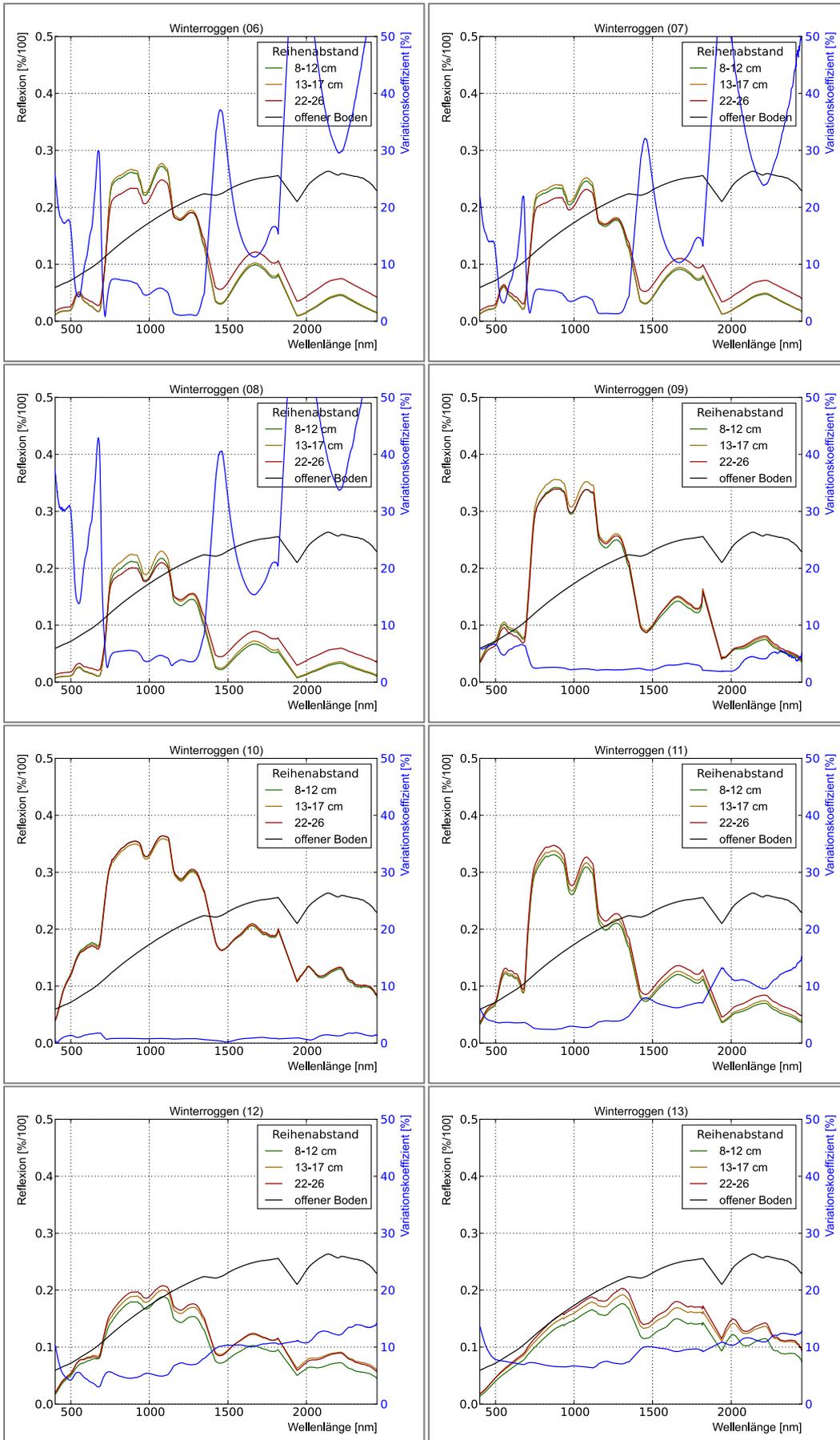
BBCH Stadium	Winterroggen		Wintergerste		Winterweizen	
	Feld [%]	Model [%]	Feld [%]	Model [%]	Feld [%]	Model [%]
<i>10</i>	3,5 \pm 2,0	6,0 \pm 2,5	16,0 \pm 5,0	7,5 \pm 4,5	-	-
<i>20</i>	30,5 \pm 5,0	42,5 \pm 4,0	25,5 \pm 6,5	53,0 \pm 7,0	-	-
<i>25</i>	64,0 \pm 12,5	62,5 \pm 2,0	67,0 \pm 5,0	72,5 \pm 2,0	62,0 \pm 8,5	-
<i>30</i>	79,0 \pm 3,0	77,0 \pm 2,5	80,5 \pm 3,5	77,5 \pm 2,5	67,5 \pm 7,5	77,0 \pm 2,5
<i>40</i>	73,0 \pm 4,5	71,0 \pm 6,5	-	79,0 \pm 2,5	62,1 \pm 12,2	51,0 \pm 7,5
<i>50</i>	73,0 \pm 5,0	70,5 \pm 4,0	-	67,0 \pm 4,0	60,0 \pm 5,5	-
<i>55/60</i>	75,5 \pm 6,0	63,5 \pm 5,0	56,6 \pm 4,5	65,5 \pm 2,5	60,5 \pm 4,5	54,0 \pm 4,5
<i>70</i>	65,0 \pm 7,5	66,0 \pm 5,0	83,5 \pm 7,0	68,0 \pm 2,0	-	-
<i>80-85</i>	73,5 \pm 5,0	68,5 \pm 3,0	78,5 \pm 5,5	64,5 \pm 2,5	63,0 \pm 8,0	54,0 \pm 4,5
<i>87-89</i>	68,5 \pm 3,5	67,0 \pm 6,0	68,5 \pm 13,5	68,0 \pm 7,5	63,5 \pm 4,0	43,0 \pm 2,5
<i>90</i>	-	64,5 \pm 2,5	-	52,0 \pm 2,5	69,5 \pm 6,0	39,5 \pm 2,5
<i>95</i>	-	45,5 \pm 5,0	75,5 \pm 4,5	-	-	-
<i>99</i>	60,0 \pm 2,5	35,5 \pm 3,5	-	-	64,5 \pm 8,0	25,5 \pm 2,0

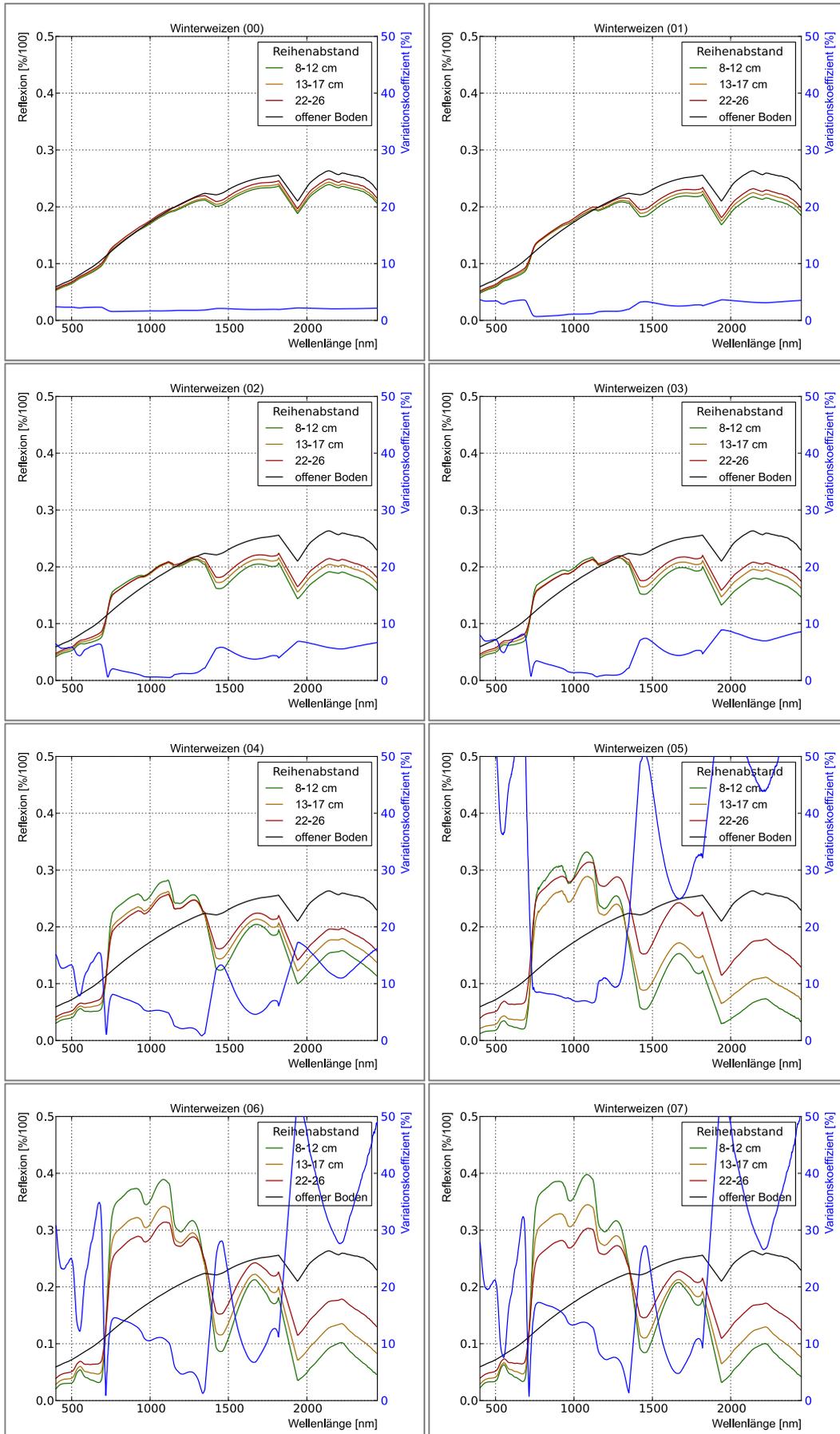
Anhang E Einfluss des Reihenabstands

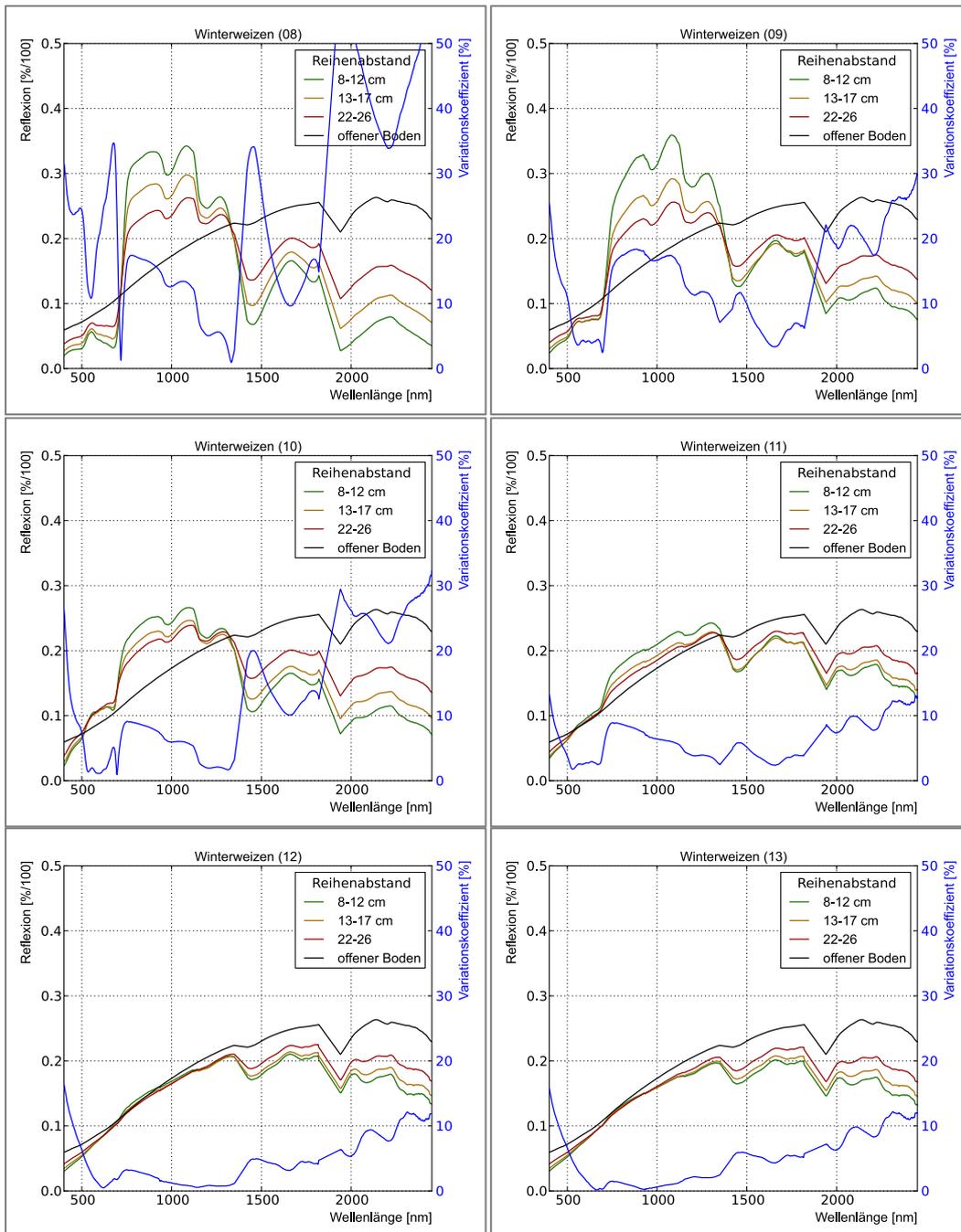




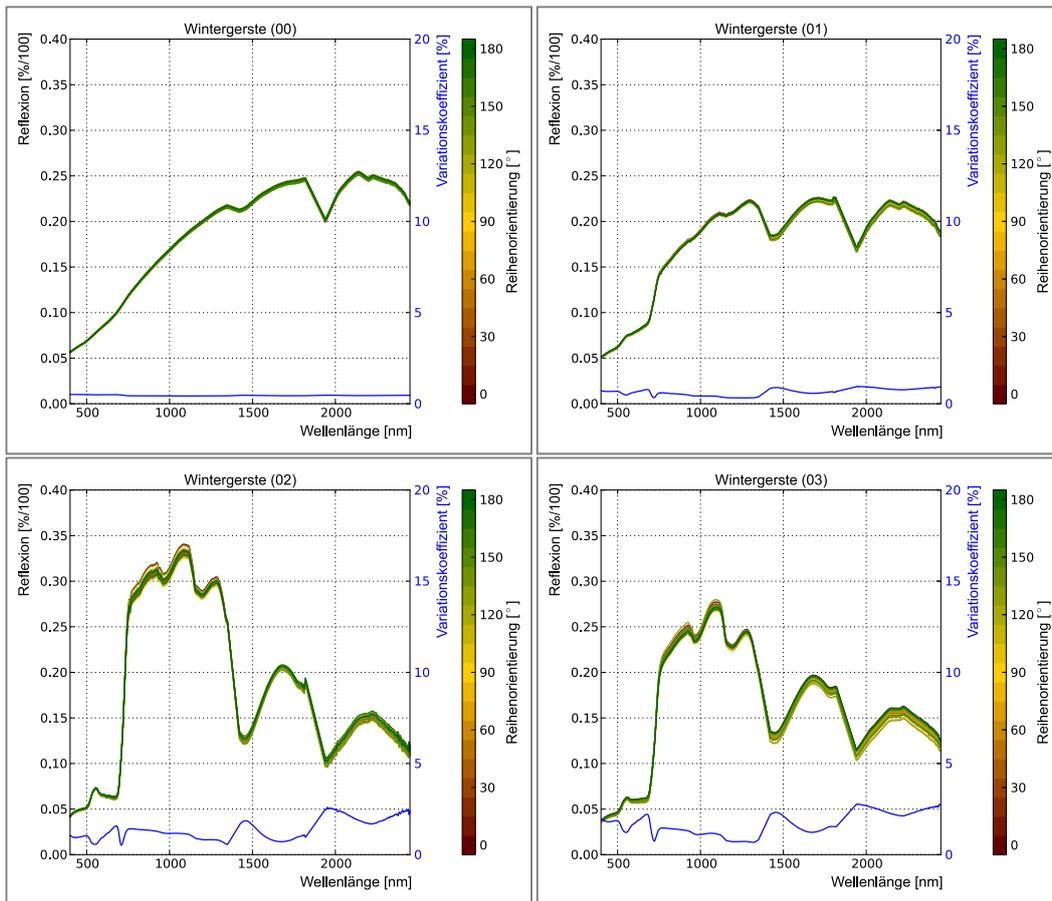


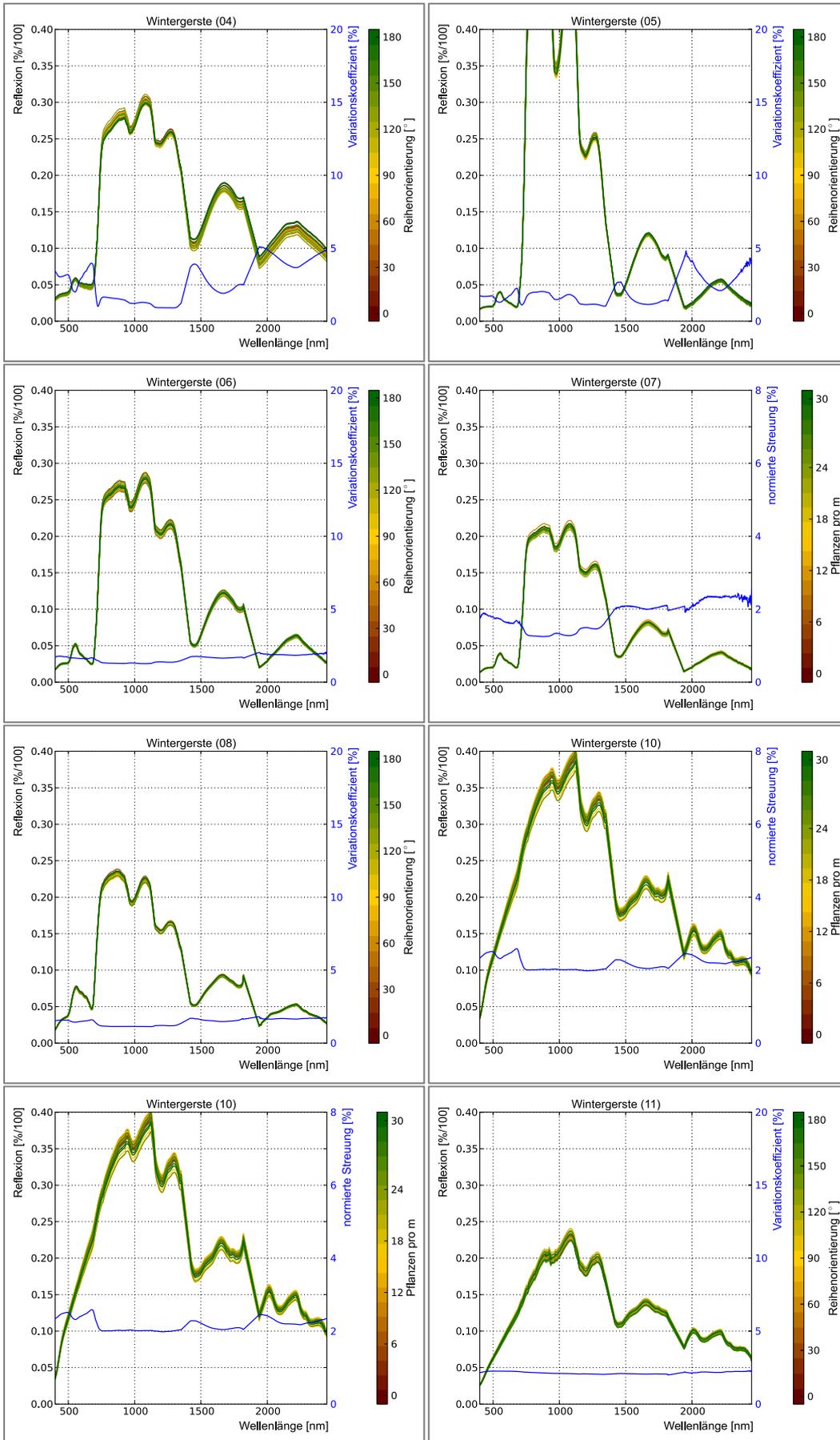


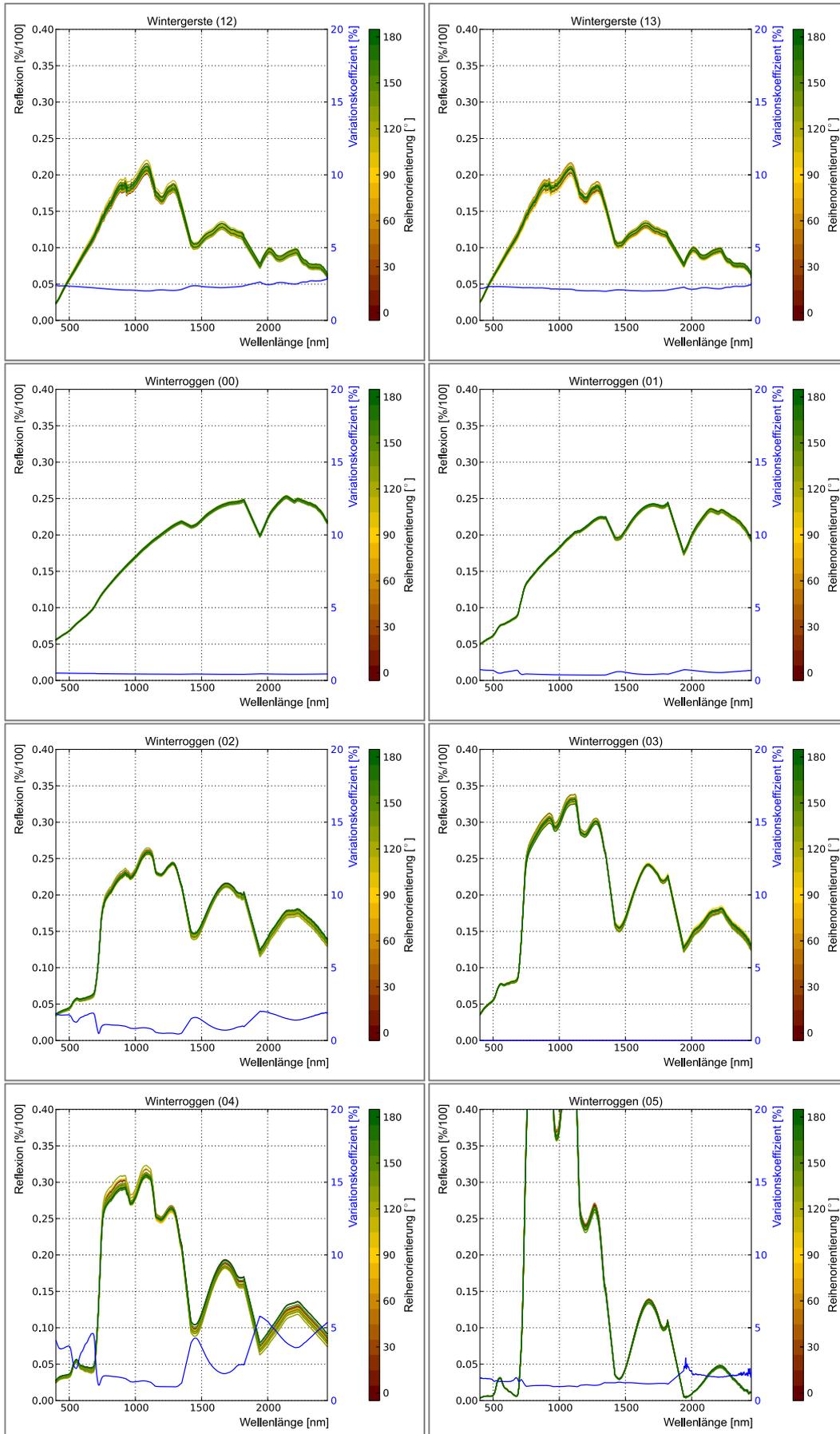


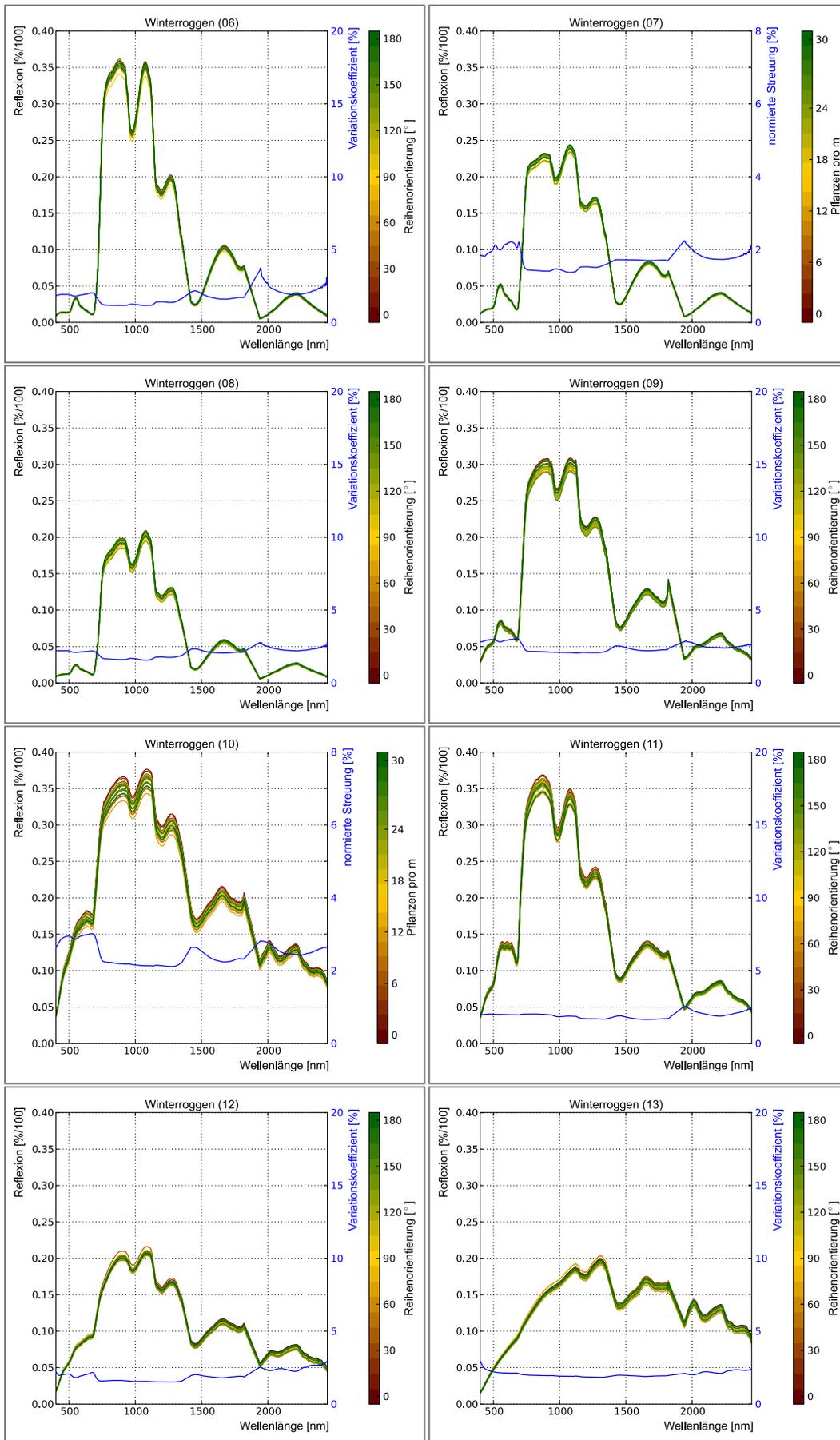


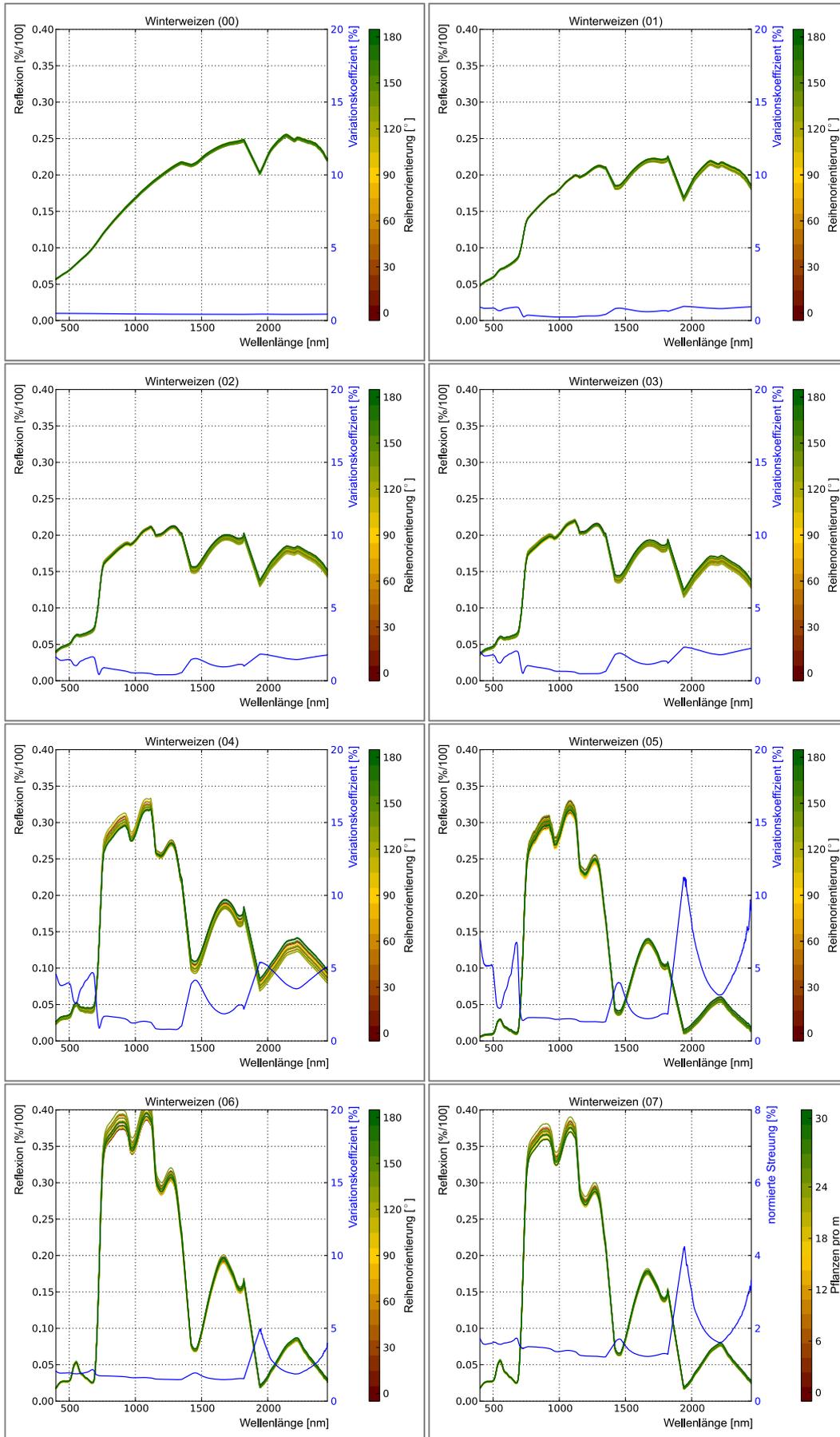
Anhang F Einfluss der Reihenorientierung bei einem Reihenabstand von 13 - 17 cm

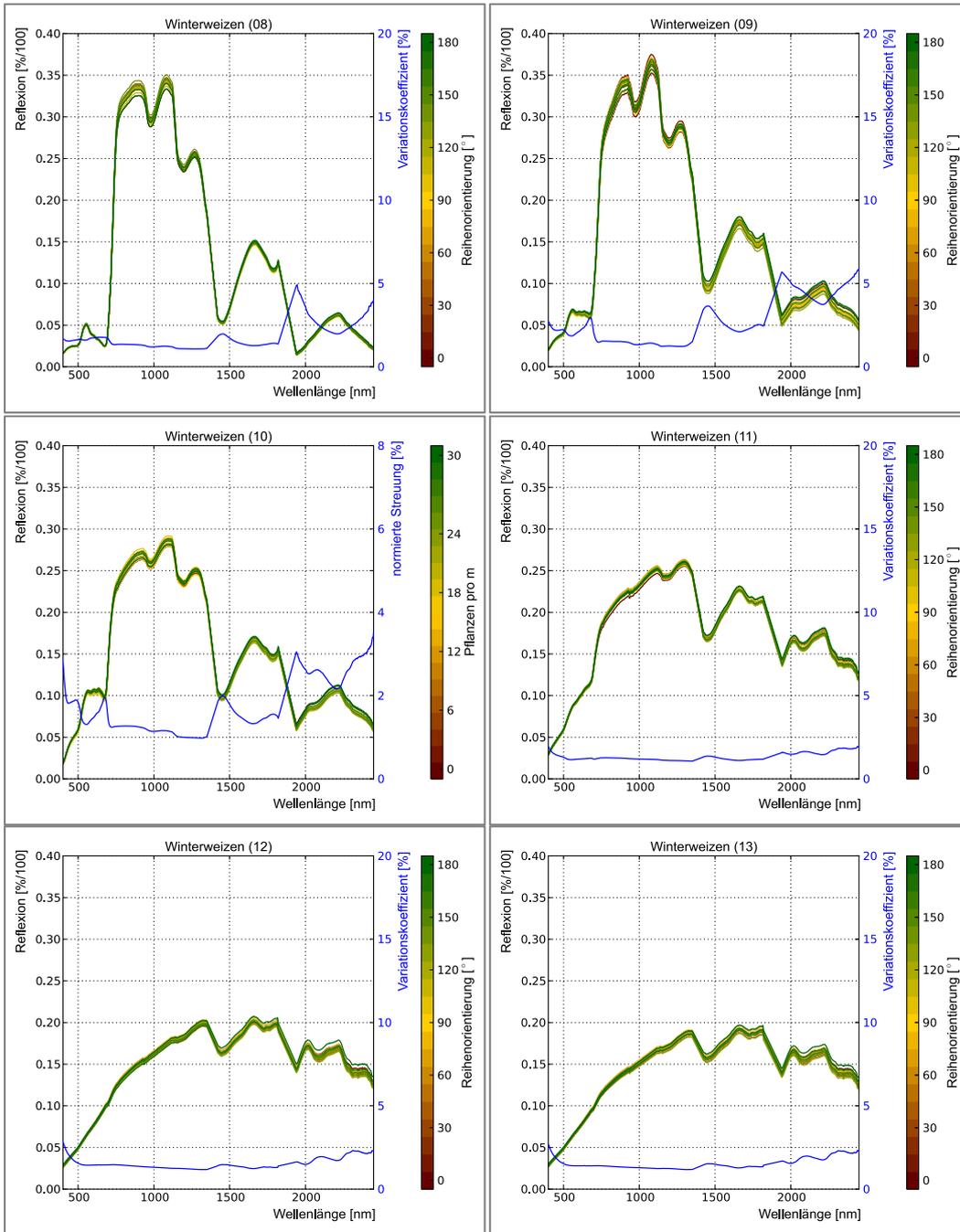




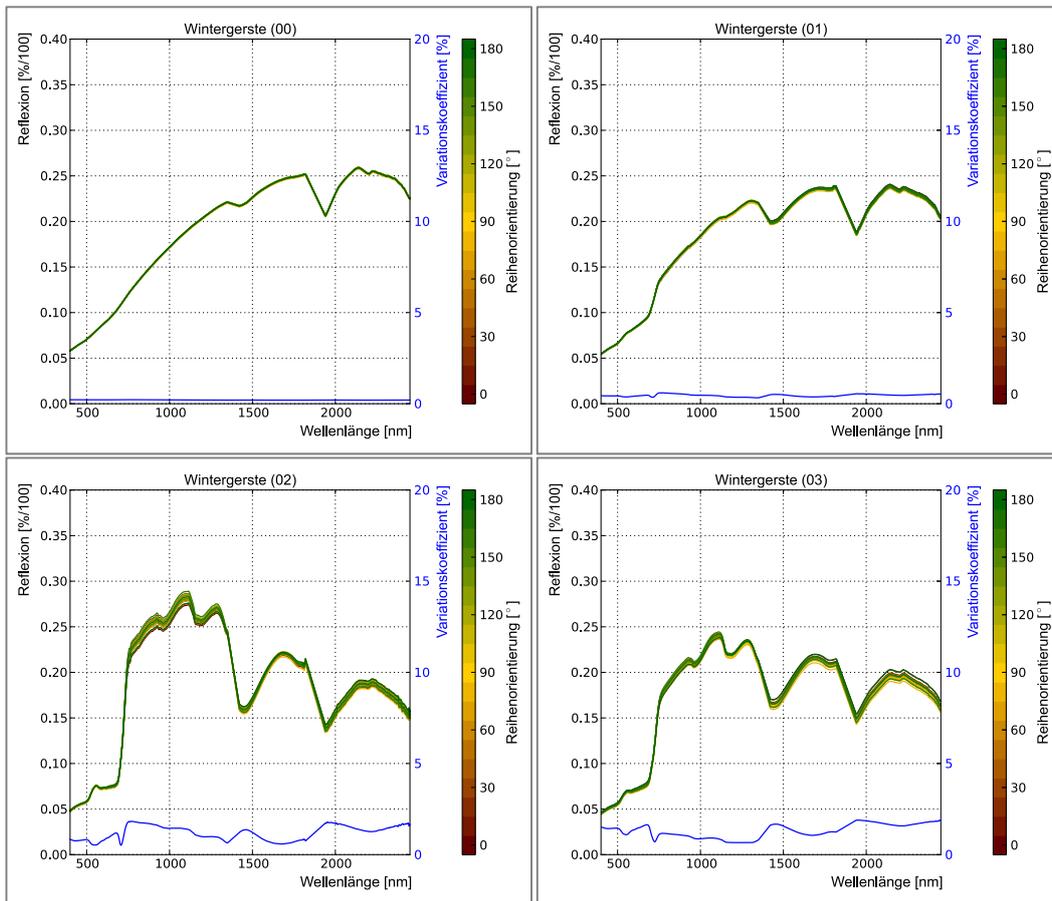


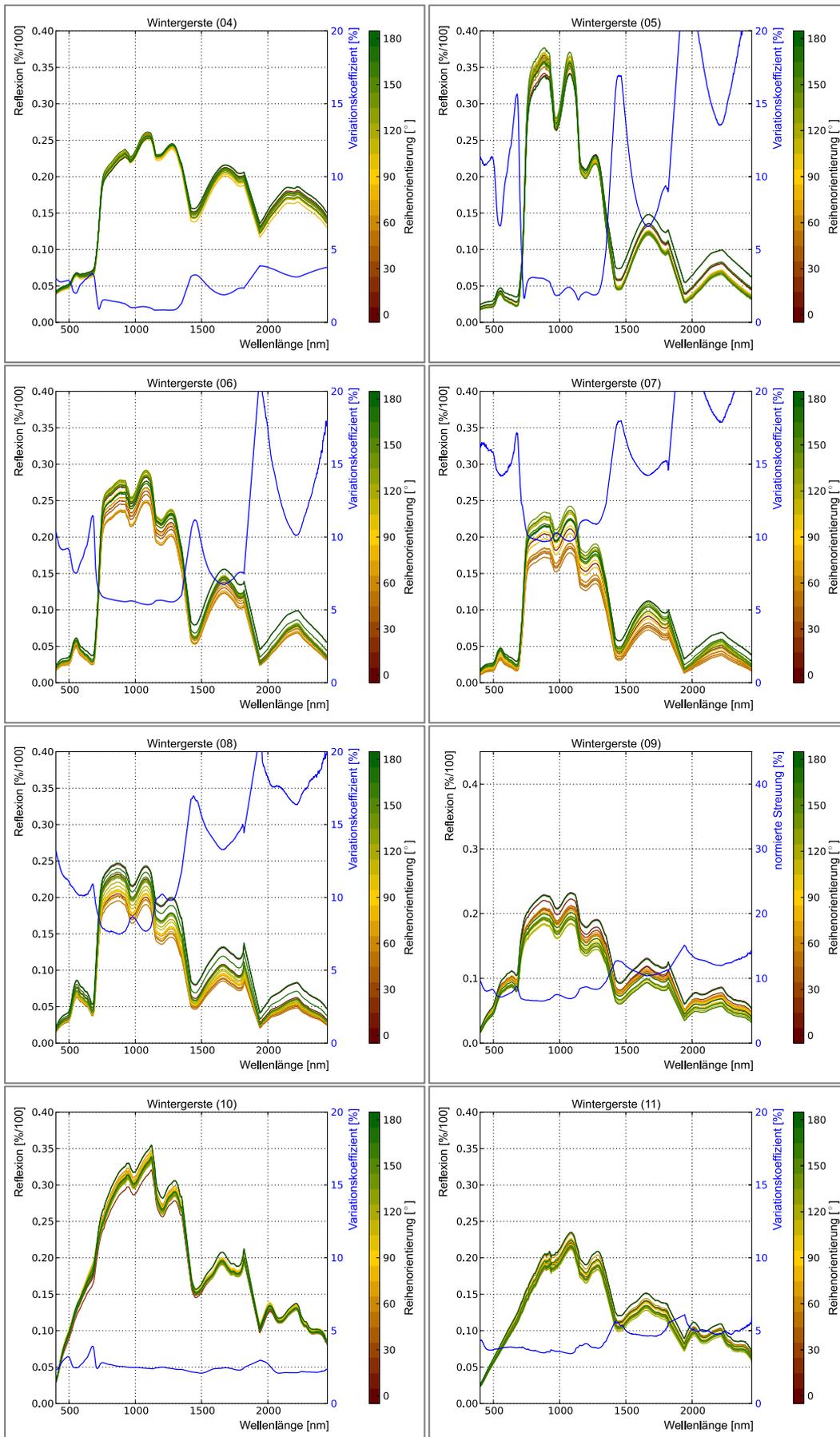


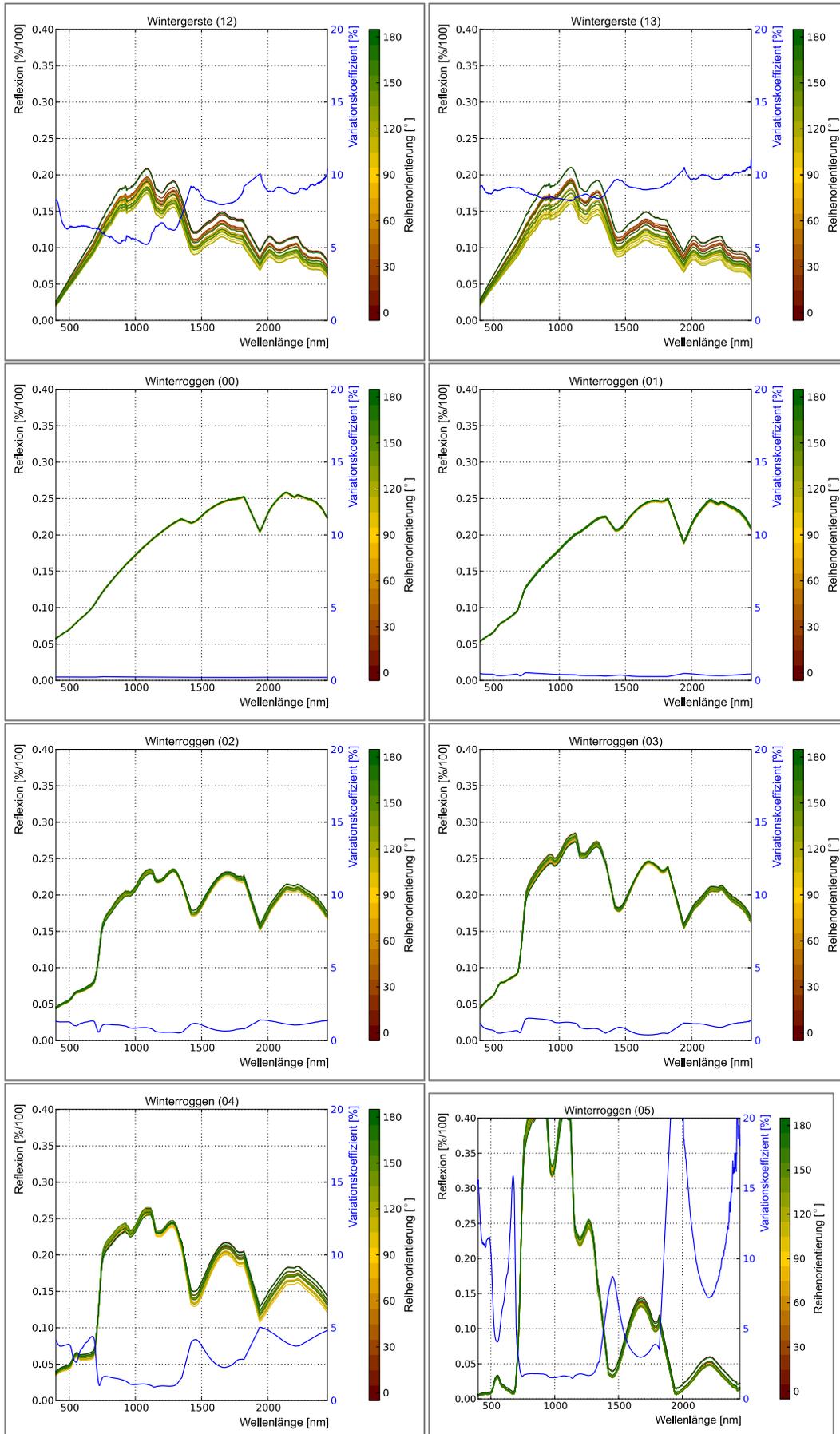


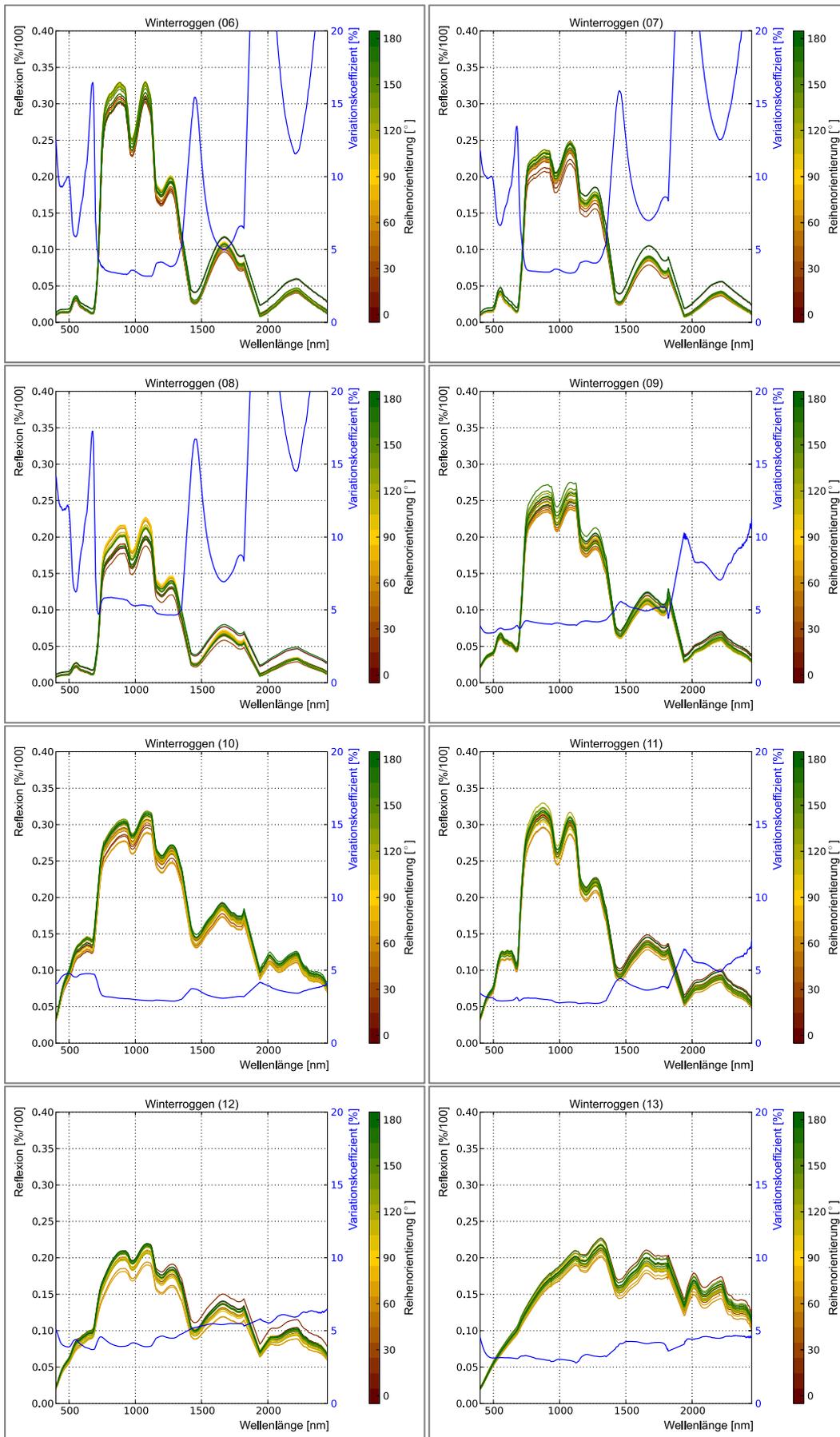


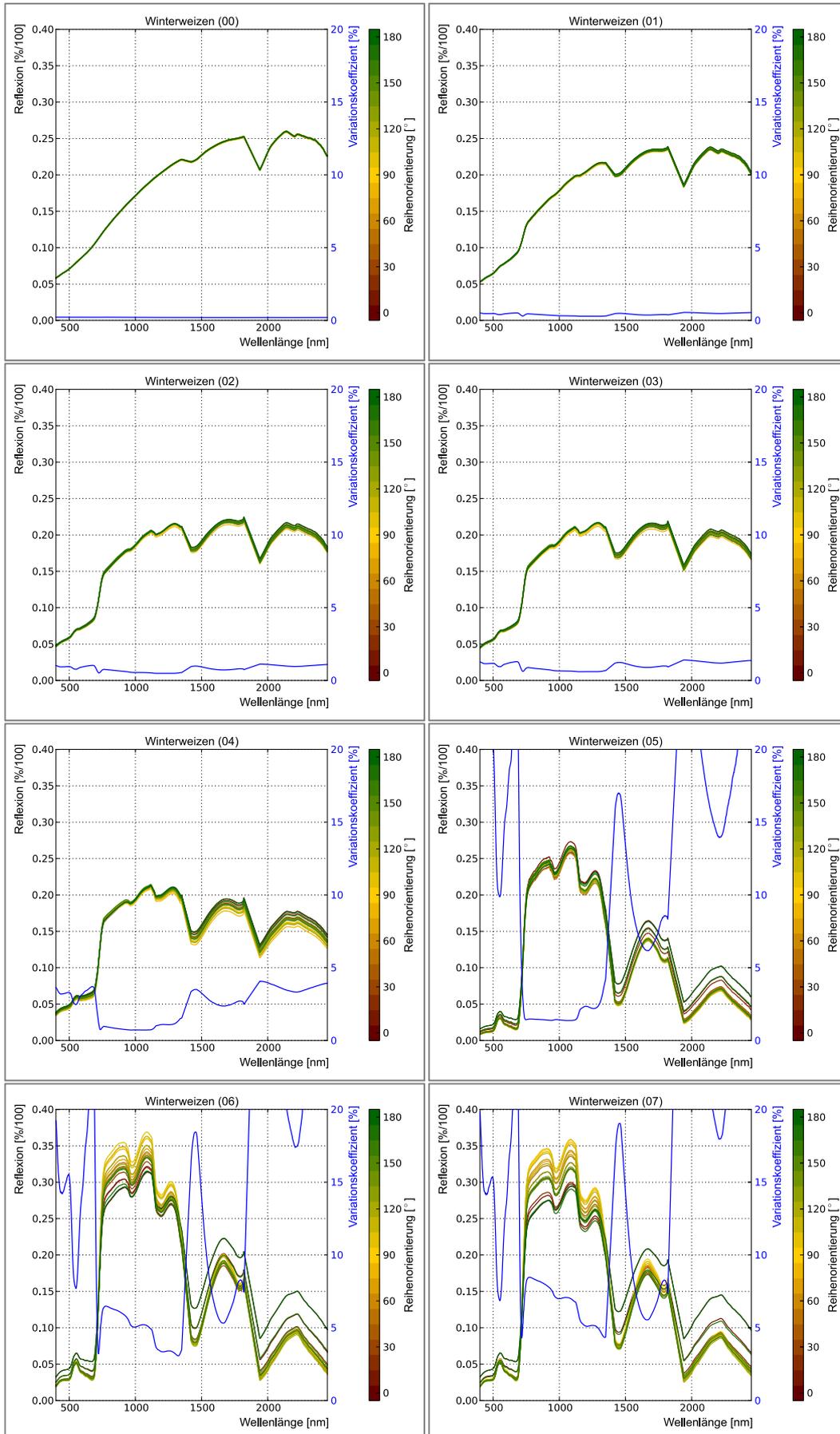
Anhang G Einfluss der Reihenorientierung bei einem Reihenabstand von 22-26 cm

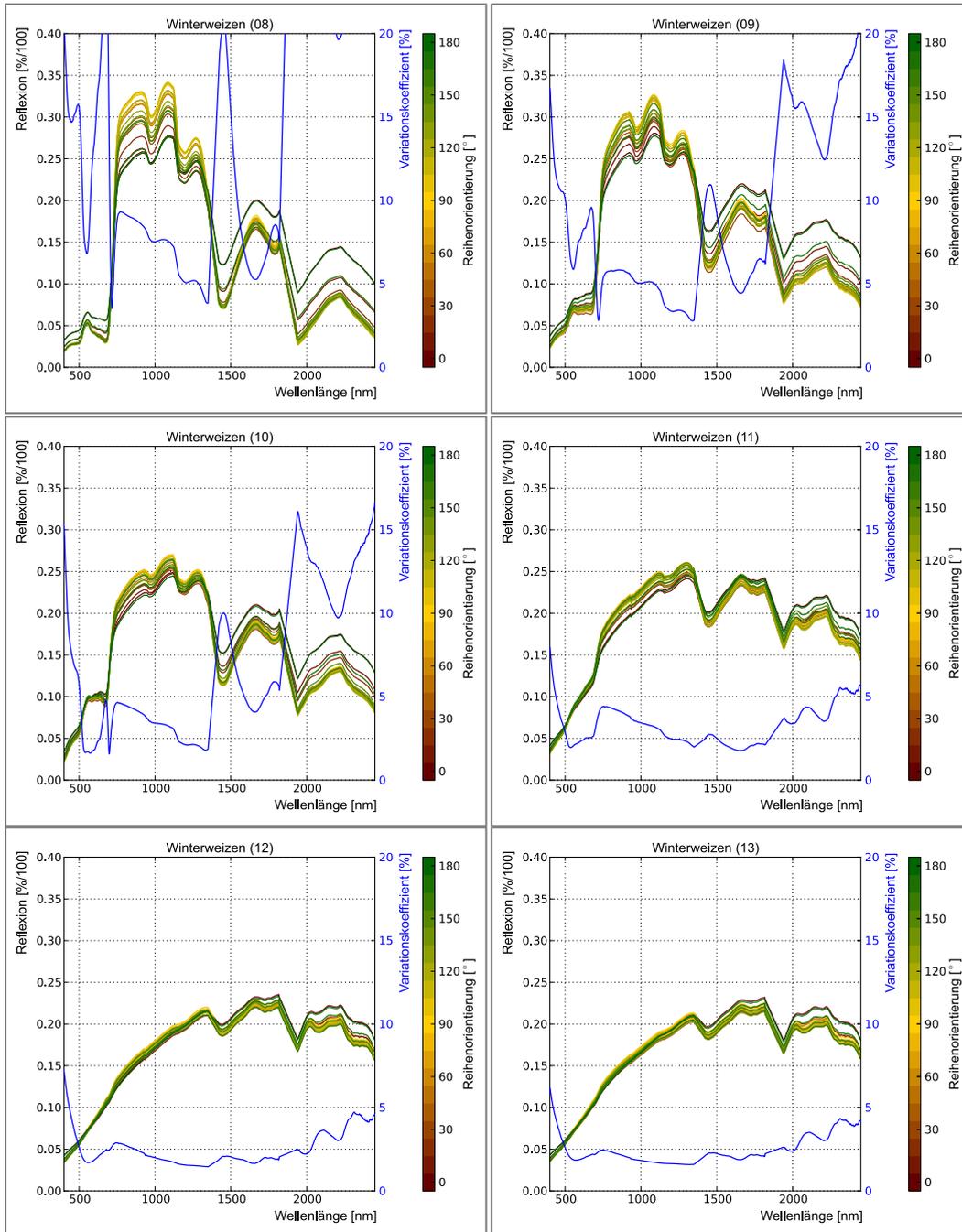




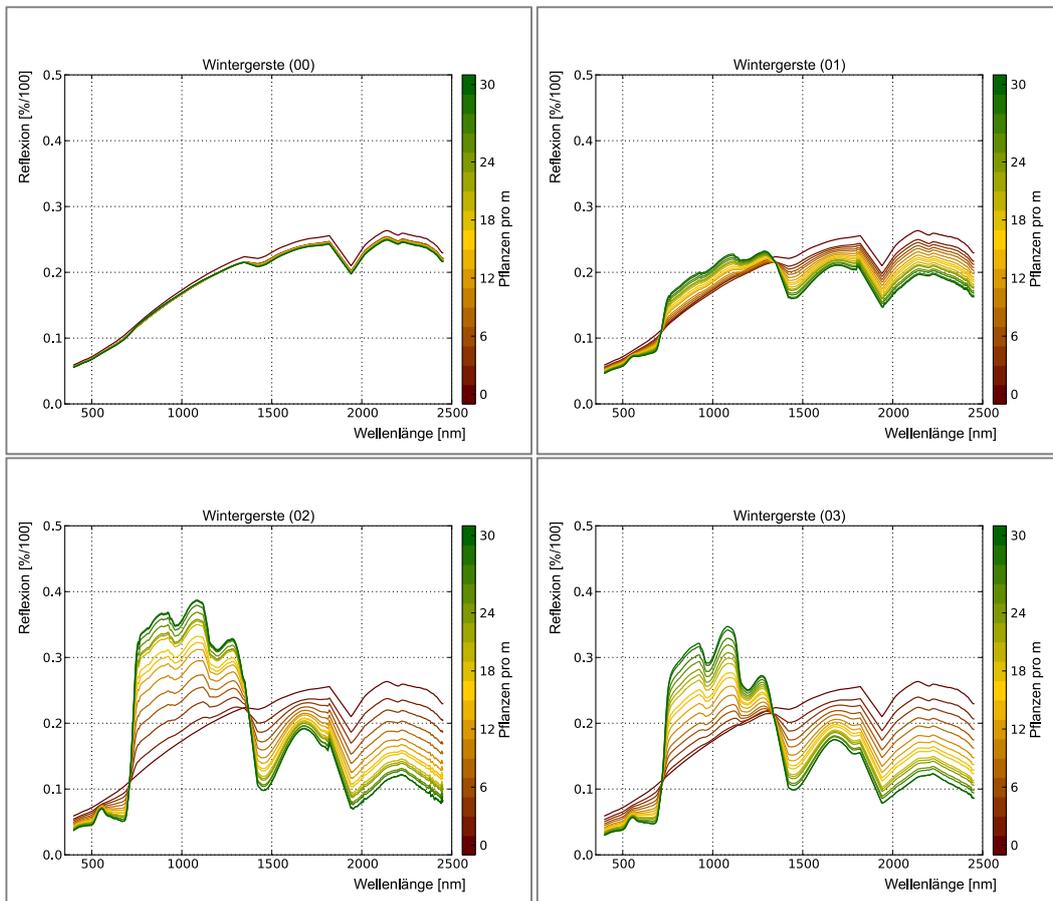


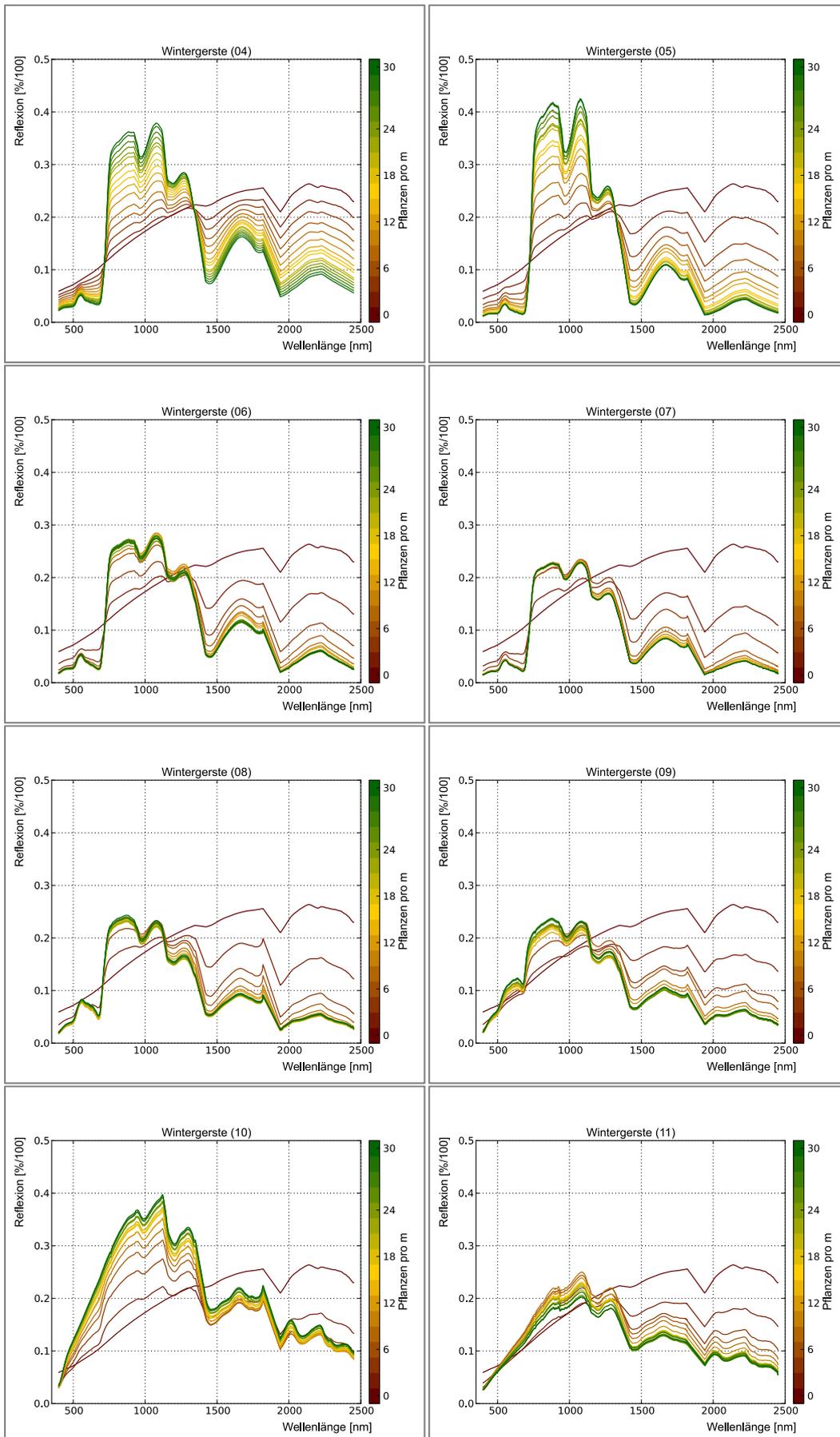


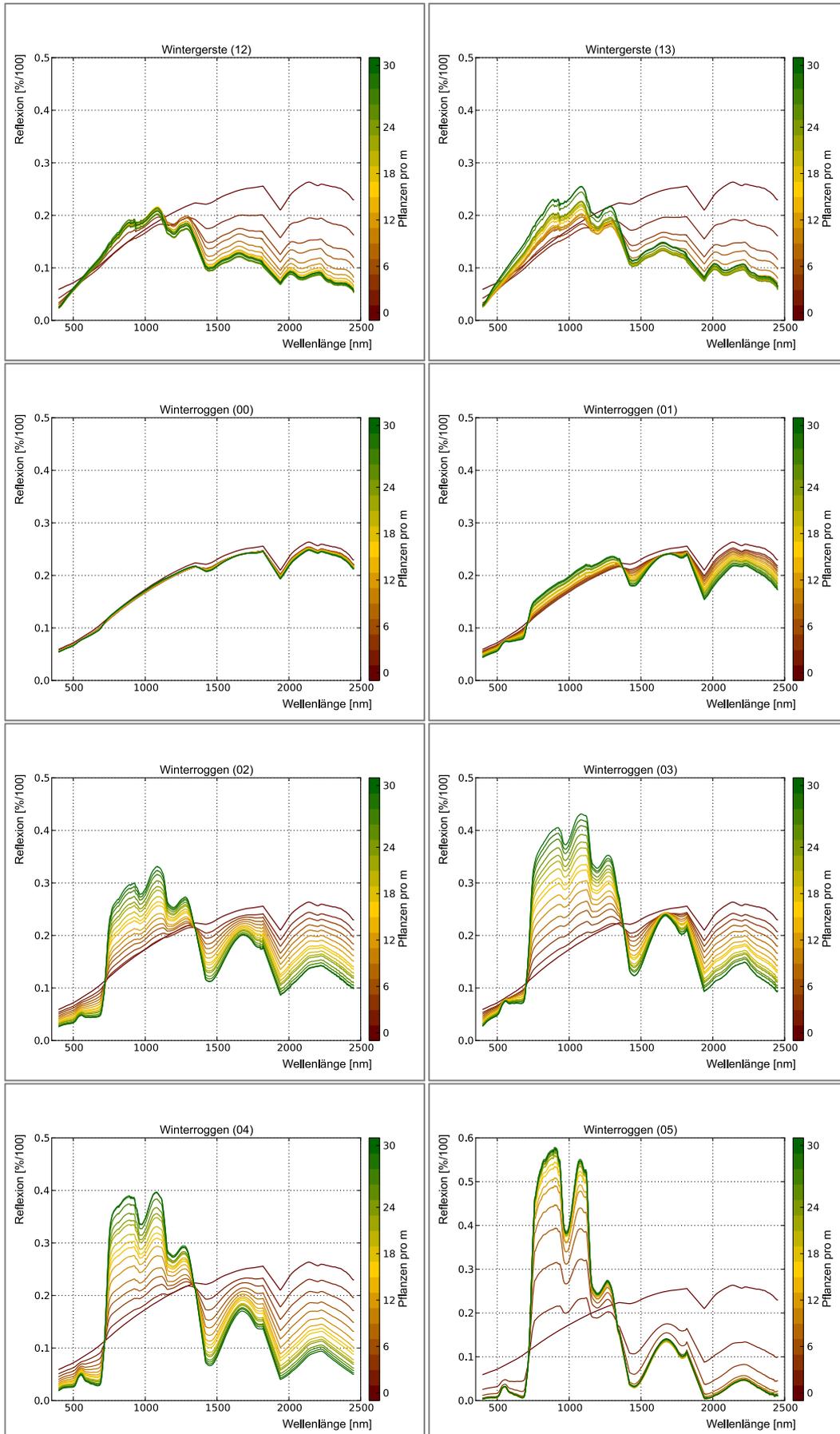


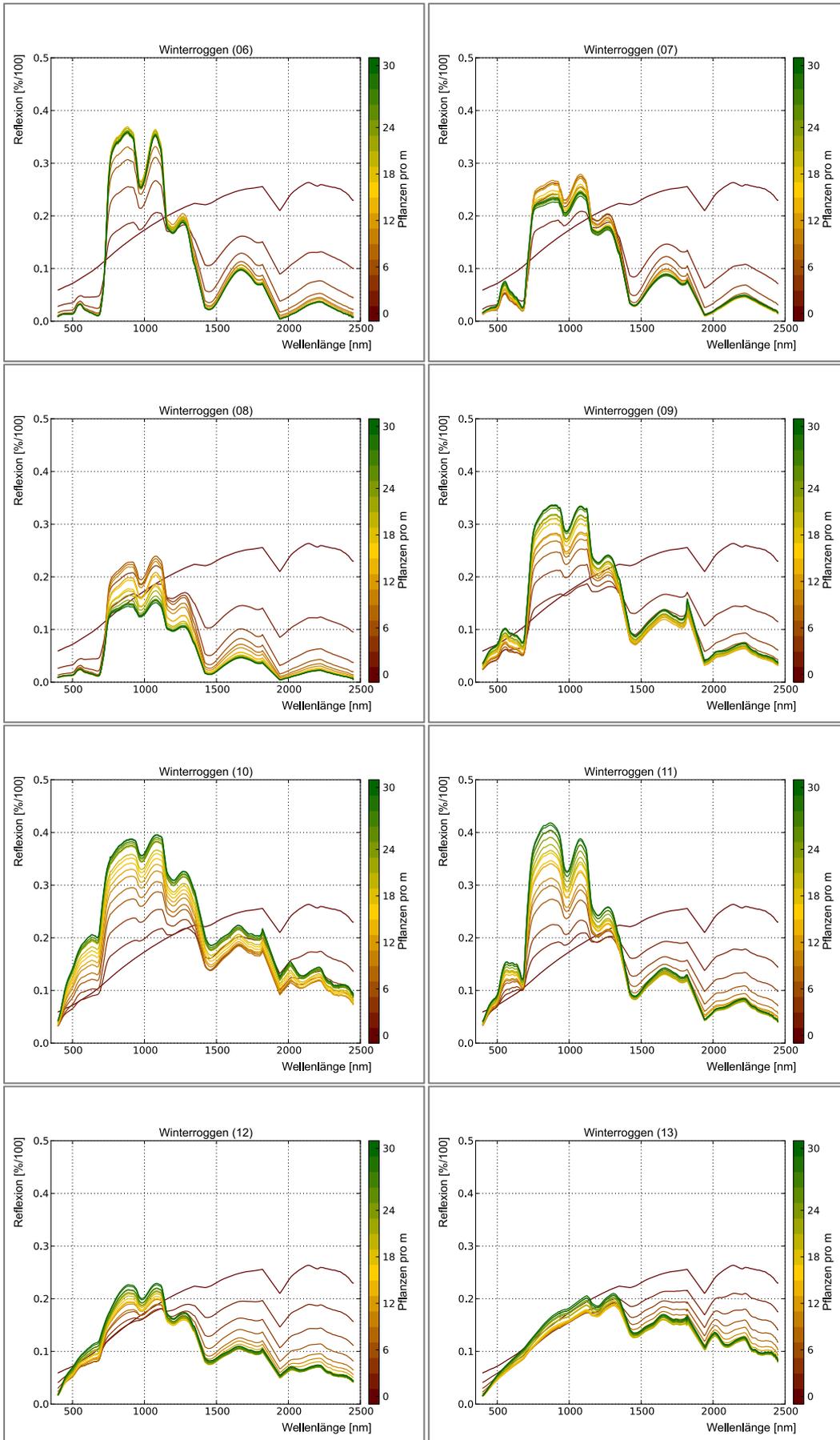


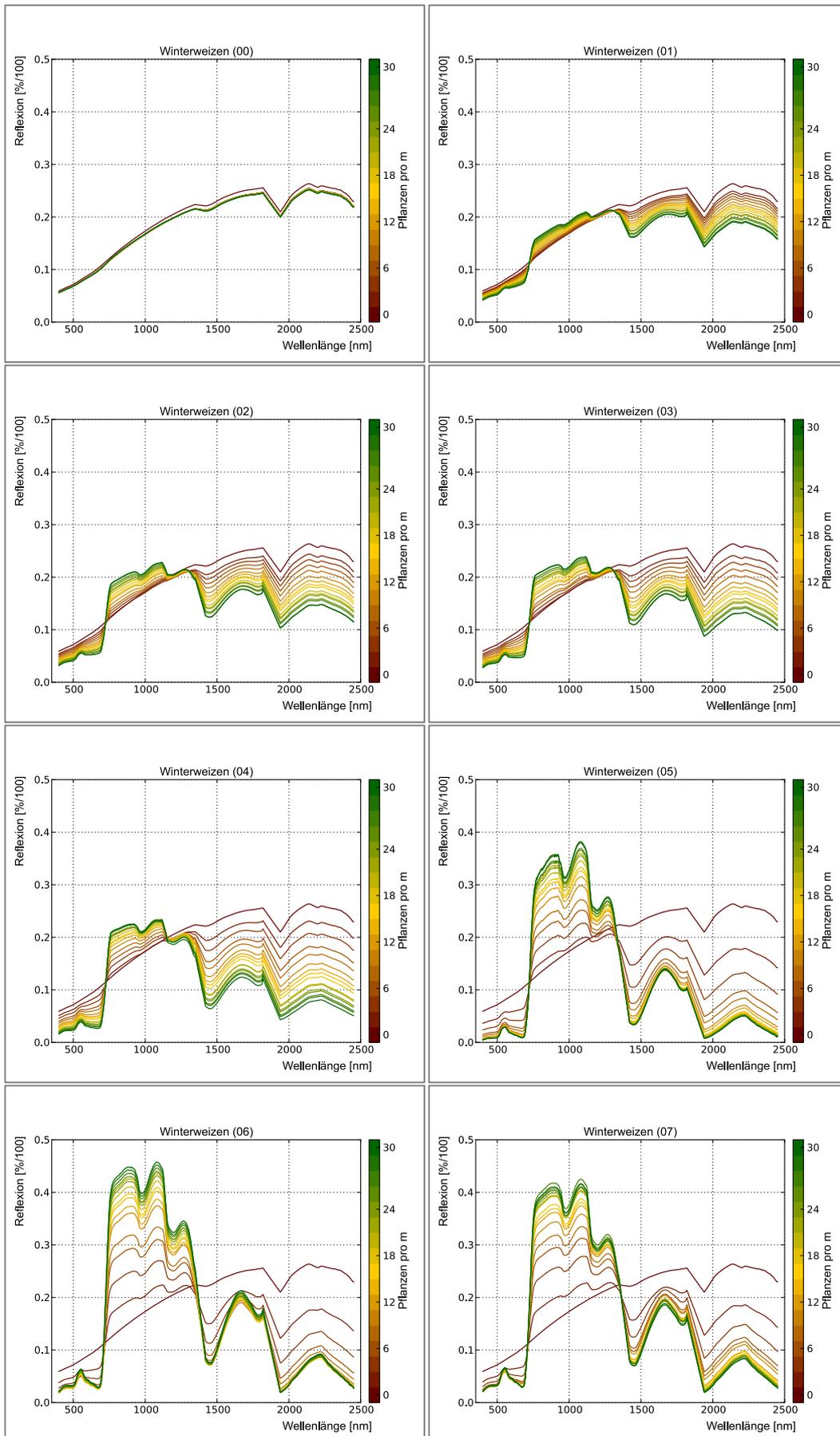
Anhang H Einfluss der Pflanzendichte

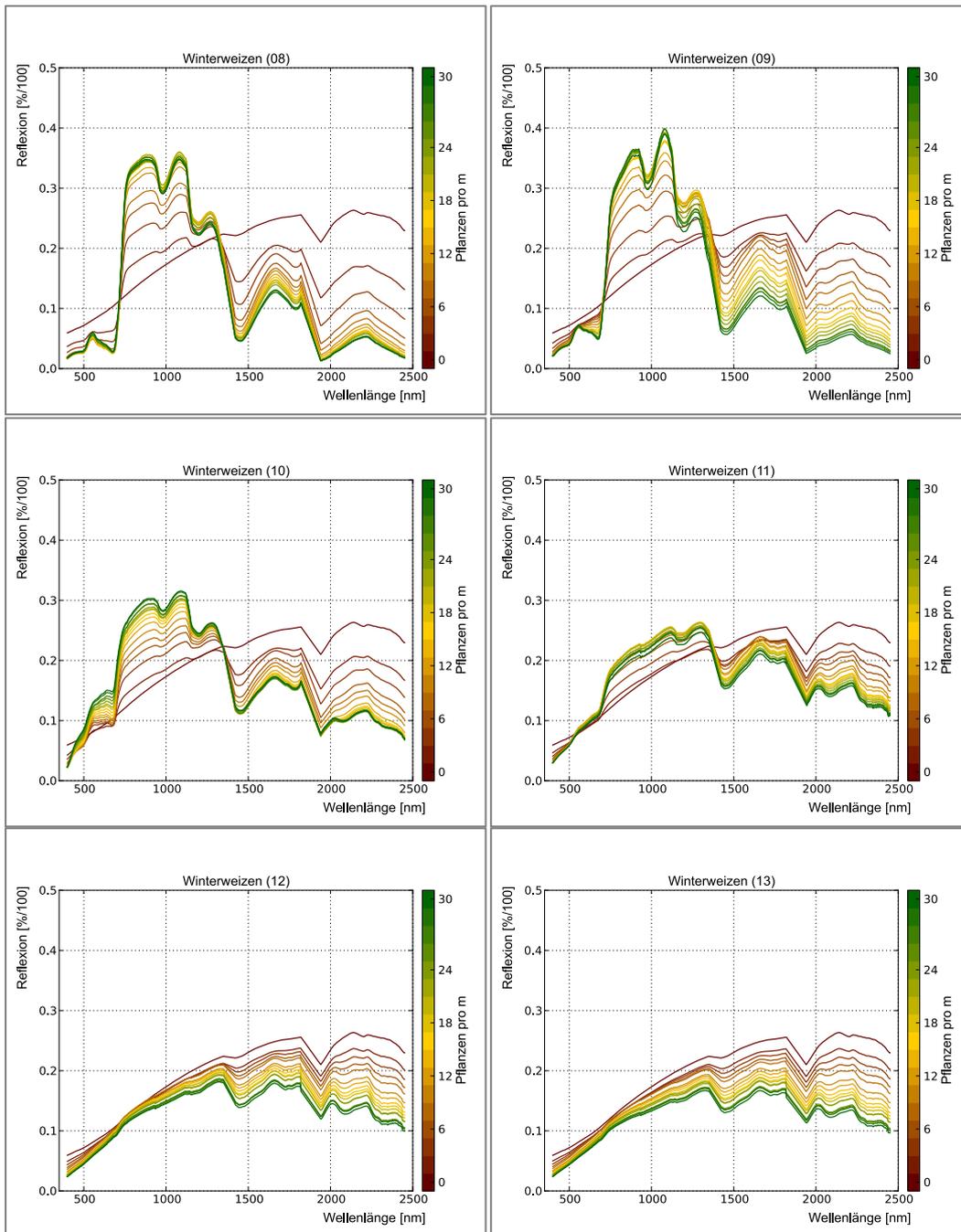




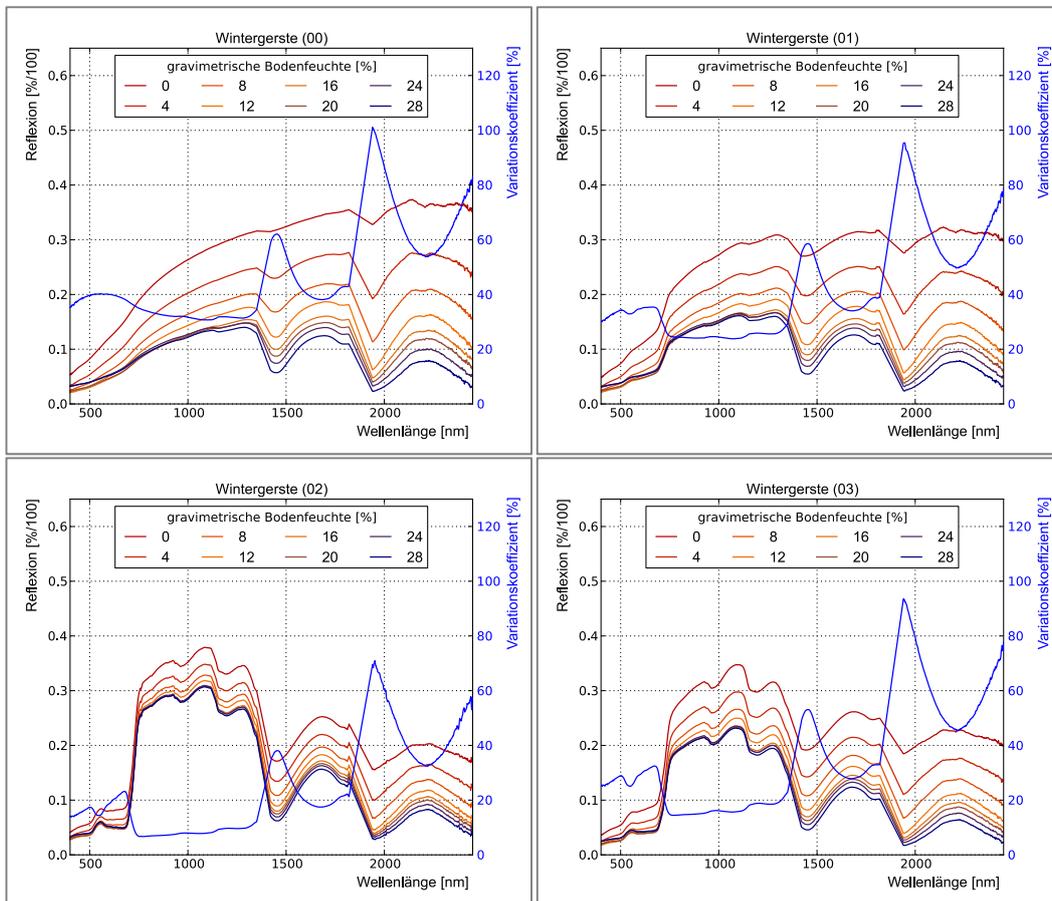


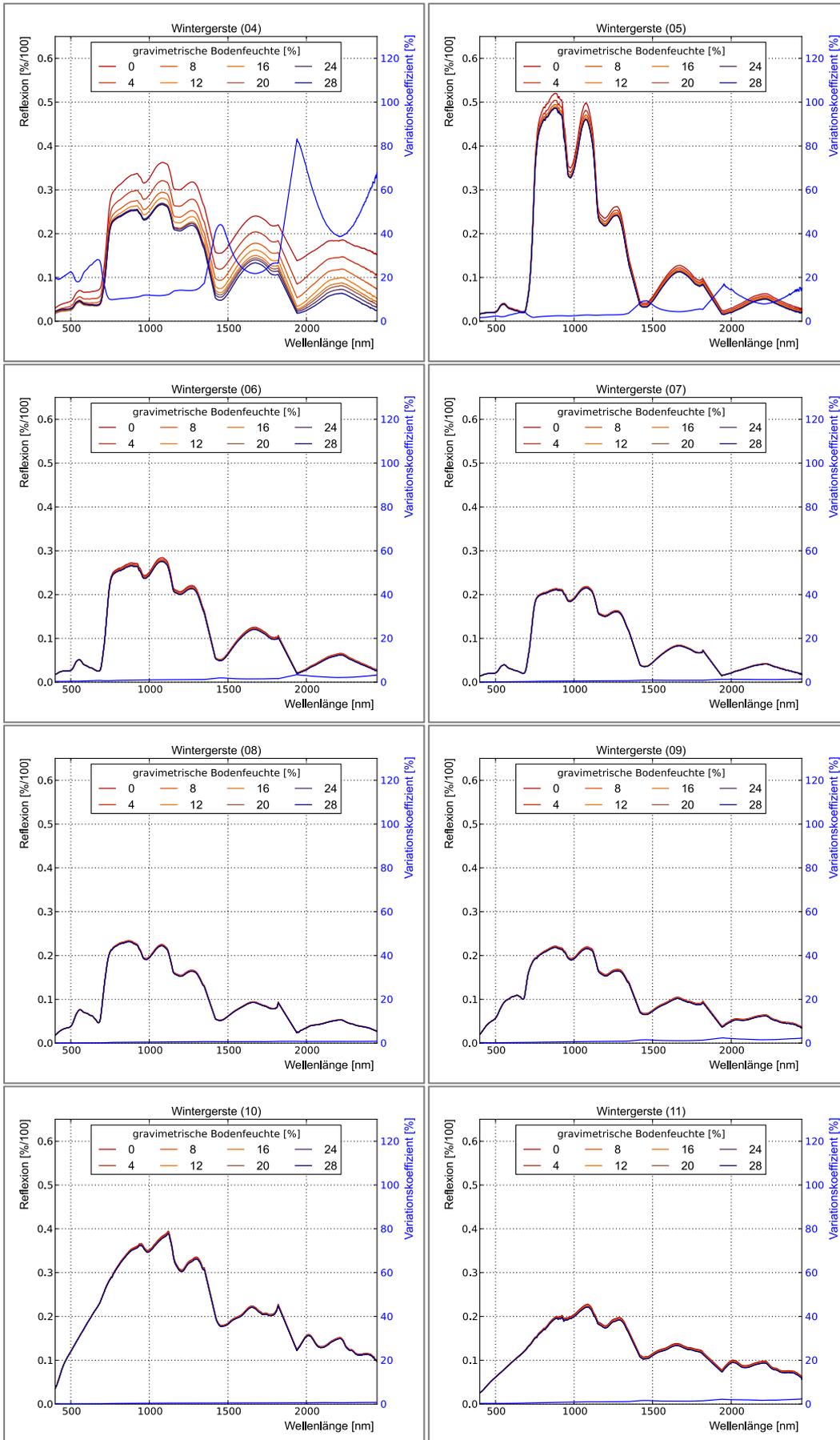


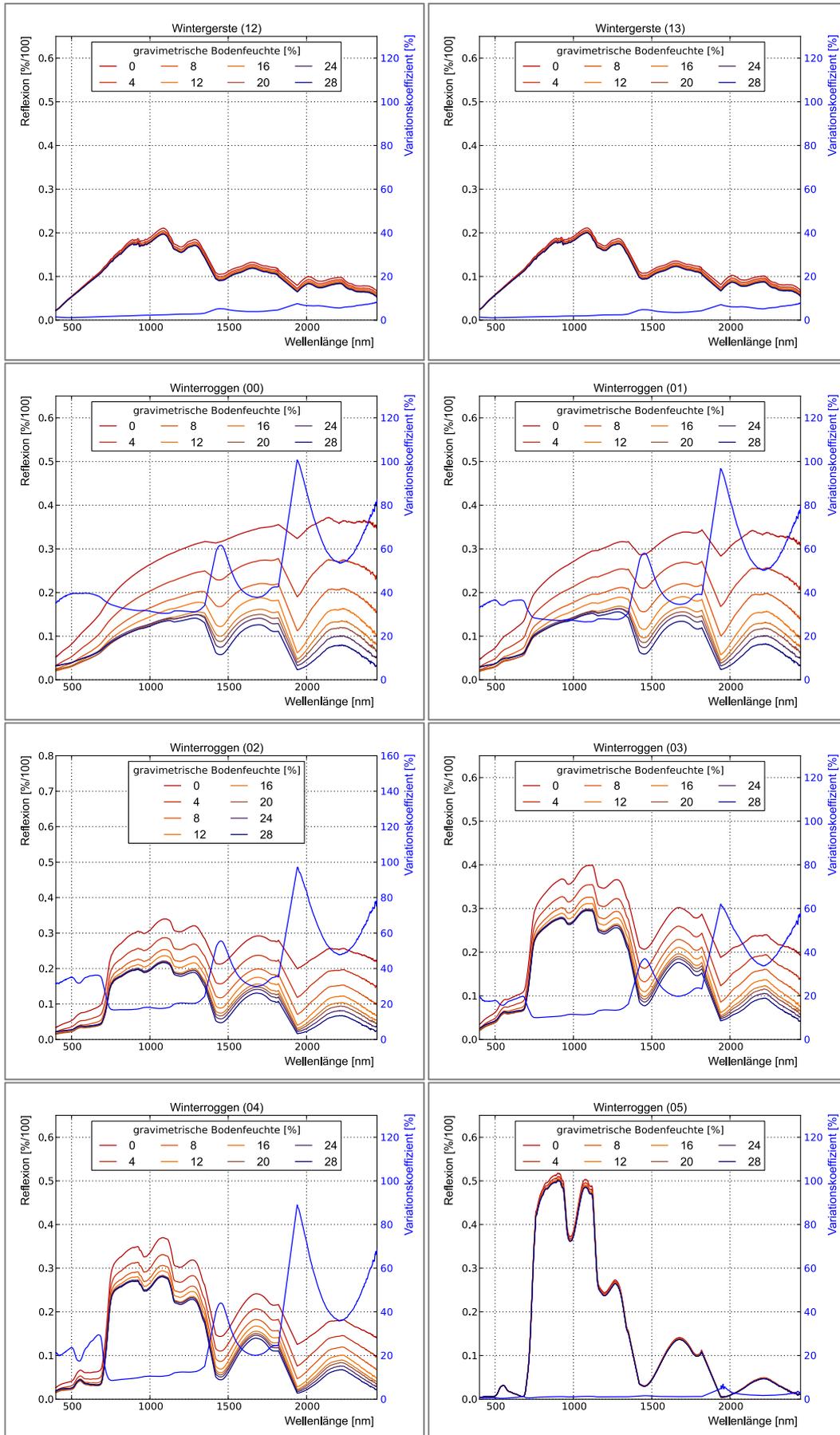


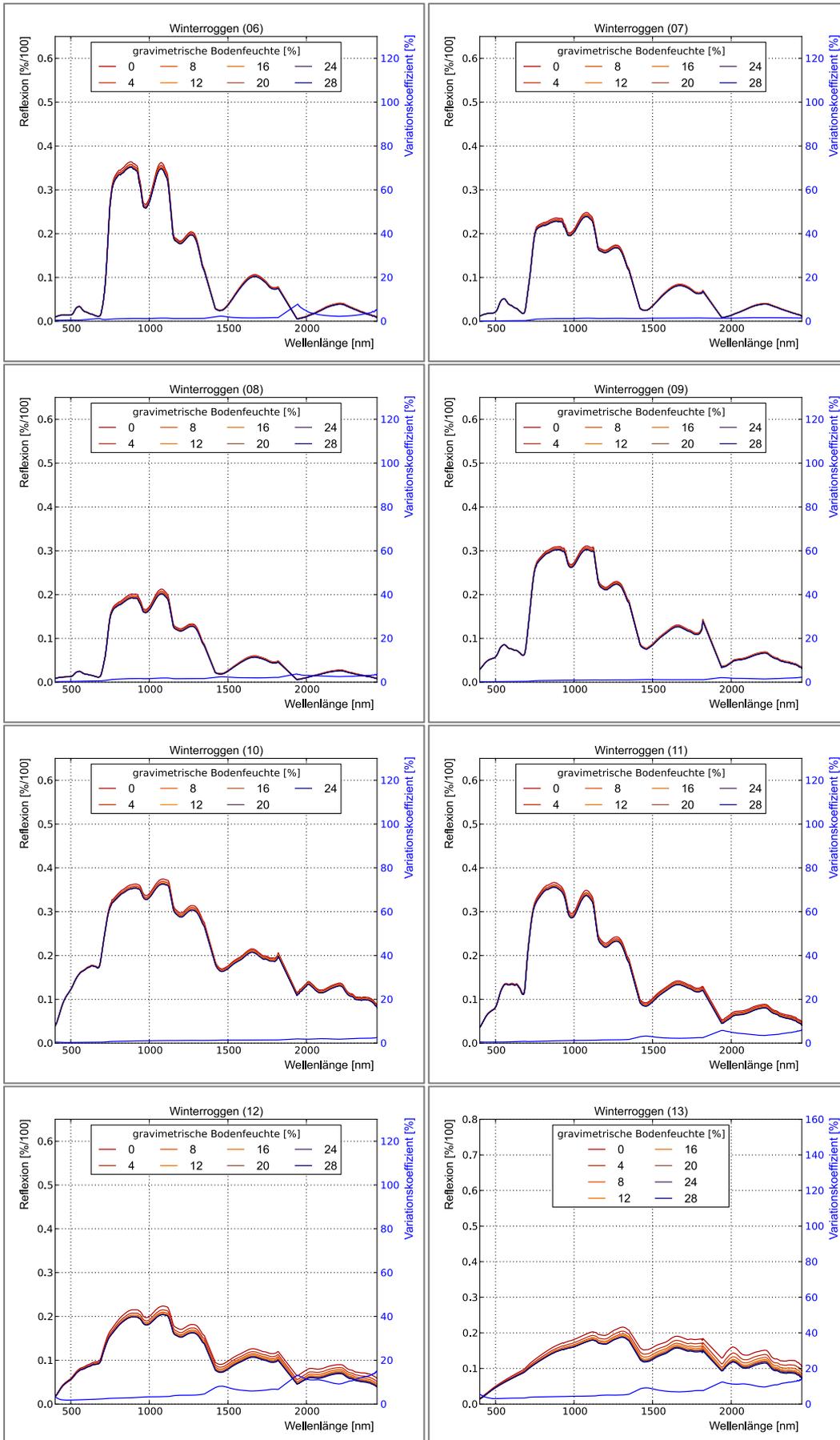


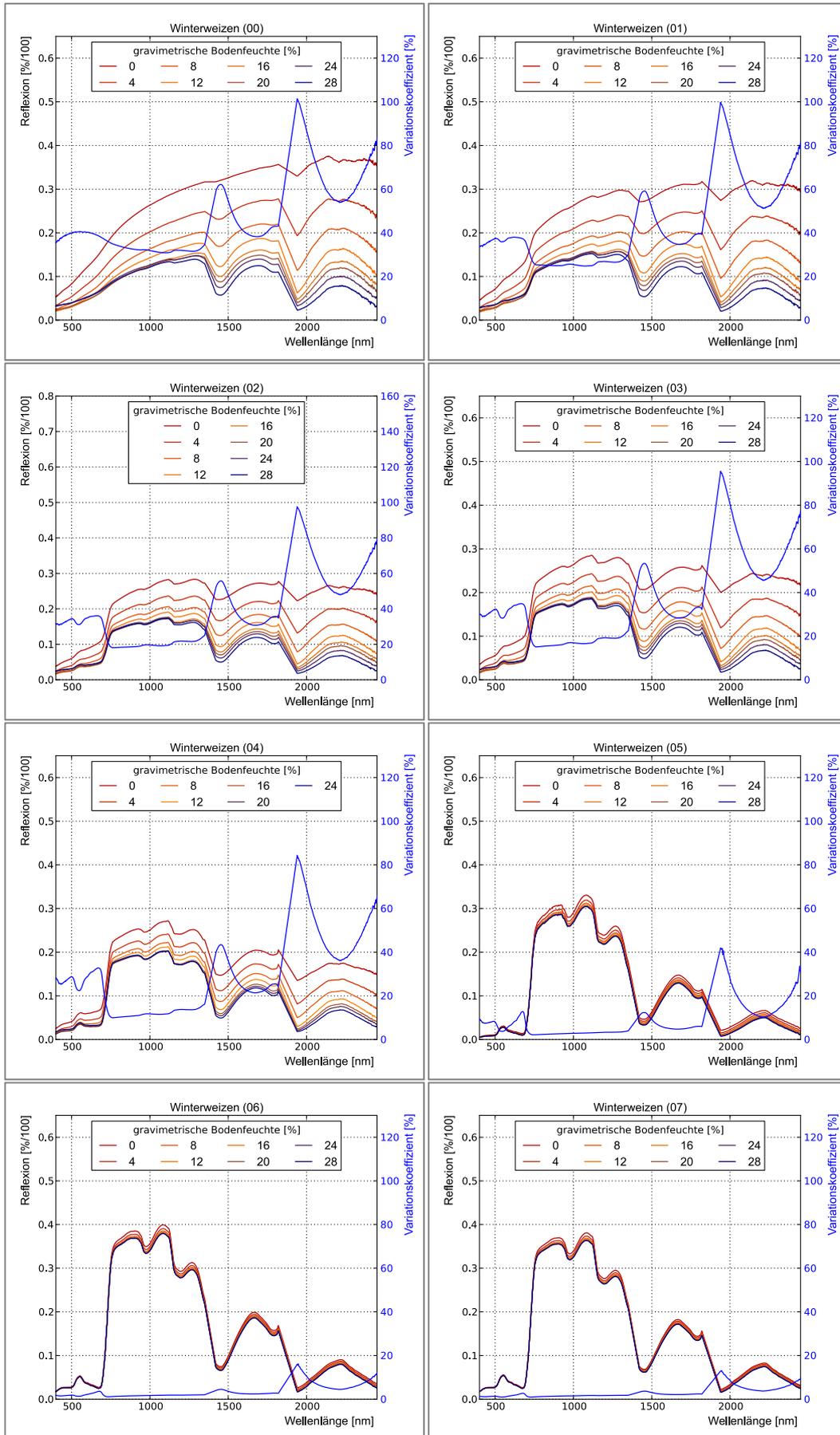
Anhang I Einfluss der Bodenfeuchte

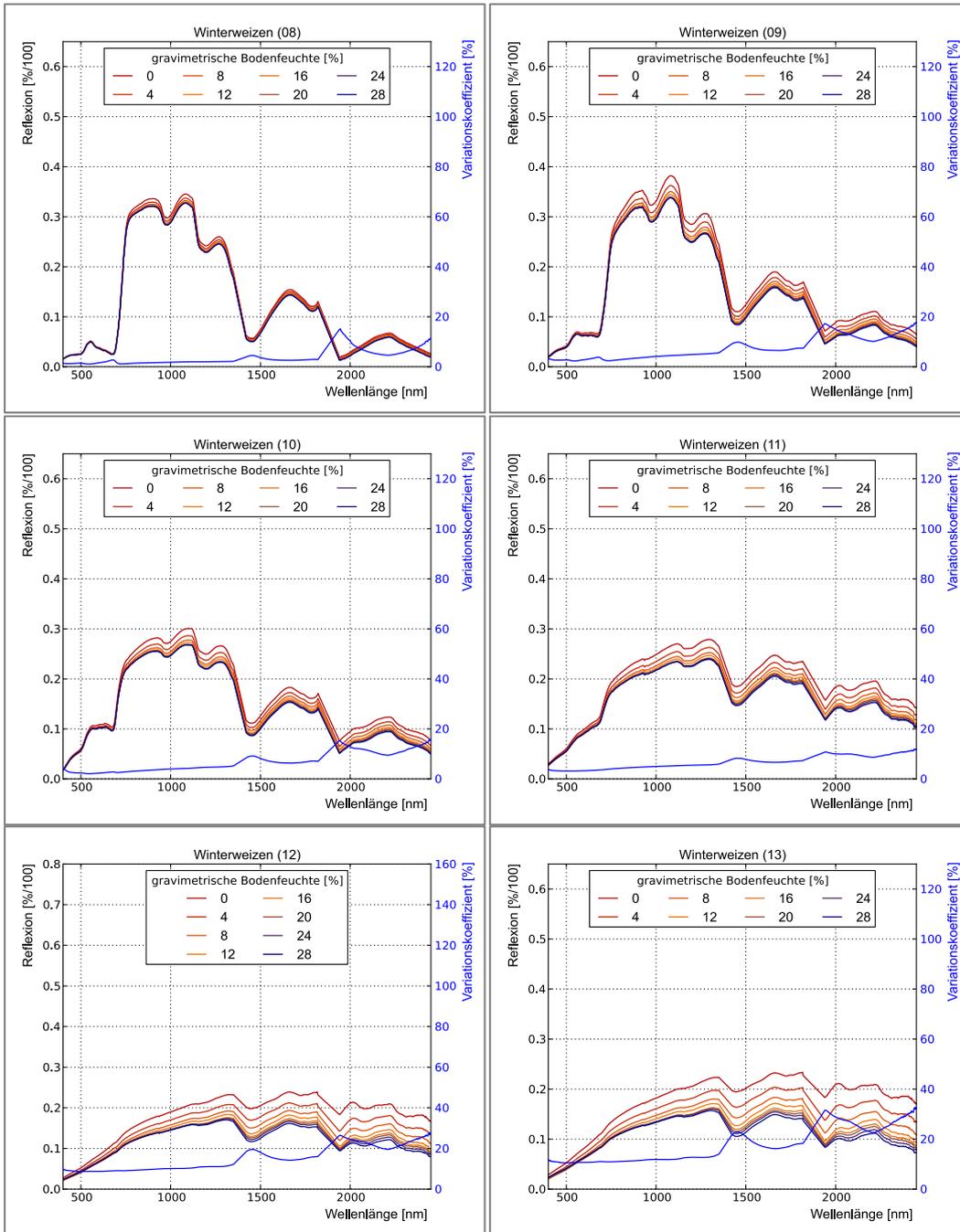












Anhang J Klassifizierungsergebnisse

Tab. J-1: Konfusionsmatrix der *pMLKsim* Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des *HyMap* Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.

	wb 09	wb 10	wb 11	wb 12	wb 13	wr 08	wr 09	wr 10	wr 11	wr 12	ww 07	ww 08	ww 09	ww 10	
wb 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 12	0	2	4	11224	2811	0	0	201	32	0	0	0	1092	28	15394
wb 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 11	0	1	5	102	926	0	0	6387	3610	0	0	2	3478	43	14554
wr 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 09	0	0	0	0	0	1159	0	184	594	0	3	185	3451	222	5798
ww 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	3	9	11326	3737	1159	0	6772	4236	0	3	187	8021	293	35746
		Art + Phänologie				Art + Phänologie ±1				Art					
oAcc [%]	51,15				77,05				78,03						
aAcc [%]	51,41				75,48				75,50						
Kappa	0,37				0,65				0,66						

Tab. J-2: Konfusionsmatrix der *pMLKsim+* Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten *HyMap* Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.

	wb 09	wb 10	wb 11	wb 12	wb 13	wr 08	wr 09	wr 10	wr 11	wr 12	ww 07	ww 08	ww 09	ww 10	
wb 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 12	0	0	17	14364	0	0	0	0	999	0	0	0	14	0	15394
wb 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 11	0	0	0	569	0	0	0	0	13832	0	0	0	151	2	14554
wr 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5797	1	5798
ww 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	17	14933	0	0	0	0	14831	0	0	0	5962	3	35746
	Art + Phänologie					Art + Phänologie ±1					Art				
oAcc [%]	95,09					95,14					95,14				
aAcc [%]	96,11					96,15					96,15				
Kappa	0,94					0,94					0,94				

Tab. J-3: Konfusionsmatrix der *pMLKsim* Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten *Sentinel-2* Datensatzes des UG Wittbrieten vom 20.06.2007.

	wb 09	wb 10	wb 11	wb 12	wb 13	wr 08	wr 09	wr 10	wr 11	wr 12	ww 07	ww 08	ww 09	ww 10	
wb 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 12	0	8	3499	0	8129	0	0	7	21	1368	0	0	1762	0	14794
wb 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 11	0	37	86	0	56	0	0	44	2188	10387	0	1	2755	0	15554
wr 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 09	0	0	0	0	0	23	12	803	1273	54	0	34	3192	7	5398
ww 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	45	3485	780	8105	23	12	854	2482	11809	0	35	7709	7	35764
	Art + Phänologie					Art + Phänologie ±1					Art				
oAcc [%]	15,05					76,88					77,90				
aAcc [%]	24,40					73,21					73,23				
Kappa	0,08					0,64					0,64				

Tab. J-4: Konfusionsmatrix der *pMLKsim+* Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten *Sentinel-2* Datensatzes des UG Wittbrieten vom 20.06.2007.

	wb 09	wb 10	wb 11	wb 12	wb 13	wr 08	wr 09	wr 10	wr 11	wr 12	ww 07	ww 08	ww 09	ww 10		
wb 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wb 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wb 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wb 12	0	0	4330	0	1677	0	0	0	8179	0	0	0	28	0	14214	
wb 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wr 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wr 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wr 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wr 11	0	0	58	0	0	0	0	0	15162	0	0	0	334	0	15554	
wr 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ww 07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ww 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ww 09	0	0	0	0	0	0	0	0	267	0	0	0	5711	0	5978	
ww 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	4388	0	1677	0	0	0	23608	0	0	0	6073	0	35746	
		Art + Phänologie					Art + Phänologie ±1					Art				
oAcc [%]		58,39					75,20					75,20				
aAcc [%]		64,34					78,42					78,42				
Kappa		0,39					0,61					0,61				

Tab. J-5: Konfusionsmatrix der *pMLKsim* Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten *WorldView-2* Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.

	wb 09	wb 10	wb 11	wb 12	wb 13	wr 08	wr 09	wr 10	wr 11	wr 12	ww 07	ww 08	ww 09	ww 10		
wb 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wb 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wb 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wb 12	0	545	5272	1	0	0	0	0	3	8890	0	0	669	14	15394	
wb 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wr 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wr 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wr 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wr 11	0	36	98	0	0	0	18	1	1249	9882	0	0	3240	30	14554	
wr 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ww 07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ww 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ww 09	0	0	0	0	0	0	1574	0	735	123	0	27	3283	56	5798	
ww 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	581	5370	1	0	0	1592	1	1987	18895	0	27	7192	100	35746	
		Art + Phänologie					Art + Phänologie ±1					Art				
oAcc [%]		12,68					55,31					56,88				
aAcc [%]		21,74					56,27					57,49				
Kappa		0,08					0,32					0,33				

Tab. J-6: Konfusionsmatrix der *pMLKsim+* Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten *WorldView-2* Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007

	wb 09	wb 10	wb 11	wb 12	wb 13	wr 08	wr 09	wr 10	wr 11	wr 12	ww 07	ww 08	ww 09	ww 10	
wb 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 12	0	51	8612	119	0	0	0	0	3213	2126	0	0	392	881	15394
wb 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 11	0	24	166	0	0	0	0	0	3647	8804	0	0	1894	19	14554
wr 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 09	0	0	0	0	0	0	0	0	4	30	0	0	5764	0	5798
ww 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	75	8778	119	0	0	0	0	6864	10960	0	0	8050	900	35746
		Art + Phänologie				Art + Phänologie ±1				Art					
oAcc [%]	26,66				75,38				75,52						
aAcc [%]	41,75				80,67				80,67						
Kappa	0,17				0,62				0,62						

Tab. J-7: Konfusionsmatrix der *pMLKsim* Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten *Landsat TM7* Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.

	wb 09	wb 10	wb 11	wb 12	wb 13	wr 08	wr 09	wr 10	wr 11	wr 12	ww 07	ww 08	ww 09	ww 10	
wb 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 12	0	0	2555	10699	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2140	15394
wb 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 11	0	0	246	1	0	0	0	0	786	0	0	0	27	13494	14554
wr 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 09	0	0	0	0	0	0	30	0	16	82	0	0	5059	611	5798
ww 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	2801	10700	0	0	30	0	802	82	0	0	5086	16245	35746
	Art + Phänologie					Art + Phänologie ±1					Art				
oAcc [%]	46,28					55,14					55,14				
aAcc [%]	54,05					63,10					63,10				
Kappa	0,36					0,39					0,39				

Tab. J-8: Konfusionsmatrix der *pMLKsim+* Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten *Landsat TM7* Datensatzes des UG Wittbrietzen vom 20.06.2007.

	wb 09	wb 10	wb 11	wb 12	wb 13	wr 08	wr 09	wr 10	wr 11	wr 12	ww 07	ww 08	ww 09	ww 10	
wb 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 12	0	0	7	12255	0	0	0	0	2862	30	0	0	8	232	15394
wb 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 11	0	0	0	355	0	0	0	0	5888	299	0	0	159	7853	14554
wr 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 09	0	0	0	0	0	0	0	0	32	0	0	0	5669	97	5798
ww 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	7	12610	0	0	0	0	8782	329	0	0	5836	8182	35746
	Art + Phänologie					Art + Phänologie ±1					Art				
oAcc [%]	66,61 %					67,74 %					67,74 %				
aAcc [%]	72,61 %					73,87 %					73,87 %				
Kappa	0,54					0,53					0,53				

Tab. J-9: Konfusionsmatrix der *pMLKsim* Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten *RapidEye* Datensatzes des UG Wittbrieten vom 20.06.2007.

	wb 09	wb 10	wb 11	wb 12	wb 13	wr 08	wr 09	wr 10	wr 11	wr 12	ww 07	ww 08	ww 09	ww 10		
wb 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wb 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wb 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wb 12	0	1237	10475	725	0	0	0	0	446	0	0	0	3	2508	15394	
wb 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wr 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wr 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wr 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
wr 11	0	55	253	0	0	0	0	1	4804	4322	0	0	32	5087	14554	
wr 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ww 07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ww 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ww 09	0	0	0	0	0	0	0	512	15	0	0	0	5106	165	5798	
ww 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	1292	10728	725	0	0	0	513	5265	4322	0	0	5141	7760	35746	
		Art + Phänologie					Art + Phänologie ±1					Art				
oAcc [%]		29,75					71,61					75,07				
aAcc [%]		41,93					75,46					78,14				
Kappa		0,23					0,61					0,63				

Tab. J-10: Konfusionsmatrix der *pMLKsim+* Klassifizierung für die Bestimmung der Art und der Phänologie des simulierten *RapidEye* Datensatzes des UG Wittbrieten vom 20.06.2007.

	wb 09	wb 10	wb 11	wb 12	wb 13	wr 08	wr 09	wr 10	wr 11	wr 12	ww 07	ww 08	ww 09	ww 10	
wb 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wb 12	0	361	7097	3199	0	0	0	0	3771	0	0	0	0	966	15394
wb 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
wr 11	0	119	110	28	0	0	0	0	10473	733	0	0	44	3047	14554
wr 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ww 09	0	0	0	0	0	0	0	130	0	0	0	0	5550	118	5798
ww 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	480	7207	3227	0	0	0	130	14244	733	0	0	5594	4131	35746
	Art + Phänologie					Art + Phänologie ±1					Art				
oAcc [%]	53,77					76,01					77,02				
aAcc [%]	62,82					81,33					81,33				
Kappa	0,4					0,65					0,65				

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit „Charakterisierung von Getreidearten aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten auf der Basis von 4D-Bestandsmodellen“ von mir selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen wissenschaftlichen Institution vorgelegt.

Ort, Datum

Daniel Spengler