

Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz

Informationsableitung aus „Off Nadir“-Reflexionsaufnahmen zur  
Entscheidungsunterstützung in „Precision Agriculture“

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
am Wissenschaftszentrum Weihenstephan  
für Ernährung, Landnutzung und Umwelt  
der Technischen Universität München

vorgelegt von

Ioannis Manakos

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. U. Ammer
2. Prof. Dr. P. Fabian
3. Prof. Dr. H. D. Quednau

Freising, Februar 2003

vorgelegt von M.Sc., Dipl. Geol. Ioannis Manakos  
am 03.02.2003  
angenommen vom Promotionsausschuss  
am 28.04.2003

*Die vorliegende Arbeit möchte ich denen widmen, die mir immer zur Seite stehen und an mich glauben:*

*meine Familie*

*Charalambos, Anastasia, Zacharias, Alexandros*

## DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde in den Jahren 1999 bis 2002 am Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz des Departments für Ökosystem- und Landschaftsmanagement des Wissenschaftszentrums Weißenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München durchgeführt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. U. Ammer, welcher es mir ermöglicht hat, diese Dissertation durchzuführen.

Herzlichen Dank sage ich Herrn Dr. T. Schneider, der durch Anleitung und Beratung entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Für den einwandfreien Austausch von Informationen und gegenseitige Unterstützung möchte ich mich bei allen Betreuern und Doktoranden im IKB-Dürnast-Projekt (Phase I) bedanken.

Für die Unterstützung bei den Geländeuntersuchungen möchte ich mich recht herzlich bei Herrn H. Linseisen, Herrn F. Ruthenkolk, Herrn Dr. R. de Kok, Herrn C. Augsburg, Herrn T. Steinmayr, Herrn D. Geesing, Herrn J. Liebler und bei den jeweils mitarbeitenden Studenten bedanken.

Dr. R. Gutscher, Dr. K. Walter, Herr R. Mannhart und den anderen Mitarbeitern in Dürnast möchte ich für die technische Unterstützung und Hilfsbereitschaft danken.

Dr. M. Winterhalter und Dr. H. Langholz danke ich für die Zusammenarbeit und Beratung im Bereich der Meteorologie und insbesondere für ihre Mitteilungen über die klimatischen Verhältnisse des Untersuchungsgebietes.

Für Programmentwicklung, Beratung und Hilfsbereitschaft möchte ich mich bei den Herren Dr. U. Beisl, Dr. C. Bacour, Dr. B. Förster und M. Habermeyer besonders bedanken.

Herrn Prof. Dr. H. Pretzsch, Herrn Prof. Dr. H. D. Quednau, Dr. G. Kritikos, Herrn H. El Kateb und Dr. A. Manakos danke ich für die Diskussionsbereitschaft und Beratung während der Durchführung dieser Arbeit.

Allen Kollegen des Lehrstuhls möchte ich besonders für die Hilfsbereitschaft, die moralische Unterstützung und Anteilnahme danken, die sie mir während der Erstellung dieser Arbeit haben zukommen lassen.

Bei meiner Familie bedanke ich mich recht herzlich, sowohl für ihre moralische und finanzielle Unterstützung, als auch für ihre Geduld und Rücksichtnahme.

Ein herzlicher Dank gilt ebenso meiner Lebensgefährtin D. Stylianidou und meinen Freunden für ihre moralische Unterstützung, ihre Geduld und Rücksichtnahme.

Die Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes No. AU 149 1/1 mit der Projektbezeichnung "Informationssystem Kleinräumige Bestandesführung - Dürnast" (IKB-Dürnast) durchgeführt. Mein Dank gilt daher der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung des Forschungsvorhabens.

# INHALTSVERZEICHNIS

	Seite	
Abbildungsverzeichnis	xi	
<hr/>		
Tabellenverzeichnis	xviii	
<hr/>		
Formelverzeichnis	xix	
<hr/>		
Abkürzungen	xx	
<hr/>		
1	Arbeitsumfeld und Zielsetzung	1
1.1	Der “real time with map overlay”-Ansatz	2
1.2	Zielsetzung	4
1.3	Untersuchungsgebiet	6
1.3.1	Geologie und Boden	6
1.3.2	Klima	8
<hr/>		
2	Strahlungsphysikalischer Hintergrund	10
2.1	Physikalische Größen der Reflexionsverteilung im Raum	12
2.2	Beeinflussung des empfangenen Signals durch die Atmosphäre und die Topographie	14
2.2.1	Atmosphärische Einflüsse	14

		Seite
	2.2.2 Topographische Einflüsse	17
2.3	Reflexion vegetationsbestandener Oberflächen	18
	2.3.1 Reflexion des Bodens	18
	2.3.2 Reflexion der Pflanze im Einzelnen	20
	2.3.2.1 Einfluss der chemischen Zusammensetzung der Pflanze auf ihr Reflexionsverhalten	20
	2.3.2.2 Einfluss der Struktur der Pflanze auf ihr Reflexionsverhalten	21
	2.3.2.3 Die Reflexion der Pflanze als Informationsquelle	23
	2.3.3 Auswirkung der dreidimensionalen Geometrie des Bestandes auf die Reflexion	23
<hr/>		
3	Fernerkundlicher Hintergrund	26
	3.1 Zusammenhang der aufgenommenen Reflexion mit den Bestandesmerkmalen	26
	3.1.1 Vegetationsindizes	26
	3.1.2 Schwachpunkte der verwendeten Korrelationen	27
	3.1.3 Berücksichtigung der Strukturmerkmale des Bestands zur Ermittlung seines Zustands	30
	3.2 Das „Off Nadir“-Signal in der Fernerkundung	30
	3.3 Simulation der Reflexionsverteilung von Vegetationsbeständen	34
	3.3.1 BRDF-Modelle	35
	3.3.2 Beschreibung der ausgewählten BRDF-Modellen	36
	3.3.2.1 Das PROSAIL-Modell	37
	3.3.2.2 Das AMBRALS-Modell	39
	3.4 „In situ“-Messung der Reflexionsverteilung	41
	3.4.1 Rahmenbedingungen	42

3.4.2	Bodengestützte Aufnahmesysteme für die Erfassung der Reflexionsverteilung von Vegetationsbeständen	43
<hr/>		
4	Material und Methode	48
4.1	MUFSPeM (Mobile Unit for Field SPeCtoradiometric Measurements)	48
4.1.1	Aufbau	49
4.1.2	Messtechnik	49
4.2	Messstrategie	51
4.2.1	Annahmen	53
4.2.2	Methodik der Reflexionsaufnahme „in situ“	54
4.2.3	Atmosphärische Rahmenbedingungen für die Reflexionsaufnahme	56
4.2.4	Begleitmessungen	56
4.3	Reflexionsdatensätze	58
4.4	Aufbereitung der registrierten Daten	59
4.4.1	Verknüpfung der Reflexions- mit den Begleitdaten	59
4.4.2	Vorbereitung der Reflexionsdaten auf die Auswertung der Richtungsabhängigkeit	60
4.4.3	Auswirkung der Sonnen- und Beobachtungsposition auf die Vegetationsindizes	62
4.4.4	Auswahl relevanter Wellenlängen	64
4.4.5	Approximation der Reflexionsverteilungsfunktion (BRDF)	67
4.4.5.1	Quantitative Auswertung der Schwankungen der „Off Nadir“-Reflexion	67
4.4.5.2	Graphische Darstellung	69
4.5	Integration der abgeleiteten Information in die Teilschlagbewirtschaftung	70
4.5.1	Inversion des PROSAIL-Modells	70

	Seite	
4.5.2	Anpassung des AMBRALS-Modells	71
4.6	Software	72
<hr/>		
5	Ergebnisse	74
5.1	Das richtungsabhängige Reflexionsverhalten von Winterweizen-Beständen	79
5.1.1	Reflexionsverteilungsformen	79
5.1.2	Abhängigkeit von der Beobachtungsposition	81
5.1.3	Abhängigkeit von der Sonnenposition	83
5.1.4	Auswirkung der Bestandesentwicklung	85
5.1.5	Standortspezifische Unterschiede der Reflexionsverteilung	88
5.1.6	Auswirkung der Bewölkung: Ein Sonderfall	92
5.2	Auswirkung der Anisotropie auf die Berechnung von Vegetationsindizes	93
5.3	Normalisierung der „Off Nadir“-Reflexion über BRDF-Modellen	95
5.4	Berechnung der standortspezifischen Bestandesmerkmale mit Hilfe des PROSAIL-Modells	98
<hr/>		
6	Diskussion	103
6.1	Konzept der Datenaufnahme „in situ“	108
6.1.1	Gültigkeit der Annahmen	108
6.1.2	Variabilität der Größe der erfassten Messfläche je nach Beobachtungswinkel	109
6.1.3	Räumliche Verteilung der Aufnahmewinkel	110
6.1.4	Registrierung von Bestandesmerkmalen	111
6.2	Auswirkung der Witterungsverhältnisse	112

	Seite	
6.3	Fehlbestimmung von Bestandesmerkmalen durch Vegetationsindizes	113
6.4	Reflexionsverteilungsmerkmale von Weizenbeständen im Vergleich	114
6.5	Einsatz von BRDF-Modellen	120
<hr/>		
7	Bilanz gegenüber der Zielsetzung	122
7.1	Messtechnisches Ziel	122
7.2	Analytisches Ziel	122
7.3	Hypothesen	123
7.4	Forschungsbedarf	124
<hr/>		
8	Ausblick	125
<hr/>		
	Zusammenfassung (Abstract)	127
	In Deutsch	127
	In Englisch	128
<hr/>		
	Literaturverzeichnis	131
<hr/>		
	Anhang	147
	Anhang A	148
	A1 Reflexionsverteilung parallel zur Sonnenhauptebene ( $\varphi^\circ$ : $0^\circ / 180^\circ$ )	148

	Seite
A2 Reflexionsverteilung in der um 45° zur Sonnenhauptebene gedrehte Beobachtungssazimutebene ( $\varphi^\circ$ : 45° / 225°)	158
A3 Reflexionsverteilung in der um 90° zur Sonnenhauptebene gedrehte Beobachtungssazimutebene ( $\varphi^\circ$ : 90° / 270°)	168
Anhang B	178
B1 Berechnung der ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion parallel zur Sonnenhauptebene ( $\varphi^\circ$ : 0° / 180°)	178
B2 Berechnung der ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion in der um 45° zur Sonnenhauptebene gedrehte Beobachtungssazimutebene ( $\varphi^\circ$ : 45° / 225°)	197
B3 Berechnung der ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion in der um 90° zur Sonnenhauptebene gedrehte Beobachtungssazimutebene ( $\varphi^\circ$ : 90° / 270°)	216

---

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildungstitel werden gekürzt aufgelistet.

	Seite
<b>Abbildung 1.</b> Steuerung der Düngemittel- oder Wasserausgabemenge beim „RealTime with Map Overlay“-Ansatz.	3
<b>Abbildung 2.</b> Schematische Darstellung der Informationsgewinnung von Fernerkundungsdaten mit Beispielen von benötigten Parametern/Daten.	5
<b>Abbildung 3.</b> Lage des Untersuchungsgebiets.	7
<b>Abbildung 4.</b> Mitteljahrestemperaturen und gemittelte Niederschlagsmengen des Untersuchungsgebiets für die Jahre 1971-2000.	8
<b>Abbildung 5.</b> Die Reflexion an der Oberfläche und die Volumenreflexion	10
<b>Abbildung 6.</b> Reflexionsweise hinsichtlich des Rayleigh-Kriteriums.	11
<b>Abbildung 7.</b> Definition der Winkel für die Beschreibung der bidirektionalen Reflexion.	12
<b>Abbildung 8.</b> Transmission der EM-Strahlung in der Atmosphäre und wellenlängenabhängige Absorption der EM-Strahlung durch Ozon, Sauerstoff, Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan der Atmosphäre.	15
<b>Abbildung 9.</b> Strahlungsverteilung bei Rayleigh- und Mie-Streuung an Teilchen in der Atmosphäre.	15
<b>Abbildung 10.</b> Beispiel des Verhältnisses diffuser zu direkter Einstrahlung im Tagesverlauf am 15.05.00.	16
<b>Abbildung 11.</b> Streumechanismen in der Atmosphäre.	17
<b>Abbildung 12.</b> Reflexion von schluffigem Lehm im Zusammenhang mit der Wellenlänge und der Bodenfeuchtigkeit.	18
<b>Abbildung 13.</b> Das richtungsabhängige Reflexionsverhalten von gepflügten Böden.	19

	Seite
<b>Abbildung 14.</b> Wirkungsweise ausgewählter Einflussfaktoren auf die Reflexion von Blattoorganen.	22
<b>Abbildung 15.</b> Schattenwurfeffekte im Vegetationsbestand im Zusammenhang mit den Beobachtungspositionen.	24
<b>Abbildung 16.</b> Reflexionsverteilung parallel zur Sonneneinstrahlungsrichtung und senkrecht zur Sonneneinstrahlungsrichtung über Gras.	25
<b>Abbildung 17.</b> Ertragsaussicht / -abschätzung: Hohe Korrelationswerte zwischen dem Vegetationsindex „HWP“ und dem Kornertrag.	27
<b>Abbildung 18.</b> Korrelation zwischen NDVI und BFI für fünf unterschiedliche Düngevarianten bei Winterweizen.	28
<b>Abbildung 19.</b> Beispiele [A] der Auswirkung der Sonnenposition auf die Berechnung des Vegetationsindex „HWP“ an einem Messtag und [B] der Auswirkung der Beobachtungsposition auf die Berechnung des Vegetationsindex „NDVI“.	29
<b>Abbildung 20.</b> Das richtungsabhängige Reflexionsverhalten als Störfaktor: 1. Ungünstiges Höhen-Basis-Aufnahmeverhältnis eines Flugzeuges im Vergleich mit dem eines Satelliten. 2. Randaufhellungen bei einem Flugzeug-Aufnahmestreifen.	31
<b>Abbildung 21.</b> Das richtungsabhängige Reflexionsverhalten als Informationsquelle: Unterschiedliche Oberflächentypen und ihre bevorzugte Reflexionsrichtung als physikalisches Merkmal.	33
<b>Abbildung 22.</b> Reflexion und Transmission auf und durch ein aus einer Schicht bestehendes, kompaktes Blatt (z.B. „monocotyledonos“ Blatt) und ein aus mehreren Schichten bestehendes Blatt (z.B. „dicotyledonos“ Blatt) nach dem Modellansatz von Allen et al. (1969), Allen et al. (1970) und Jacquemoud et al. (1990).	37
<b>Abbildung 23.</b> [A] Querschnitt durch einen Modell-Pflanzenbestand mit Strahlungsflüssen. [B] Gleichungssystem der Vier-Fluss-Theorie des SAIL-Modells.	38
<b>Abbildung 24.</b> Verknüpfung der Modelle (Coupling of the models).	39

	Seite
<b>Abbildung 25.</b> Reflexionsverhalten einer PTFE-Referenzfläche am 09.05.00 „in situ“ beim Sonnenazimutwinkel von $135^\circ$ und Sonnenzenitwinkel von $38^\circ$ .	44
<b>Abbildung 26.</b> Konstruktion des EGO.	44
<b>Abbildung 27.</b> Reflexionsmessungen mit FIGOS über einer Weizenkiste im Gewächshaus in Dürnast.	45
<b>Abbildung 28.</b> PARABOLA.	46
<b>Abbildung 29.</b> Überblick des Messeinsatzes mit der WAAC: [A] Hebebühne mit Drehvorrichtung und WAAC im Messeinsatz. [B] Drehvorrichtung mit WAAC im Einsatz. [C] Prinzipielle Methodik zur BRDF-Messung mit der CCD-Zeilenkamera WAAC zur Aufnahme der von der Oberfläche reflektierten Strahlung.	47
<b>Abbildung 30.</b> MUFSPeM im Einsatz: A. über Messstandort im Winterweizenfeld – Seitenblick. B. über Messstandort im Maisfeld – Rückblick. C. Blick von vorne	50
<b>Abbildung 31.</b> MUFSPeM : Oberes Ende der Schiebeleiter.	51
<b>Abbildung 32.</b> Die Erfassung der Reflexionsverteilung im Laufe des Tages.	52
<b>Abbildung 33.</b> Entwicklungsstadien von Getreide nach der EC-Skala.	53
<b>Abbildung 34.</b> Messzyklus.	55
<b>Abbildung 35.</b> Oberfläche eines Quadratmeters in der Stereoaufnahme.	57
<b>Abbildung 36.</b> Organisation der Daten.	60
<b>Abbildung 37.</b> Relevante Wellenlängen zur Ermittlung des richtungsabhängigen Reflexionsverhaltens und die damit korrelierten Wellenlängen.	66
<b>Abbildung 38.</b> Beispiel der approximierten BRDF bei Entwicklungsstadium EC32, Sonnenzenitwinkel $45^\circ$ am Nachmittag, am Standort hohen Ertrags.	68
<b>Abbildung 39.</b> Beispiel dreidimensionaler verwendeter Plots.	70

- Abbildung 40.** Beispiel für die Änderung des HDRF (hemispherical directional reflection factor), gemessen in der Sonnenhauptebene mit wechselndem Beobachtungszenitwinkel ( $\theta_r^\circ$ ) bei zwei Sonnenständen, bei EC32 in der Vegetationsperiode 2000, am Standort niedrigen Ertrags. 76
- Abbildung 41.** Beispiel für die Auswirkung des Wechsels der Sonnen- und Beobachtungsposition auf die Reflexionsunterschiede zwischen den Standorten hohen (HE) und niedrigen (NE) Ertrags, dargestellt als Differenzbetrag korrespondierender Blickwinkel in der Sonnenhauptebene bei EC32 in der Vegetationsperiode 2000. 78
- Abbildung 42.** Beobachtete Grundformen der Reflexionsverteilung. 80
- Abbildung 43.** Anteil der Fälle, bei denen die bevorzugte Streurichtung der Reflexion die Rückwärtsstreurichtung ist, unter Berücksichtigung aller approximierten BRDFs in  $10^\circ$ -Schritten des Sonnenzenitwinkels über beide untersuchte Vegetationsperioden hinweg. 81
- Abbildung 44.** Mittelwert des ANIF aller approximierten BRDFs in  $10^\circ$ -Schritten des Sonnenzenitwinkels über beide untersuchte Vegetationsperioden hinweg, dargestellt in Abhängigkeit vom Beobachtungszenitwinkel ( $\theta_r^\circ$ ). 82
- Abbildung 45.** Mittelwert der HDRF je nach Sonnenzenitwinkel ( $\theta_e^\circ$ ) unter Berücksichtigung aller approximierten BRDFs in  $10^\circ$ -Schritten des Sonnenzenitwinkels über beide untersuchte Vegetationsperioden hinweg. 84
- Abbildung 46.** Reflexionsverteilung parallel zur Sonnenhauptebene über bearbeitetem nacktem Ackerboden der Versuchsflächen. 85
- Abbildung 47.** Reflexionskurve beim Entwicklungsstadium EC21 in der Vegetationsperiode 2001, Sonnenzenitwinkel  $55^\circ$  und über der Nadir-Beobachtungsposition. 86
- Abbildung 48.** Änderung der Reflexionsintensität in Abhängigkeit von Entwicklungsstadium und Sonnenzenitwinkel in den vier - im Kapitel 4.4.4 ausgewählten - repräsentativen Wellenlängen am Standort hohen Ertrags (HE). 87
- Abbildung 49.** Gegenüberstellung der ANIF-Unterschiede zwischen dem Standort hohen und dem Standort niedrigen Ertrags für die Vegetationsperioden 2000 und 2001. 88

	Seite
<b>Abbildung 50.</b> Verteilung der für die Sonnenhauptebene berechneten ANIF-Unterschiede zwischen den Standorten hohen und niedrigen Ertrags bei Entwicklungsstadium EC71 in der Vegetationsperiode 2001.	89
<b>Abbildung 51.</b> Darstellung der Verteilung maximaler und minimaler ANIF-Unterschiede zwischen den Standorten hohen und niedrigen Ertrags in der Sonnenhauptebene in Abhängigkeit vom Beobachtungszenitwinkel ( $\theta_r^\circ$ ), aufsummiert über beide untersuchte Vegetationsperioden.	90
<b>Abbildung 52.</b> Darstellung der durchschnittlichen für die Sonnenhauptebene berechneten ANIF-Unterschiede zwischen den Standorten hohen und niedrigen Ertrags, dargestellt in Abhängigkeit von Sonnenzenitwinkel und Entwicklungsstadium für die Vegetationsperioden 2000 und 2001.	91
<b>Abbildung 53.</b> Reflexionsverteilung bei EC29 in der Vegetationsperiode 2000 bei klarem Himmel [A] und bei wolkenbedecktem Himmel [B]. In [C] befinden sich die Reflexionsunterschiede in [%] zwischen der Reflexionsverteilung bei wolkenbedecktem Himmel B und klarem Himmel A.	92
<b>Abbildung 54.</b> Simulationserfolg der eingegebenen BRDF-Datensätze unter Berücksichtigung aller approximierter BRDFs beider untersuchter Vegetationsperioden.	96
<b>Abbildung 55.</b> Mittelwert des RMSE-Fehlers zwischen Sonnenzenitwinkeln $35^\circ$ am Vormittag und $35^\circ$ am Nachmittag im Verlauf der untersuchten Vegetationsperioden.	97
<b>Abbildung 56.</b> Simulationserfolg in Abhängigkeit von Wellenlängen und Sonnenzenitwinkel bei der Anpassung des AMBRALS-Modells an die approximierten BRDFs beider untersuchter Vegetationsperioden.	98
<b>Abbildung 57.</b> Leistung des PROSAIL-Modells bei der Abschätzung des Chlorophyllgehalts an den untersuchten Standorten der Vegetationsperiode 2000.	99
<b>Abbildung 58.</b> Leistung des PROSAIL-Modells bei der Abschätzung der äquivalenten Wasserdicke an den untersuchten Standorten der Vegetationsperiode 2000.	100
<b>Abbildung 59.</b> Leistung des PROSAIL-Modells bei der Abschätzung des Gehalts an trockener Biomasse an den untersuchten Standorten der Vegetationsperiode 2000.	101

	Seite
<b>Abbildung 60.</b> Leistung des PROSAIL-Modells bei der Abschätzung des Blattflächenindex an den untersuchten Standorten der Vegetationsperiode 2000.	101
<b>Abbildung 61.</b> Leistung des PROSAIL-Modells bei der Abschätzung des Blattneigungswinkels an den untersuchten Standorten im Vergleich zum Mittelwert der abgeschätzten Werte im Tagesverlauf.	102
<b>Abbildung 62.</b> Aufnahmegeometrie des „Hydro N“-Sensors.	104
<b>Abbildung 63.</b> Auswirkung des Sonnenazimutwinkels auf den Quotienten zwischen NIR und rotem Spektralbereich bei Berücksichtigung unterschiedlicher Anzahl von Aufnahmerichtungen.	105
<b>Abbildung 64.</b> Beispiele von Faktoren, welche die Homogenität eines Vegetationsbestands innerhalb weniger Quadratmeter beeinflussen können.	106
<b>Abbildung 65.</b> Skizze eines künftigen Aufnahmekonzeptes von "Real Time"-Information bei zunehmenden Arbeitsbreiten der Streueinheit.	107
<b>Abbildung 66.</b> [A] Zusammenhang zwischen Chlorophyllindex und der Position des Hauptwendepunkts. [B] Unterschiede bei der Stickstoffaufnahme in Abhängigkeit von Weizensorte und Entwicklungsstadium bei Verschiebung des Hauptwendepunktes um 1nm.	114
<b>Abbildung 67.</b> Typische Reflexionsverteilung im Tagesverlauf in der Sonnenhauptebene bei nacktem Boden, bzw. bei den Entwicklungsstadien EC21 & EC30 des Winterweizenbestandes.	116
<b>Abbildung 68.</b> Typische Reflexionsverteilung des Winterweizenbestandes im Tagesverlauf in der Sonnenhauptebene bei verschiedenen Entwicklungsstadien (EC32, EC39 & EC51).	117
<b>Abbildung 69.</b> Typische Reflexionsverteilung der Winterweizenbestände im Tagesverlauf in der Sonnenhauptebene bei den Entwicklungsstadien EC65, EC71.	118
<b>Abbildung 70.</b> In Abhängigkeit von der Wellenlänge zeigen die optische Dichte ( $\tau$ ) bewässerter Weizenbestände (aus Stark et al., 2000) und der Verlauf der Richtungsabhängigkeit in der ANIF-Darstellung der Winterweizenbestände von Dürnast der Vegetationsperioden 2000 und 2001 sehr ähnliche Charakteristik: Maxima im Bereich der Chlorophyllabsorptionsbande.	119

- Abbildung 71 - 79.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei unterschiedlichen Entwicklungsstadien in beiden Vegetationsperioden. (Beobachtungssazimutebene: parallel zur Sonnenhauptebene). 149-157
- Abbildung 80 - 88.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei unterschiedlichen Entwicklungsstadien in beiden Vegetationsperioden. (Beobachtungssazimutebene: um  $45^\circ$  zur Sonnenhauptebene gedreht). 159-167
- Abbildung 89 - 97.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei unterschiedlichen Entwicklungsstadien in beiden Vegetationsperioden. (Beobachtungssazimutebene: um  $90^\circ$  zur Sonnenhauptebene gedreht) 169-177
- Abbildung 98 - 115.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf an beiden Standorten bei unterschiedlichen Entwicklungsstadien in beiden Vegetationsperioden. (Beobachtungssazimutebene: parallel zur Sonnenhauptebene). 179-196
- Abbildung 116 - 133.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf an beiden Standorten bei unterschiedlichen Entwicklungsstadien in beiden Vegetationsperioden. (Beobachtungssazimutebene: um  $45^\circ$  zur Sonnenhauptebene gedreht). 198-215
- Abbildung 134 - 151.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf an beiden Standorten bei unterschiedlichen Entwicklungsstadien in beiden Vegetationsperioden. (Beobachtungssazimutebene: um  $90^\circ$  zur Sonnenhauptebene gedreht). 217-234

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabellentitel werden gekürzt aufgelistet.

	Seite
<b>Tabelle 1.</b> Liste radiometrischer und photometrischer Formeln.	13
<b>Tabelle 2.</b> Beispiel der Änderungen der Bestandeshauptkomponenten im Blickfeld des Sensors, im Laufe des Tages, bei EC32, in der Vegetationsperiode 2001 (pro m <sup>2</sup> ).	74
<b>Tabelle 3.</b> Die Hauptkomponenten des Bestandes pro Entwicklungsstadium, die an der Zusammensetzung der registrierten Reflexion pro m <sup>2</sup> beteiligt waren.	74
<b>Tabelle 4.</b> Minimale und maximale Spannweiten ( $\Delta$ ) der Unterschiede der Indexwerte im Laufe eines Messtages aufgrund des Wechsels der Sonnen- [A] und der Beobachungsposition [B] unter Berücksichtigung beider untersuchter Standorte.	94

## FORMELVERZEICHNIS

	Seite
<b>Formel 1.a &amp; 1b.</b> Das „Rayleigh“-Kriterium.	11
<b>Formel 2.</b> BRDF.	13
<b>Formel 3.</b> Strahldichte.	13
<b>Formel 4.</b> BRF.	13
<b>Formel 5.</b> Bestrahlungsstärke.	13
<b>Formel 6.</b> Strahlungsfluss.	13
<b>Formel 7.</b> Raumwinkel.	13
<b>Formel 8 - 11.</b> Gleichungssystem der Vier-Fluss-Theorie des SAIL-Modells.	38
<b>Formel 12.</b> Das AMBRALS-Modell.	40
<b>Formel 13.</b> Interpolation von Referenzwerten in einem Messzyklus.	61
<b>Formel 14.a &amp; b.</b> Berechnung des Quotienten / Unterschieds zwischen einem maximalen und einem minimalen Wert.	64
<b>Formel 15.</b> Anisotropie-Quotient ( $AQ_\lambda$ ).	65
<b>Formel 16.</b> „Ähnlichkeits“-Prozentwerte zwischen zwei $AQ_\lambda$ .	65
<b>Formel 17.</b> Anisotropie-Faktor (ANIF).	69
<b>Formel 18.</b> Unterschiede der Reflexionsverteilung ( $UR_\lambda$ ) zwischen den Standorten hohen (HE) und niedrigen (NE) Ertrags.	69
<b>Formel 19.</b> Gleichung von $\chi^2$ .	71
<b>Formel 20.</b> Gleichung von RMSE.	72

## ABKÜRZUNGEN

AMBRALS:	Algorithm for MODIS Bidirectional Reflection Anisotropy of the Land Surface
ANIF:	Anisotropiefaktor
ANIX:	Anisotropieindex
AQ <sub>λ</sub> :	Quotient zwischen dem vorwärts-gerichteten HDRF an einem bestimmten Zenitwinkel (z.B. 0° Azimut- und 30° Zenitwinkel) und dem rückwärts-gerichteten HDRF der entsprechenden gegenüberliegenden Zenitwinkel (z.B. 180° Azimut- und 30° Zenitwinkel)
ASAS:	Advanced Solid-state Array Spectroradiometer
ASCII:	American Standard Code for Information Interchange
ASTER:	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ATM:	Airborne Thematic Mapper
AVHRR:	Advanced Very High Resolution Radiometer
AVIS:	Airborne Visible near Infrared imaging Spectrometer
AVIRIS:	Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer
BE:	Bestandeseinheit
BFI:	Blattflächenindex (LAI – leaf area index)
BRF:	Bidirektionaler Reflexionsfaktor (Bidirectional Reflection Factor)
BRDF:	Reflexionsverteilungsfunktion (Bidirectional Reflection Distribution Function)
CCD:	Charge Coupled Device
CHL:	Chlorophyllgehalt
DAIS:	Digital Airborne Imaging Spectrometer
DFD:	Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum
DFG:	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DLR:	Deutsche Forschungsanstalt für Luft-und Raumfahrt
DWD:	Deutscher Wetterdienst
EC:	Entwicklungsstadien des Weizenbestands nach der Eucarpiaskala
EGO:	European Goniometric Facility
EM:	Elektromagnetisch
EMPRV:	Engelsen-Martonchik-Rahman-Pinty-Verstraete (BRDF-Modell)
ESA:	European Space Agency
ENVI:	Environment for Visualizing Images
EU:	European Union
EUMETSAT:	European organization for the exploitation of meteorological satellites
FAO:	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FIGOS:	Field Goniometer System

GER:	Geophysical Environmental Research
GFZ:	Gemeinsames Forschungszentrum
GIS:	Geo-Informationssysteme
GPS:	Global Positioning System
HDRF:	hemisphärisch-gerichteter Reflexionsfaktor (hemispherical directional reflection factor)
HRSC:	High Resolution Stereo Camera
HyMap:	Airborne Hyperspectral Scanner
HWP:	Wendepunkt im Rot-Infrarot-Anstieg der Signaturkurve der Vegetation (HauptWendePunkt) (auch als REIP bekannt: Red Edge Inflection Point)
IAPI:	Bestandesreflexionsmodell von Iaquina et al. (1994)
IDL:	Interactive Data Language
IKONOS:	the world's first commercial satellite to collect images with one-meter resolution. IKONOS is derived from the Greek word for "image"
IR:	Infraroter Spektralbereich
JRC:	Joint Research Centre
KUUSK:	Bestandesreflexionsmodell von Kuusk (1995)
LAI:	Blattflächenindex
LAD:	Leaf Angle Distribution (Verteilung der Blattneigungswinkel)
LANDSAT TM	Thematic Mapper aboard LANDSAT satellite
LANDSAT-7 ETM+:	Enhanced Thematic Mapper Plus aboard LANDSAT-7
METEOSAT:	earth observation satellite launched by ESA and now operated by EUMETSAT
MISR:	Multi-angle Imaging Spectroradiometer
MODIS:	Moderate resolution Imaging Spectroradiometer
MUFSPERM:	Mobile Unit for Field Spectroradiometric Measurements / Mobile Einheit für spektroradiometrische Messungen im Feld
NADI:	New Advanced Discrete Model
NAG:	Numerical Algorithms Group
NASA:	National Aeronautics and Space Administration
NASA-GSFC:	National Aeronautics and Space Administration - Goddard Space Flight Center
NDVI:	Normalisierter differenzierter Vegetationsindex (Normalised Differentiated Vegetation Index)
NIR:	Near infrared (Spektralbereich des Nahen Infrarots)
NOAA:	National Oceanic and Atmospheric Administration
PARABOLA:	Portable Apparatus for Rapid Acquisition of Bidirectional Observations of Land and Atmosphere
PROSAIL:	Kombiniertes PROSPECT und SAIL Reflexionsmodell
PROSPECT:	Model of Leaf Optical Properties Spectra
R <sup>2</sup> :	Korrelationskoeffizient

RADAR:	RAdio Detection And Ranging
RMSE:	least root mean squared error
RSL:	Remote Sensing Laboratories der Universität Zürich
SAIL:	Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves
SAS:	Statistical Analysis System (SAS Institute Inc.)
SPAD:	Soil-Plant Analysis Development Section (Minolta Camera Co.)
SPOT:	Satellite d'Observation de la Terre
SPSS:	Statistical Package for Social Sciences (SPSS Inc.)
Standort HE:	Standort eines zu erwartenden hohen Ertrags
Standort NE:	Standort eines zu erwartenden niedrigen Ertrags
SWIR:	Shortwave infrared (Spektralbereich des Kurzwelligen Infrarots)
THETA_S:	Zenitwinkel der Sonneneinstrahlung
THETA_O:	Zenitwinkel der zur Beobachtungsposition reflektierten Strahlung
VIS:	Visible (Spektralbereich des Sichtbaren)
WAAC:	Wide Angle Airborne Camera

# 1 ARBEITSUMFELD UND ZIELSETZUNG

Die FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) stellt fest, dass Wasserqualität und Wasserversorgung noch vor der Nahrungsmittelknappheit zwei der gravierendsten Probleme in diesem Jahrhundert sein werden (FAO, 2002a, b & c).

Neben anderen Verursachern wurde die herkömmliche Landwirtschaft als eine der Quellen einer allgemeinen Oberflächen- und Grundwasserverunreinigung identifiziert. Herkömmliche Landwirtschaft in Europa versucht, durch hohe, einheitliche Stickstoffdüngung ein maximales Produktionsergebnis zu erzielen. Unsere Wasserressourcen werden dabei durch den übermäßigen Gebrauch von Düngemitteln, die nicht aufgenommen werden können, gefährdet. Ein weiterer Begrenzungsfaktor für den Gebrauch unserer Wasserressourcen kann auch die Wasserversorgung sein, die zuerst von der Fähigkeit des Bodens, Wasser gegen die Schwerkraft zu halten (nutzbare Feldkapazität), und zweitens von den allgemeinen Witterungsbedingungen der jeweiligen klimatischen Zone abhängt.

Neben den ökologischen Überlegungen drängen auch ökonomische Rahmenbedingungen (EU und Weltmarkt) auf eine sparsame und nachhaltige Bewirtschaftung der verfügbaren Ressourcen. Die Landwirtschaft ist sich der Erfordernisse des Umweltschutzes (Wasserschutz) und der wirtschaftlichen Herausforderung (Kostensenkung) bewusst. Der Lösungsvorschlag lautet: teilflächenspezifisches Management im Feld anzuwenden. Verschiedene Forschungsansätze setzen sich deshalb intensiv mit den Möglichkeiten der Teilschlagbewirtschaftung (englisch „precision agriculture“) auseinander. Der Ansatz und das Ziel des „precision agriculture“-Verfahrens ist, die Düngemittelstreuung und/oder das Bewässerungsmanagement zu optimieren. Die Optimierung hat zum Ziel, dass exakt die Düngemittelmenge, die absorbiert und in Biomasse umgewandelt werden kann, appliziert wird. Im Falle eines Bewässerungsmanagements soll das Ziel sein, nur die wirklich vom Bestand benötigte Wassermenge zu zuführen.

Schlüsselfragen der teilflächenbezogenen Landwirtschaft beziehen sich auf die Verteilung, die Größe und die Ursache der Wachstumsunterschiede innerhalb eines Schlages. Als maßgebliche, das Wuchsverhalten steuernde Variable muss die Bodenheterogenität innerhalb eines Schlages berücksichtigt werden. Die Vielfalt der Bodenstrukturen und -eigenschaften, die in einem Schlag auftreten können, soll unterschiedlich behandelt werden. Dazu zählen Heterogenitäten, die durch Reliefunterschiede (z.B. Standorte mit Wassermangel, -überschuss oder Wassererosion) oder die jeweilige Bewirtschaftung hervorgerufen werden.

Technisch möglich wird die zielgerichtete Auseinandersetzung mit der kleinräumigen Standortvariabilität durch die Einführung georeferenzierter Informationsmanagementsysteme in die Betriebsführung. Letztere beziehen sich auf GPS-gestützte Datenerfassung über Bordcomputer während des Arbeitsvorgangs und werden durch stationäre Auswertungssysteme im Betrieb unterstützt.

Von den derzeit diskutierten Ansätzen werden international zwei favorisiert (Auernhammer et al., 1999) und sind bereits in die Praxis umgesetzt:

- 1) Der „Mapping“-Ansatz, der hauptsächlich auf den Bodenergiebigkeits- und Ertragsdaten früherer Vegetationsperioden beruht, um teilflächenspezifische Applikationskarten zu erstellen, und
- 2) der „Real Time“-Ansatz, der gleichzeitig während der Fahrt die erfasste Reflexion in Form von Vegetationsindizes mit einer Art von "look up"-Tabellen vergleicht, um mit Hilfe von Zusatzindizes (z.B. Chlorophyll- oder Biomassegehalt) den Zustand der Vegetation und damit indirekt die Versorgung mit Wasser oder Nährstoffen zu beschreiben. Der gegenwärtige Bestandesstatus ist Grundlage für die Entscheidung über die Applikation von Düngemitteln oder Wasser.

Beide Ansätze („Mapping“ und „Real Time“) zeigen systemimmanente Schwachstellen und können nicht gleichzeitig beide Herausforderungen - hohe Erträge einerseits und Umweltentlastung durch geringere Düngemittelanwendung andererseits – erfüllen:

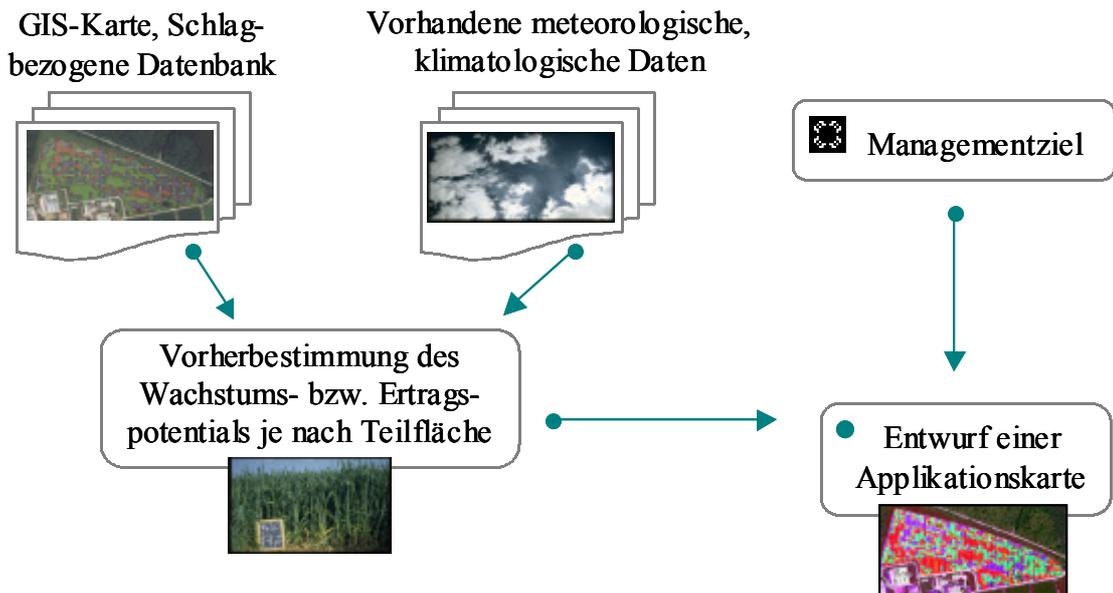
- 1) Die Berufung auf Daten aus der Vergangenheit („Mapping“-Ansatz) nimmt keine Rücksicht auf aktuell auf das Pflanzenwachstum wirkende Einflussfaktoren, wie z.B. Fruchtfolge- und/oder Bearbeitungseffekte sowie die jeweiligen Witterungsbedingungen, die während der Wachstumsperiode herrschen. Aus diesem Grund sind z.B. kurzfristige Entscheidungsänderungen über eine teilflächenspezifischen Verringerung oder Erhöhung der Stickstoffs- oder der Wasserapplikationsmenge überhaupt nicht möglich.
- 2) Die ausschließliche Beurteilung des Bestandeszustands über einen "Real Time"-Sensor führt unweigerlich zu Problemen etwa in Bereichen, in denen das Pflanzenwachstum durch die effektive Feldkapazität (z.B. aufgrund der Bodenheterogenität) eingeschränkt ist. Diese bleibt einfach unberücksichtigt. Das Ergebnis ist eine überflüssige Düngung oder Bewässerung.

Um die Beschränkungen beider Ansätze zu überwinden, sollen neue Strategien entwickelt und geprüft werden. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) hat für diesen Zweck die Forschungsgruppe IKB - Dürnast (Informationssystem Kleinräumige Bestandsführung - Dürnast) finanziert. Ziel ist die Entwicklung eines Systems, in dem beide Teilschlagbewirtschaftungsansätze („Mapping“ und „Real Time“) in einem auf den speziellen europäischen Bedarf angepassten „Real Time with Map Overlay“-Ansatz kombiniert werden. Auf diese Weise kann eine Optimierung des gewünschten ökonomischen und ökologischen Managementziels erreicht und ein hoher Ertrag in Verbindung mit einer umweltfreundlichen Strategie erzielt werden.

## **1.1 DER “REAL TIME WITH MAP OVERLAY”-ANSATZ**

Die Steuerung der Düngemittel- oder Wasserausgabemenge beim „Real Time with Map Overlay“-Ansatz ist in der Abbildung 1 dargestellt und wird folgendermaßen verwirklicht:

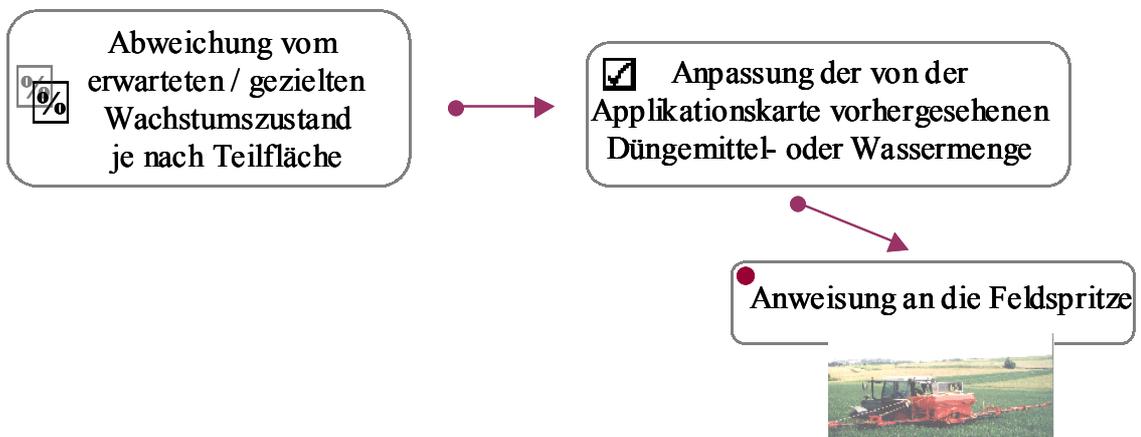
## [A] Entwurf einer Applikationskarte



## [B] Ermittlung des aktuellen Wachstumszustands



## [C] Teilflächenspezifische Bewirtschaftung



**Abbildung 1.** Steuerung der Düngemittel- oder Wasserausgabemenge beim „Real Time with Map Overlay“-Ansatz.

- A) Der „Real Time with Map Overlay“-Ansatz basiert auf
- GIS – Informationsebenen, welche die bisherige Feldverwaltung und den Feldstatus beschreiben (z.B. Boden-, Ertragskarten und Verwaltungseinheiten) und
  - vorhandenen meteorologischen und klimatologischen Daten (Abbildung 1 [A]).
- Anhand der vorgegebenen Schlag- und Witterungsinformationen wird das Wachstums- bzw. Ertragspotential vorherbestimmt. Diese „a priori“-Information wird unter Berücksichtigung des Managementziels verwertet und in Form von Applikationskarten an den Bordcomputer übertragen, welcher die Steuerung der Feldspritze für die vorgesehenen Ausbringungsmengen übernimmt (Abbildung 1 [A]).
- B) Die Ermittlung des aktuellen Wachstumszustands bzw. aktueller Werte der Bestandesmerkmale (z.B: des Blattflächenindex - BFI) findet durch die Anwendung von Reflexionsdaten aus „Real Time“-Sensoren statt (Abbildung 1 [B]):
- Die aktuell erfassten Reflexionsdaten werden mit kulturspezifischen Referenzdaten verglichen, die sich in einer Kalibrierungsdatenbank befinden. Existiert bereits ein angepasstes Reflexionsmodell, so werden die aktuellen Reflexionswerte in das Reflexionsmodell eingegeben.
- C) Für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung wird aufgrund der aktuell gewonnenen Werte der Bestandesmerkmale die Abweichung vom erwarteten bzw. gezielten Wachstumszustand berechnet. Die von der Applikationskarte vorhergesehene Düngemittel- oder Wassermenge wird dementsprechend angepasst und verabreicht (Abbildung 1 [C]).

Der „Real Time with Map Overlay“-Ansatz entspricht den Vorstellungen der ESA (1998) über die Ableitung geo- und bio-physikalischer Informationen aus Fernerkundungsdaten und trägt somit zum Erreichen dieses strategischen Hauptziels der europäischen Erdbeobachtung für das erste Jahrzehnt des neuen Jahrtausends bei (Abbildung 2).

## 1.2 ZIELSETZUNG

Allgemeines Ziel ist es, über die Anwendung von „Real Time“ erfassten Reflexionsdaten die optimale, kleinräumig differenzierte Düngemenge auf der Basis von Boden-, nFk-, Ertrags- und Topographiekarten, Reflexions- und Wachstumsmodellen und Witterungsdaten zu bestimmen. Im Rahmen dieses allgemeinen Zieles beschäftigt sich die im Folgenden vorgestellte Arbeit mit der Methodik der Erfassung und Auswertung der richtungsabhängigen Reflexion landwirtschaftlicher Flächen:

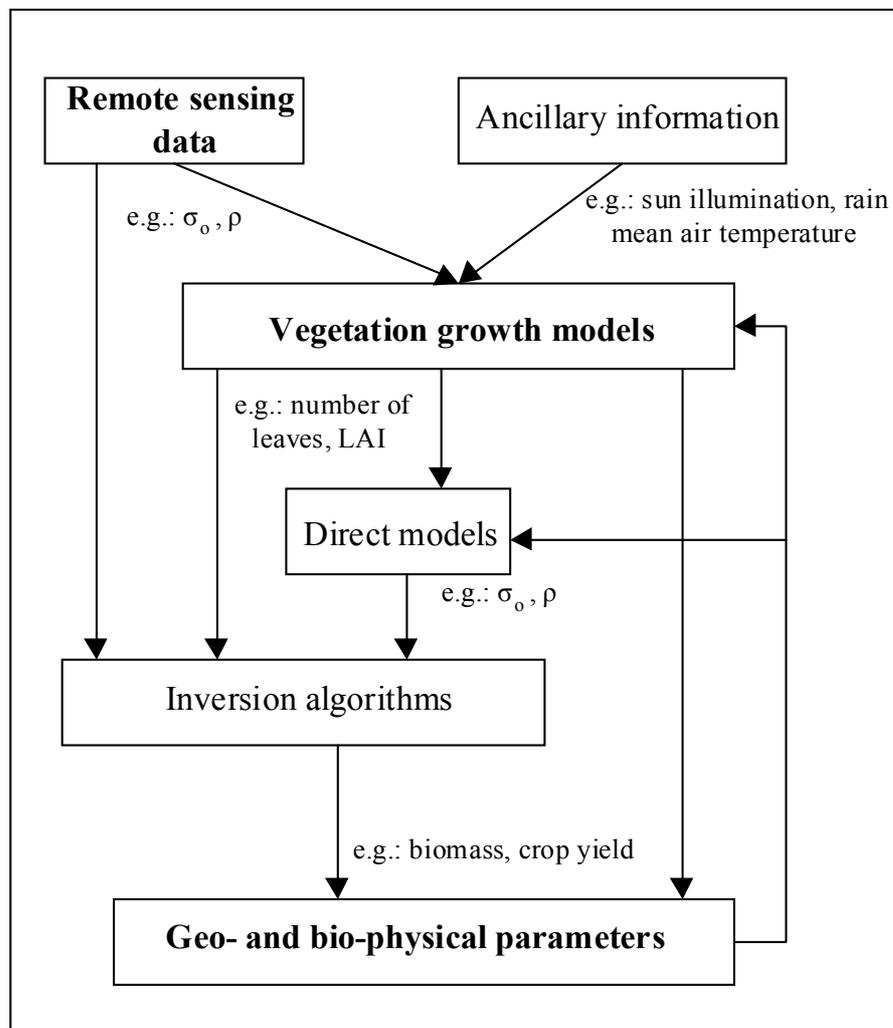
- 1) Messtechnisches Ziel ist dabei die Approximation (Annäherung) der Reflexionsverteilungsfunktion über Messungen zum Tagesgang und über die Vegetationsperiode. Dem liegt die Hypothese zugrunde, dass es Unterschiede in der Reflexionsintensität und -verteilung
  - a) während eines Tagesgangs,
  - b) im Verlauf einer Vegetationsperiode und

c) zwischen Bereichen in einem Schlag, die einen unterschiedlichen Ertrag erzielen bzw. eine unterschiedliche nutzbare Feldkapazität (nFk) aufweisen, gibt.

Das quantitative Ausmaß dieser Unterschiede und die Zusammenhänge der Reflexionsverteilung mit darauf wirkenden Einflussfaktoren, wie z.B. die Beobachtungs- und die Sonnenposition, sind festzustellen.

- 2) Analytisches Ziel ist die vom Reflexionsmodell gestützte Ableitung von Informationen über den Bestandeszustand für die Teilschlagbewirtschaftung („Precision Agriculture“) mit Hilfe von „Off Nadir“-Reflexion. Zur Begründung des Einsatzes des Reflexionsmodells ist die Gültigkeit der Hypothese zu beweisen, dass der einfache Einsatz von herkömmlichen Vegetationsindizes, die mit Hilfe von „Off Nadir“-Reflexionsdaten allein berechnet werden, ohne die Richtungsabhängigkeit der Reflexion zu berücksichtigen, zur Informationsableitung über den Bestandeszustand für „Precision Agriculture“ ungeeignet ist.

Die Ergebnisse sollen für die Kalibrierung der Reflexionsaufnahmen von „Real Time“ oder von flug- oder satellitengestützten Sensoren einsetzbar sein.



**Abbildung 2.** Schematische Darstellung der Informationsgewinnung von Fernerkundungsdaten mit Beispielen von benötigten Parametern/Daten. (aus ESA, 1998).

### 1.3 UNTERSUCHUNGSGEBIET

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Plots des Forschungsgutes "Dürnast" des Wissenschaftszentrums Weihenstephan der Technischen Universität München in Freising. Es wurden insgesamt fünf Plots (zwei mit Winterweizen, zwei mit Wintergerste & einer mit Mais) systematisch und ein weiterer Plot mit Raps sporadisch untersucht.

Diese Arbeit greift die Datensätze der Winterweizenplots heraus und wertet sie exemplarisch aus (Abbildung 3). Sie befinden sich zwischen Länge 11°41'27.3"O und 11°42'49.2"O und Breite 48°24'39.7"N und 48°24'53.4"N oder zwischen Länge 4477000 O und 4478500 O und Breite 5362500 N und 5363500 N im Gauß-Krüger-Koordinatensystem (Abbildung 3). Die untersuchten Standorte wurden an Stellen mit flachem Relief und einer Inklination von weniger als 3% ausgewählt, um den Topographieeinfluss möglichst gering zu halten.

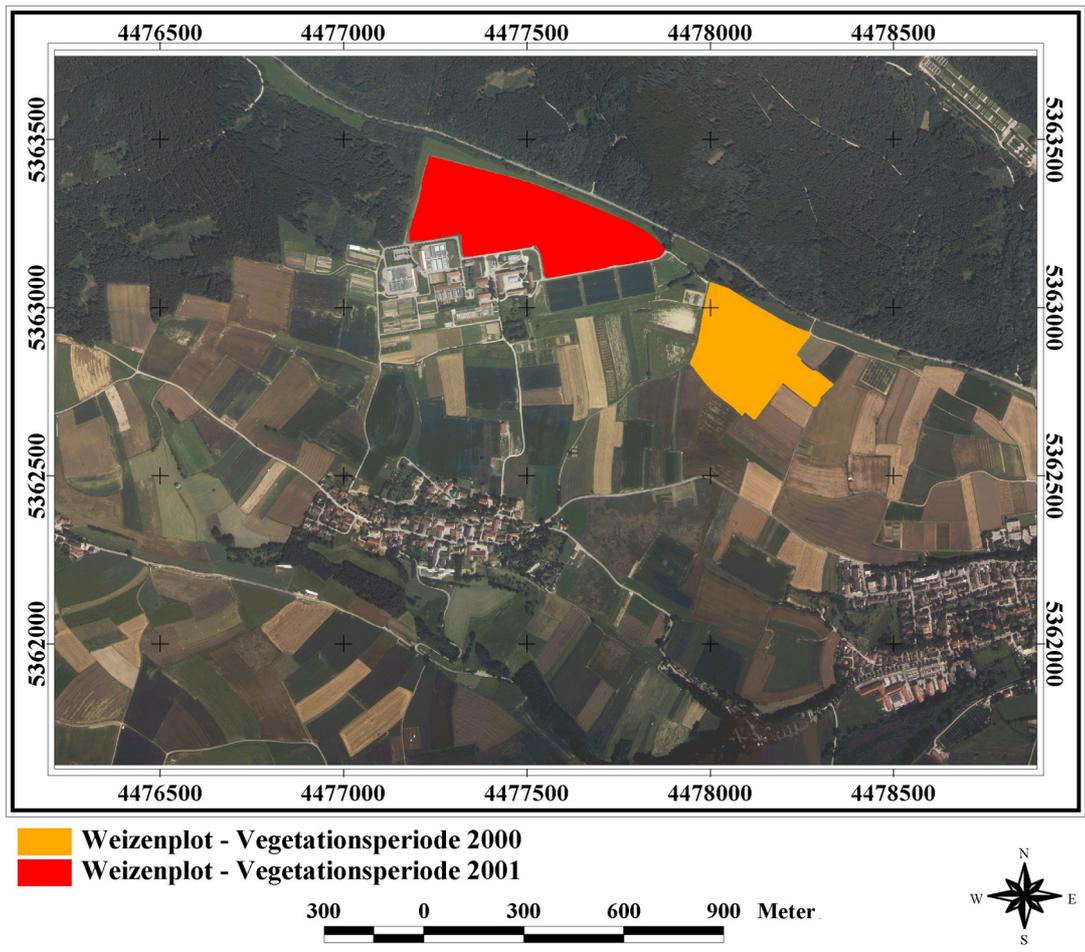
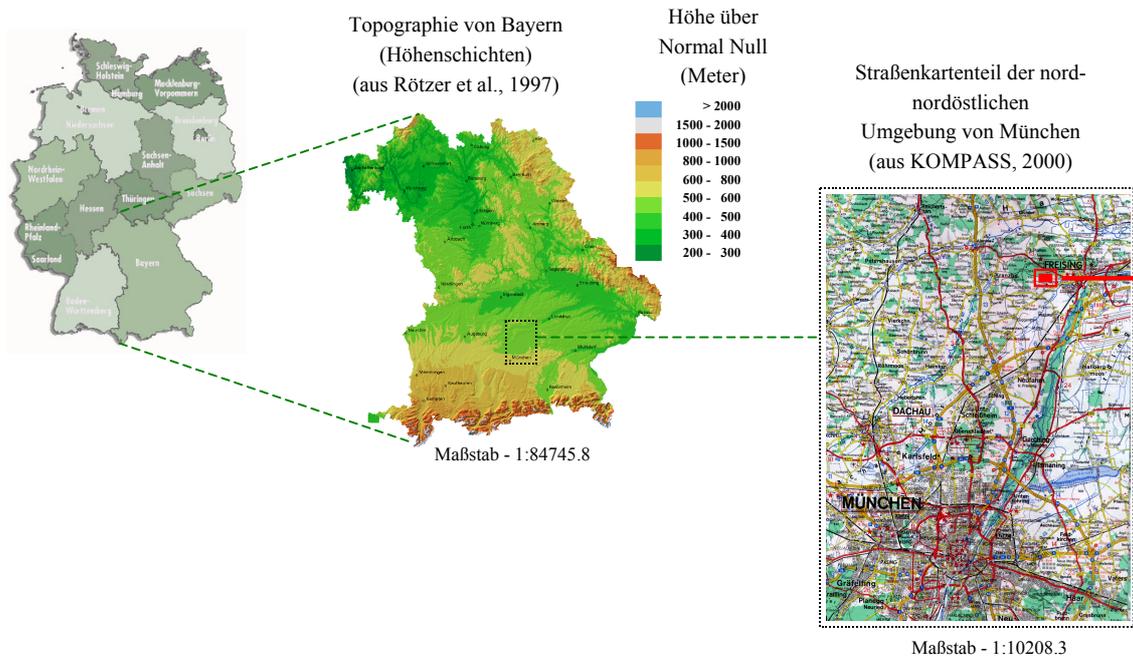
#### 1.3.1 Geologie und Boden

Der Großteil des Untersuchungsgebiets und der näheren Umgebung befindet sich am Südrand des bayerischen tertiären Hügellandes im Übergang zur Münchner Schotterebene (Bayerisches Geologisches Landesamt, 1996). Das Tertiärhügelland ist Teil des Süddeutschen Molassebeckens.

Chronologisch betrachtet (Bayerisches Geologisches Landesamt, 1996),

- wechseln im Miozän die anstehenden fluviatilen und limnischen Sedimente der oberen Süßwassermolasse je nach Fließgeschwindigkeit in ihrer Körnungszusammensetzung von Kiesen über Sande, Schluffe, bis Tonen.
- Gegen Ende des Miozäns erfolgte eine tektonische Hebung und das Gebiet wechselte von einem Ablagerungsgebiet zu einem Abtragungsgebiet.
- Im Pleistozän erfolgten Lößaufwehungen und Solifluktion. In dieser Zeit fand die typische Ausbildung der Hügellandoberfläche statt. Löß wurde aus den Schotterflächen der Münchener Schotterebene und den Schotterflächen der Flüsse (z.B. Donau) ausgeweht. Die Lößauflagen sind eher gering. Unverwitterter, kalkhaltiger Löß ist sehr selten.
- Im Holozän war der wichtigste geomorphologische Prozess hinsichtlich der Landnutzung die Erosion durch das Wasser. Die Lößdecken wurden häufig erodiert. Entlang der Flüsse bzw. der Vorfluter überdeckten Auensedimente die ursprünglichen Anmoor- und Niedermoorböden.

Da im Pleistozän ein großflächiger Abtrag von tertiären und interglazialen Böden stattfand, kann die Dauer des Holozäns als mittlere Bildungszeit der Böden angenommen werden. Als Ausgangsmaterial der Bodenbildung kommen in erster Linie tonige bis kiesige Sedimente der oberen Süßwassermolasse vor. Lößlehm tritt als Bodenbildner selten auf. Die tertiären Feinsande und Schluffe besitzen oft hohe Glimmeranteile. Calciumkarbonat tritt nur



**Abbildung 3.** Lage des Untersuchungsgebiets im Gauss-Krüger-Koordinatensystem, „Transverse Mercator“-Projektion, „Bessel“-Spheroid mit dem 12. Längengrad als Hauptmeridian. Luftbild vom 19.07.1999 mit den zwei untersuchten Weizenplots darauf.

vereinzelt in tertiären Tonen auf. An den steilen Hängen stehen die tertiären Sedimente, die teilweise nur sehr geringe Schichtdicken aufweisen, bis zur Bodenoberfläche an. Daher wechselt die Körnung der Böden an den Hängen sehr stark.

Im Einzelnen können folgende Bodentypen unterschieden werden (Ergebnisse der Bodenkartierung im Rahmen von IKB-Dürnast Projekt, 1999) :

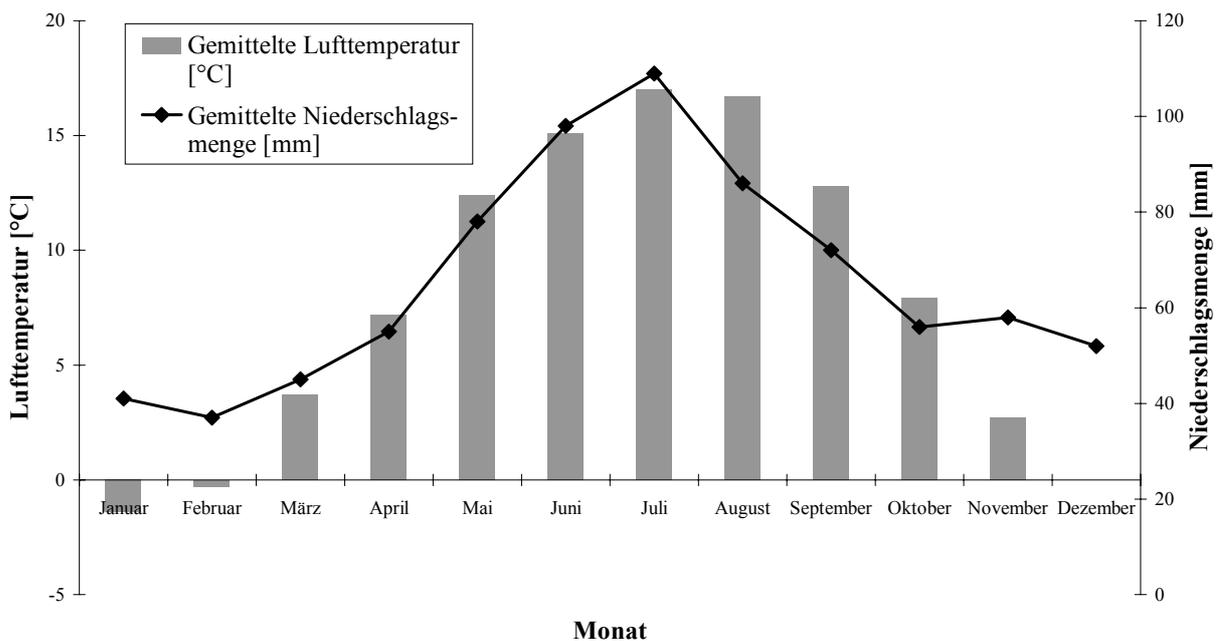
- Braunerden aus den oben aufgeführten Substraten und deren Gemischen,
- pseudovergleyte Braunerden aus verdichteten Lehmen oder aus überdeckten Tonlagen,
- Pseudogley aus verdichteten Lehmen (reine Pseudogleye sind selten),
- Pelosole oder Braunerde-Pelosole aus tertiären Tonen und
- Kolluvien aus tertiären Schluffen (und Lößlehm).

Fast alle Böden zeigen kleinräumige Eisen- und Mangan-Verlagerungen, die durch Hangzugwasser und/oder durch Haftnässe in den schluffigen Böden zu erklären sind. Viele Böden weisen einen ablagerungsbedingten Schichtwechsel (I, II, III) auf.

Hinsichtlich der Bodenproduktivität erzielen die Böden dieser Gegend bei herkömmlicher Bewirtschaftung nach der Reichsbodenschätzung einen Wert von 34 bis 67 auf einer Skala von 0 (für einen unproduktiven Boden) bis 100 (ausgezeichnet produktiver Boden) (Schneider et al., 1999c).

### 1.3.2 Klima

Das Untersuchungsgebiet wird allgemein vom maritim gemäßigten Klima der Westwindzone geprägt. Im Gegensatz zum Klima des nord- und westdeutschen Raumes macht sich aber hier schon eine merkliche Abschwächung des maritimen Charakters bemerkbar (Langholz, 2002).



**Abbildung 4.** Mitteljahrestemperaturen und gemittelte Niederschlagsmengen des Untersuchungsgebiets für die Jahre 1971-2000 (Quelle: DWD in Weihenstephan).

Die Temperaturschwankung im Laufe des Jahres liegt zwischen dem kältesten Monat Januar (Mitteltemperatur: -1,4 Grad) und dem wärmsten Monat Juli (Mitteltemperatur: 17,0 Grad) bei etwa 18,4 Grad (Abbildung 4). Die Lufttemperaturen liegen im Jahresmittel bei 7,8 Grad bei einer Höhe von etwa 470 Metern über dem Meeresspiegel.

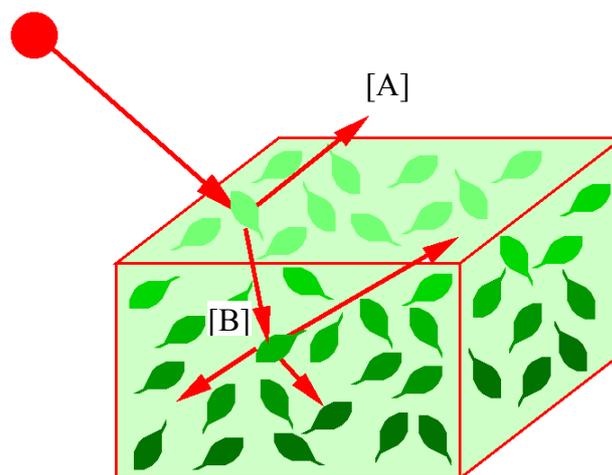
Beim Niederschlag ist mit einer Jahressumme von durchschnittlich 786 Millimetern der Stau effekt der Alpen nur noch schwach ausgeprägt. Im Jahresgang bringt der Juli mit 109 Millimetern in der Regel die höchste Regenmenge, während im Februar und insgesamt im Winter und Spätwinter normalerweise die niedrigsten Mengen registriert werden (Abbildung 4). Die relativ hohen Niederschläge in den Sommermonaten übertreffen in der Regel die Verdunstungssummen, so dass bei den meist wasserspeicherfähigen Böden nur in Ausnahmesituationen akuter Wassermangel auftritt (Langholz, 2002).

## 2 STRAHLUNGSPHYSIKALISCHER HINTERGRUND

Verfahren zur berührungslosen Informationsgewinnung beruhen auf der Wechselwirkung von elektromagnetischen (EM) Wellen und Materie. Wenn die EM-Wellen auf Materie stoßen, werden sie in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Materie mit unterschiedlicher Intensität reflektiert, absorbiert und transmittiert.

Wenn die EM-Wellen an Oberflächen reflektiert werden, dann ändert sich die Ausbreitungsrichtung. Zwei grundsätzliche Prozessgruppen sind bei natürlichen (dreidimensionalen) Körpern (Zielobjekten) festzustellen:

- 1) Die EM-Wellen werden einmal an der Oberfläche des Zielobjektes reflektiert (Oberflächen-Reflexion). Dieser Prozess hängt von der dreidimensionalen Struktur der Oberfläche des Zielobjektes ab und ist mit den Schattenwurfeffekten verbunden, welche die Geometrie des Zielobjektes verursacht (Abbildung 5 [A]).



**Abbildung 5.** Die Reflexion an der Oberfläche [A] und die Volumenreflexion [B] (aus <http://stress.swan.ac.uk/~mbarnsle/research/brdf.htm> {am 06.06.2002})

- 2) Die EM-Wellen werden nach der ersten Reflexion an einer Suboberfläche des dreidimensionalen Zielobjektes mehrfach an Reflexionszentren (Suboberflächen) innerhalb des Objektvolumens gestreut, bevor sie sich vom Zielobjekt entfernen. Dieser Prozess wird als Volumenreflexion bezeichnet (Abbildung 5 [B]).

Sowohl für die oberflächliche Reflexion als auch für die Volumenreflexion hängt die Ausbreitungsrichtung vom Verhältnis zwischen den Unebenheiten (Rauigkeit) der Oberfläche, auf welche die EM-Wellen stoßen, und der einfallenden Wellenlänge ab. Als Maß für das Oberflächenrauigkeit-Wellenlänge-Verhältnis wird das „Rayleigh-Kriterium“ eingesetzt:

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

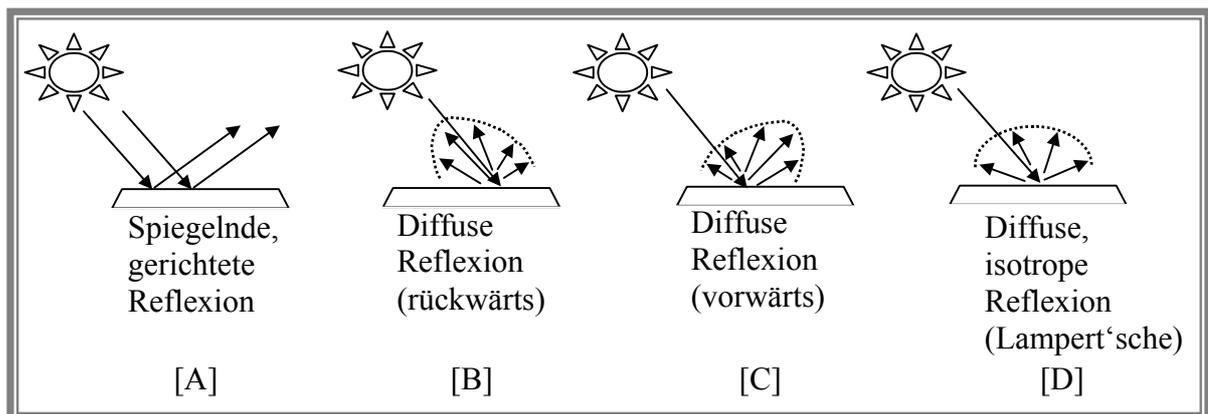
**Formel 1.a**

$$h > \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$$

**Formel 1.b**

(h: Standardabweichung der Oberflächenrauigkeit,  $\lambda$ : Wellenlänge &  $\theta$ : Einfallswinkel der EM-Welle)

Ist eine Oberfläche für eine bestimmte Wellenlänge nahezu "glatt" (Formel 1.a), kommt es zur spiegelnden, gerichteten Reflexion (Abbildung 6 [A]). Wenn der Rauigkeitsgrad einer Oberfläche die Wellenlänge des Lichts übersteigt (Formel 1.b), dann findet diffuse Reflexion statt (Abbildung 6 [B, C, D]). Das heißt, dass die Reflexion in alle Richtungen erfolgt. In der Regel verhält sich die Rückstrahlung natürlicher Oberflächen anisotrop (richtungsabhängig) (Abbildung 6 [B, C]). Das liegt daran, dass durch die größere Rauigkeit unterschiedlich orientierte kleine Flächenelemente existieren. Sie funktionieren als winzige Reflektoren und spiegeln die einfallende Strahlung in verschiedene Raumrichtungen. Im Falle einer in allen Richtungen gleichmäßigen Verteilung der Reflexion spricht man von isotroper Reflexion oder der „Lambert'schen“-Reflexion (Abbildung 6 [D]).



**Abbildung 6.** Reflexionsweise hinsichtlich des Rayleigh-Kriteriums : A. spiegelnd, B. diffus & bevorzugt zur Sonnenrichtung zurück (rückwärts), C. diffus & bevorzugt von der Sonnenrichtung abweichend (vorwärts), D. diffus & gleichmäßig in alle Himmelsrichtungen (isotrop).

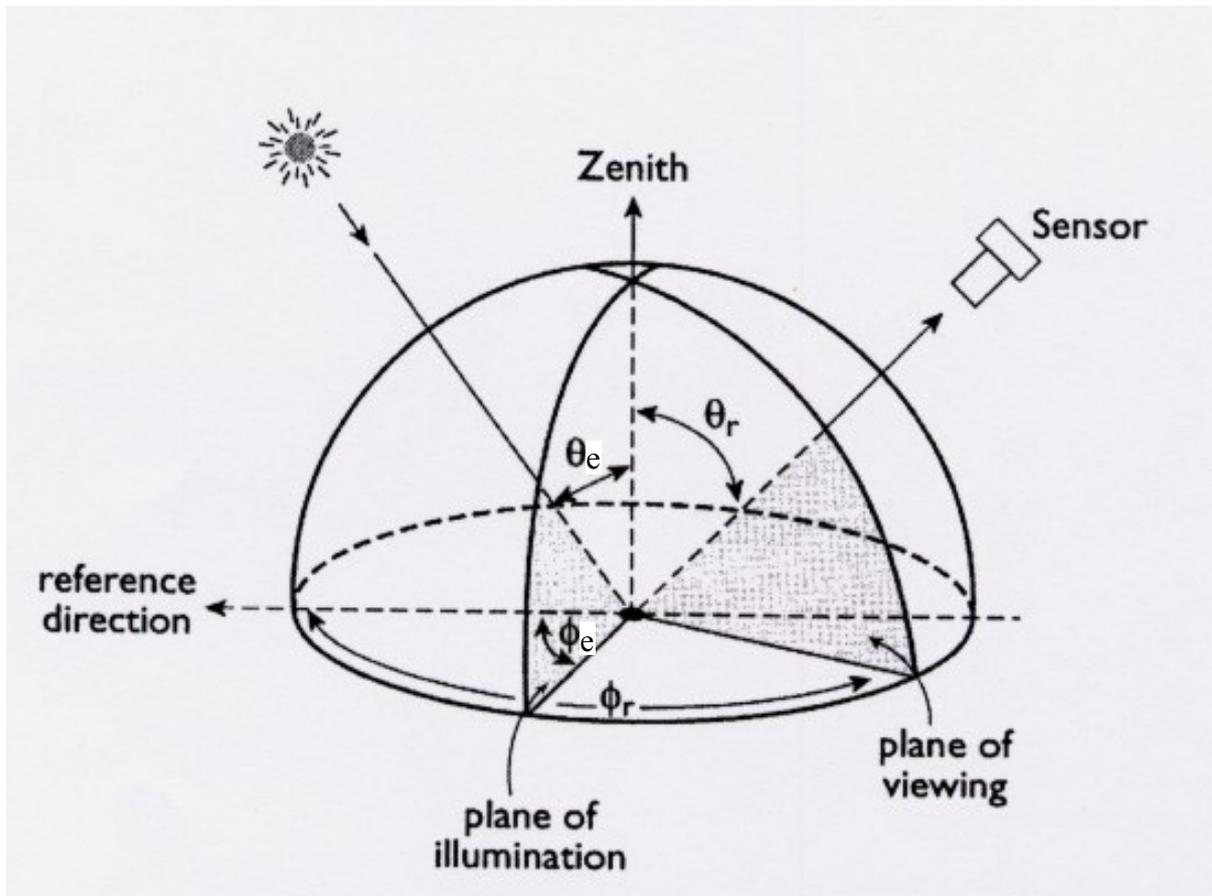
Neben der Rauigkeit der Oberfläche im Verhältnis zur Wellenlänge ist die Ausbreitungsrichtung der Reflexion abhängig von weiteren Faktoren, wie

- der Sonnenposition (s. Kapitel 2.1),
- der atmosphärischen Zusammensetzung (s. Kapitel 2.2.1),
- der Topographie (s. Kapitel 2.2.2) und
- dem strukturellen Aufbau des Zielobjekts (s. Kapitel 2.3.2, 2.3.2.2 & 2.3.3)

Der letzte Faktor ist wiederum bedingt durch die chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften des Zielobjekts sowie die Auswirkungen von Stressoren (s. Kapitel 2.3.2.1 & 2.3.2.3).

## 2.1 PHYSIKALISCHE GRÖSSEN DER REFLEXIONSVERTEILUNG IM RAUM

Die von einem Instrument erfasste Reflexion wird von der Richtung der einfallenden Sonnenstrahlung und der Richtung der Beobachtungsposition bestimmt (Abbildung 7). Deswegen wird sie als „bidirektionale“ Reflexion bezeichnet.



**Abbildung 7.** Definition der Winkel für die Beschreibung der bidirektionalen Reflexion (nach Kriebel, 1976 - geringfügig verändert). ( $\theta_e$ : Zenitwinkel der Sonneneinstrahlung,  $\theta_r$ : Zenitwinkel der zur Beobachtungsposition reflektierten Strahlung,  $\phi_e$ : Azimutwinkel der Sonneneinstrahlung,  $\phi_r$ : Azimutwinkel der zur Beobachtungsposition reflektierten Strahlung, Zenith: Zenit, reference direction: Referenzrichtung, plane of illumination: Einstrahlungsebene, plane of viewing: Beobachtungsebene)

Die Verteilung der bidirektionalen Reflexion im Raum wird durch die Reflexionsverteilungsfunktion (Bidirectional Reflection Distribution Function - BRDF) beschrieben. Nach Nicodemus et al. (1977) liefert die BRDF  $\{ f_r(\theta_e, \phi_e; \theta_r, \phi_r) \}$  (Tabelle 1, Formel 2) unter spezifischen Annahmen die geometrischen Reflexionseigenschaften einer reflektierenden Oberfläche. Sie ist nicht nur eine Funktion der Einstrahlungs- und Beobachtungsgeometrie, sondern hängt auch von der Wellenlänge ab (Kriebel, 1996a; Sandmeier, 1998a).

Zur umfassenden Bestimmung der Reflexion von Oberflächen müsste die BRDF gemessen werden. Die BRDF ist jedoch messtechnisch nicht fassbar, da die Strahldichte (L) (Tabelle 1, Formel 3) von infinitesimalen Raumwinkeln nicht messbar ist (Nicodemus et. al., 1977). Bei der praktischen Datenerfassung im Geländeexperiment wird der bidirektionale Reflexionsfaktor (BRF) (Tabelle 1, Formel 4) ermittelt. Er gibt die Verteilung der Strahldichte der reflektierten Strahlung ( $L_r$ ) in einem bestimmten Raumsegment mit endlich kleinem Raumwinkel zu der Bestrahlungsstärke (E) (Tabelle 1, Formel 5) aus dem oberen Halbraum an. Durch Erfassung des BRF in ausreichend vielen Raumsegmenten kann die BRDF approximiert werden. Der Erfolg der Approximation hängt ab von der Anzahl und der räumlichen Auflösung der Winkel, anhand derer die BRDF angenähert wird, und vom Raumausschnitt (Kegel), für welche die BRDF berechnet werden soll.

Formel- Nummer im Text	Funktions/ Variablename	Funktion	Einheit
2	BRDF	$f_r(\theta_e, \varphi_e; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_e, \varphi_e; \theta_r, \varphi_r; E_e)}{dE_e(\theta_e, \varphi_e)}$	[sr <sup>-1</sup> ]
3	Strahldichte	$L = d^2\Phi / (dF * \cos\theta * d\omega)$	[W*m <sup>-2</sup> *sr <sup>-1</sup> ]
4	BRF	$\rho_r(\theta_r, \varphi_r) = \frac{\pi * L_r(\theta_r, \varphi_r)}{E_e}$	[ohne Dimension]
5	Bestrahlungs- stärke	$E = d\Phi / dF$	[W/m <sup>2</sup> ]
6	Strahlungs- fluss	$\Phi = Q / dt$	[W]
7	Raumwinkel	$\omega = \iint \sin\theta * d\theta * d\varphi$	[sr]

$\theta$  und  $\varphi$  sind Polarkoordinaten und deuten zusammen auf eine Richtung hin, e bezieht sich auf die einfallende Strahlung, r bezieht sich auf die reflektierende Strahlung, E ist die Bestrahlungsstärke, L ist die Strahldichte,  $\Phi$  ist der Strahlungsfluss, F ist die Fläche, Q ist die Strahlungsenergie, t ist die Zeit,  $\omega$  ist der Raumwinkel und d deutet auf den Differenzialquotienten jener Variablen hin

**Tabelle 1.** Liste radiometrischer und photometrischer Formeln.

Engelsen et al. (1996) benennen den „in situ“ gemessenen bidirektionalen Reflexionsfaktor als hemisphärisch-gerichteten Reflexionsfaktor (HDRF), da die einfallende Strahlung aus direkter Sonneneinstrahlung und diffusem atmosphärischem (Himmels- oder Luft-) Licht (s. Kapitel 2.2.1) zusammengesetzt ist.

## **2.2 BEEINFLUSSUNG DES EMPFANGENEN SIGNALS DURCH DIE ATMOSPHERE UND DIE TOPOGRAPHIE**

Die Atmosphäre und die topographische Lage des Zielobjekts sind exogene Faktoren, welche die aufgenommene Reflexion beeinflussen. Sie müssen während der Interpretation des empfangenen Signals mit berücksichtigt werden. Ohne die Berücksichtigung von Atmosphäre und topografischer Lage wären die Interpretationsergebnisse wenig glaubwürdig.

### **2.2.1 Atmosphärische Einflüsse**

Beim Durchgang der elektromagnetischen Strahlung durch die Atmosphäre kommt es zu Absorptions- und Streueffekten:

- 1) Bei der Absorption in der Atmosphäre handelt es sich um einen wellenlängenabhängigen Energieverlust unter anderem durch Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Ozon und den Sauerstoff der Atmosphäre (Abbildung 8).
- 2) Die Streuung verursacht eine Zunahme des diffusen Anteils des Lichts. Dies ist der Anteil des Sonnenlichtes, das seine ursprüngliche Laufrichtung durch Streuung an Luftmolekülen und Aerosolen ändert. Streuung tritt umso stärker auf, je kleiner die Wellenlänge ist (Yost et al., 1969).

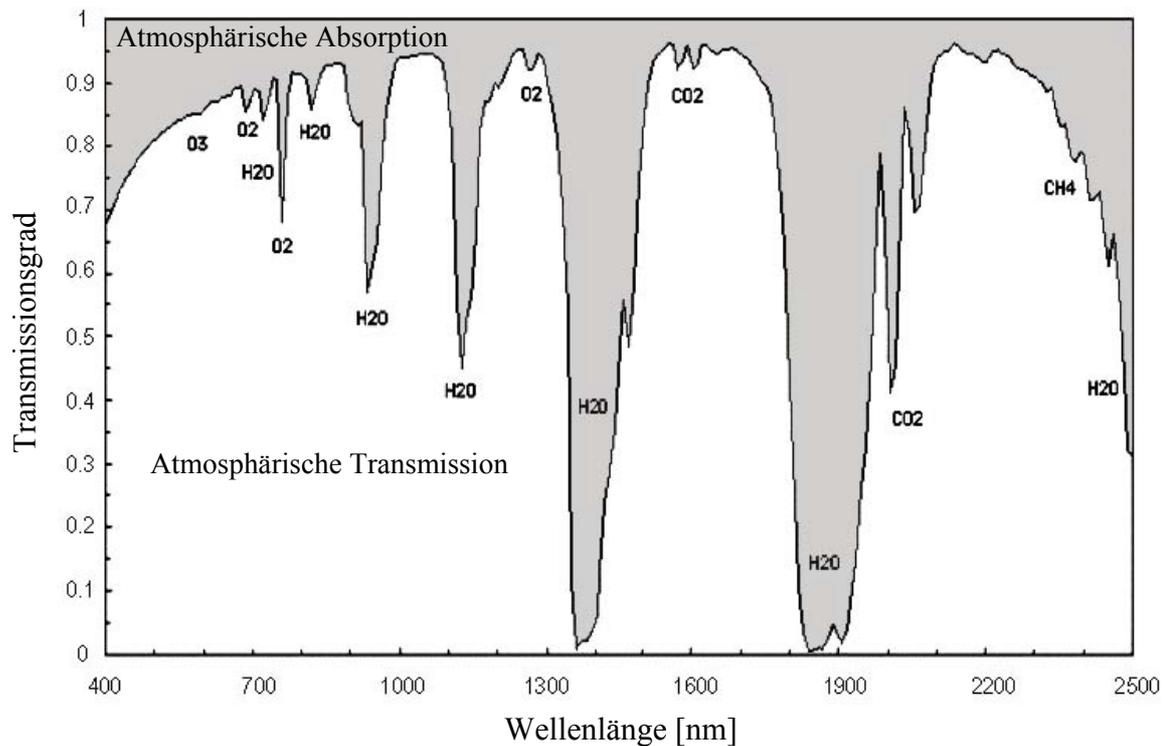
Je nach Größe des Streuverursachers wirken unterschiedliche Streumechanismen:

- a) Treffen Lichtteilchen (Photonen) auf Moleküle, deren Größe weit unterhalb der Wellenlänge des Lichts liegt, kommt es zu so genannter Rayleigh-Streuung (Abbildung 9 [A]). Sie hat jeweils ein Maximum in Mit- und Gegenlichtrichtung.
- b) Wenn das Licht auf Partikel (Aerosole) trifft, deren Größe ungefähr seiner Wellenlänge entsprechen, kommt es zur so genannten Mie-Streuung (Abbildung 9 [B]). Die Größe und Form des Streuteilchens bestimmen die Streurichtungsverteilung. Das Maximum der Mie-Streuung liegt in Mitlicht-Richtung.
- c) Falls das Licht auf Partikel trifft, deren Ausmaß viel größer als seine eigene Wellenlänge ist, tritt nichtselektive (nonselective) Streuung auf.

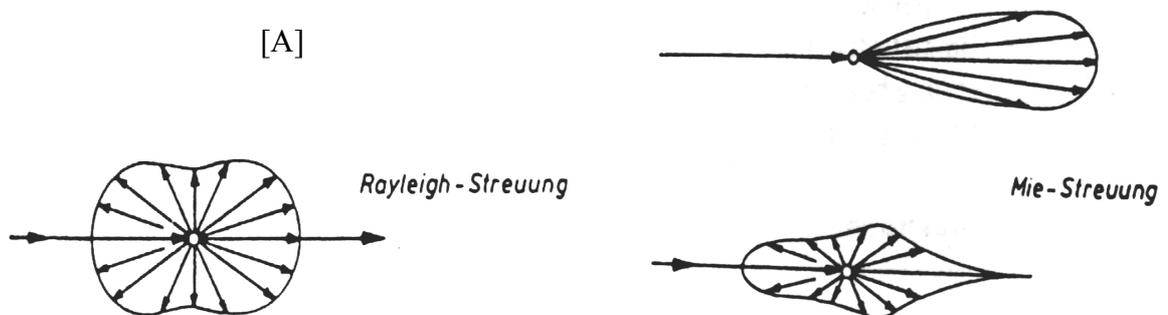
Die beschriebenen Absorptions- und Streueffekte wirken sowohl auf die einfallende als auch auf die reflektierte Strahlung und hängen von der atmosphärischen Dichte und Zusammensetzung ab. Letztere variieren in Abhängigkeit von den aktuellen

Witterungsverhältnissen, den Aerosolen, der Sonneneinstrahlung, dem Sonnenstand und der Wellenlänge.

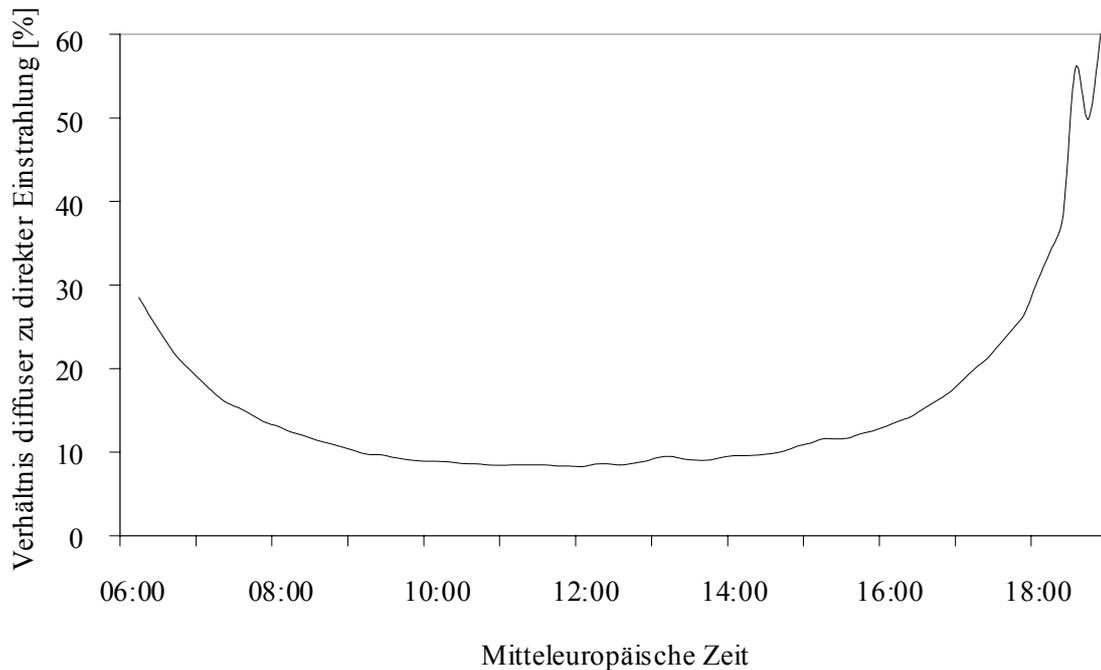
Grundsätzlich gilt: Je größer der Weg des einfallenden und reflektierten Lichts in der interferierten atmosphärischen Schicht wird, desto stärker wird es beeinflusst. Auf diese Weise nimmt zum Beispiel die diffuse Einstrahlung bei niedrigem Sonnenstand (wie z.B. am späten Nachmittag) im Gegensatz zu hohem Sonnenstand (wie z.B. in der Mittagszeit) zu, weil die atmosphärische Schicht, die bei niedriger Sonnenstellung durchquert werden muss, größer ist (Abbildung 10).



**Abbildung 8.** Transmission der EM-Strahlung in der Atmosphäre und wellenlängenabhängige Absorption der EM-Strahlung durch Ozon, Sauerstoff, Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan der Atmosphäre (aus <http://popo.jpl.nasa.gov/html/aviris.spectroscopy.html> {am 05.06.02}, verändert und ergänzt). [B]



**Abbildung 9.** Strahlungsverteilung bei Rayleigh- und Mie-Streuung an Teilchen in der Atmosphäre (aus Kraus et al., 1988).

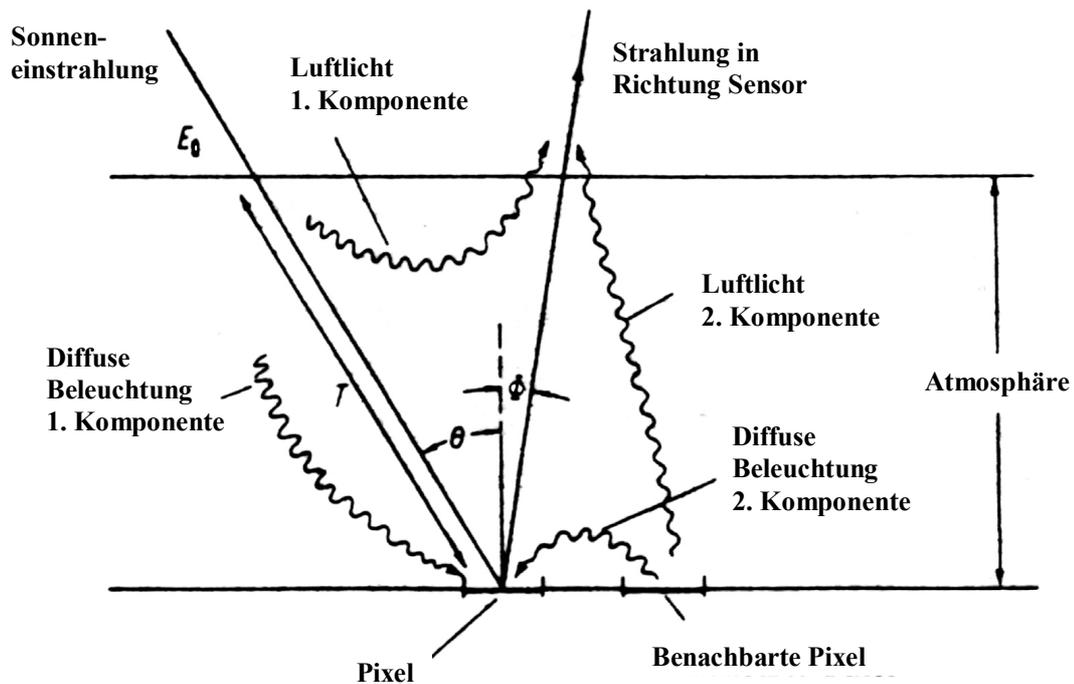


**Abbildung 10.** Beispiel des Verhältnisses diffuser zu direkter Einstrahlung im Tagesverlauf am 15.05.00 (berechnet aus Messdaten der meteorologischen Station des Lehrstuhls für Bioklimatologie und Immissionsforschung in Weihenstephan).

Die Streumechanismen in der Atmosphäre wirken sich stärker auf die Interpretierbarkeit und Vergleichbarkeit des aufgenommenen Signals im Sinne der Richtungsabhängigkeit aus als die Absorption. Je größer das Verhältnis der diffusen zur direkten aufgenommenen Strahlung ist, desto stärker wird die ursprünglich vom Zielobjekt erzeugte Reflexionsverteilung beeinträchtigt. Hermann (1989) beschreibt folgende Streuvorgänge, welche die bidirektionale Reflexion des Zielobjektes beeinflussen:

- Streustrahlung, die von der Atmosphäre selbst stammt. Sie entsteht durch ein- oder mehrmalige Streuung des Lichts in der Atmosphäre und erhöht die am Sensor gemessene (Abbildung 11: Luftlicht 1. Komponente) und die auf das Zielobjekt einfallende (Abbildung 11: diffuse Beleuchtung 1. Komponente) spektrale Strahldichte.
- Streustrahlung, die an einem benachbarten Oberflächenobjekt reflektiert wurde. Sie gelangt durch Ablenkung in den Lichtweg des untersuchten Objekts (Abbildung 11: Luftlicht 2. Komponente) und auf das Zielobjekt selbst (Abbildung 11: Diffuse Beleuchtung 2. Komponente).

Dieser Anteil der Streustrahlung wird als Nachbarschaftseffekt bezeichnet. Seine Intensität hängt vom Kontrast und spektralen Verhalten des untersuchten Objekts versus dem seines Nachbarn ab. Als Ergebnis ist eine Erhöhung oder Abschwächung der am Sensor gemessenen spektralen Strahldichte zu erwarten, wenn das Nachbar-Objekt entsprechend heller oder dunkler als das Zielobjekt ist (Pearce, 1977; Dave, 1980).



**Abbildung 11.** Streumechanismen in der Atmosphäre (aus Hermann, 1989). ( $E_0$ : Sonneneinstrahlung,  $T$ : Transmission in der Atmosphäre,  $\theta$ : Einfallswinkel &  $\phi$ : Reflexionswinkel).

### 2.2.2 Topographische Einflüsse

Der topographische Einfluss auf das empfangene Signal hängt von folgenden Faktoren ab:

- 1) Der Größe der abgetasteten Fläche im Zusammenhang mit der Rauigkeit des Reliefs. Je größer die Rauigkeit des Reliefs im Verhältnis zur abgetasteten Fläche ist, desto stärker treten Schattenwurfeffekte im Blickfeld auf und wirken sich auf das empfangene Signal aus.
- 2) Nachbarschafts- (s. Kapitel 2.2.1) und Schattenwurfeffekten in Abhängigkeit von der Höhe der Umgebung im Vergleich zur Höhenlage des Zielobjekts. Sie fügen diffuses Licht hinzu oder reduzieren das vom Sensor aufgenommene Licht.
- 3) Der Exposition und Inklination des Messortes im Zusammenhang mit dem Sonnenstand und der Beobachtungsposition.
  - a) Schneider et al. (1992) und Koch et al. (1993) untersuchten die Variationen in der Reflexionsintensität einer einheitlichen Grasoberfläche mit Suboberflächen der Exposition Ost, Nord und West und einer Inklination von  $35^\circ$  -  $40^\circ$  an drei verschiedenen Sonnenständen an einem Tag mit Hilfe von feldspektroradiometrischen Messungen und stellten Unterschiede bis zu 30% bei den Nadirmessungen fest. In obiger Studie erwies sich die Exposition als der einflussstärkere Faktor im Vergleich zur Inklination.
  - b) Je tiefer die Sonne am Horizont steht, desto größer ist der schattenbedingte Unterschied auf die Reflexion geneigter Flächen.

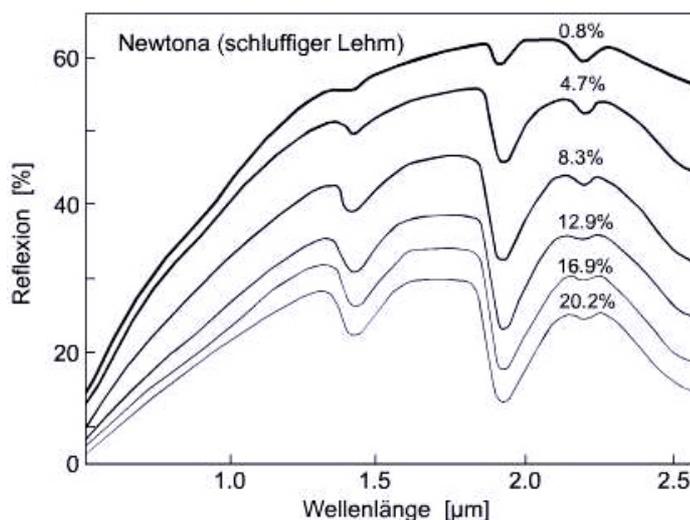
## 2.3 REFLEXION VEGETATIONSBESTANDENER OBERFLÄCHEN

Vegetationsbestände sind komplexe natürliche Körper, die aus mehreren Komponenten (Bodenhintergrund, Blättern und verschiedenen Pflanzenteilen) bestehen. Jede Komponente verfügt über eigene optische Eigenschaften, eigene Position, Ausrichtung und Größe. Allein die Kombination der optischen Eigenschaften reicht aus, um eine hohe Variabilität der Reflexion zu verursachen. Dazu kommt die dreidimensionale Geometrie eines Bestandes, welche neben den Schattenwurfeffekten je nach Beobachtungsposition einen ständigen Wechsel der Anteile jeder Bestandekomponente im Blickfeld des Sensors hervorruft.

### 2.3.1 Reflexion des Bodens

Bei der Auswertung der Reflexion von Vegetationsbeständen ist der Hintergrund, d.h. der Boden, auf dem die Pflanzen wachsen, von großer Bedeutung. Sein Beitrag zum Mischsignal des Vegetationsbestandes ändert sich während der Vegetationsperiode in Abhängigkeit vom Anteil des Bodens im Blickfeld des Sensors und von der jeweils möglichen Eindringtiefe der Sonneneinstrahlung in den Bestand. Diese hängen wiederum mit dem Entwicklungsstadium der Pflanzen, der Sonnen- und der Beobachtungsposition zusammen.

Die Reflexionscharakteristik von Böden zeigt einen regelmäßigen Anstieg in Richtung des NIR-Bereiches und erreicht am Ende des NIR oder im SWIR ihren Höhenpunkt (Abbildung 12). Ab ca.  $2.3\mu\text{m}$  nimmt sie ab. Zwei Absorptionsmaxima sind in der Reflexionskurve um  $1.45\mu\text{m}$  und um  $1.9\mu\text{m}$  zu erkennen. Sie entsprechen dem Einfluss des Wasserdampfes der Atmosphäre (s. Kapitel 2.2.1, Abbildung 8).



**Abbildung 12.** Reflexion von schluffigem Lehm im Zusammenhang mit der Wellenlänge und der Bodenfeuchtigkeit (aus Bowers et al., 1965). (Die Prozentwerte über den Reflexionskurven entsprechen dem Wassergehalt des Bodens im Verhältnis zum Bodengewicht).

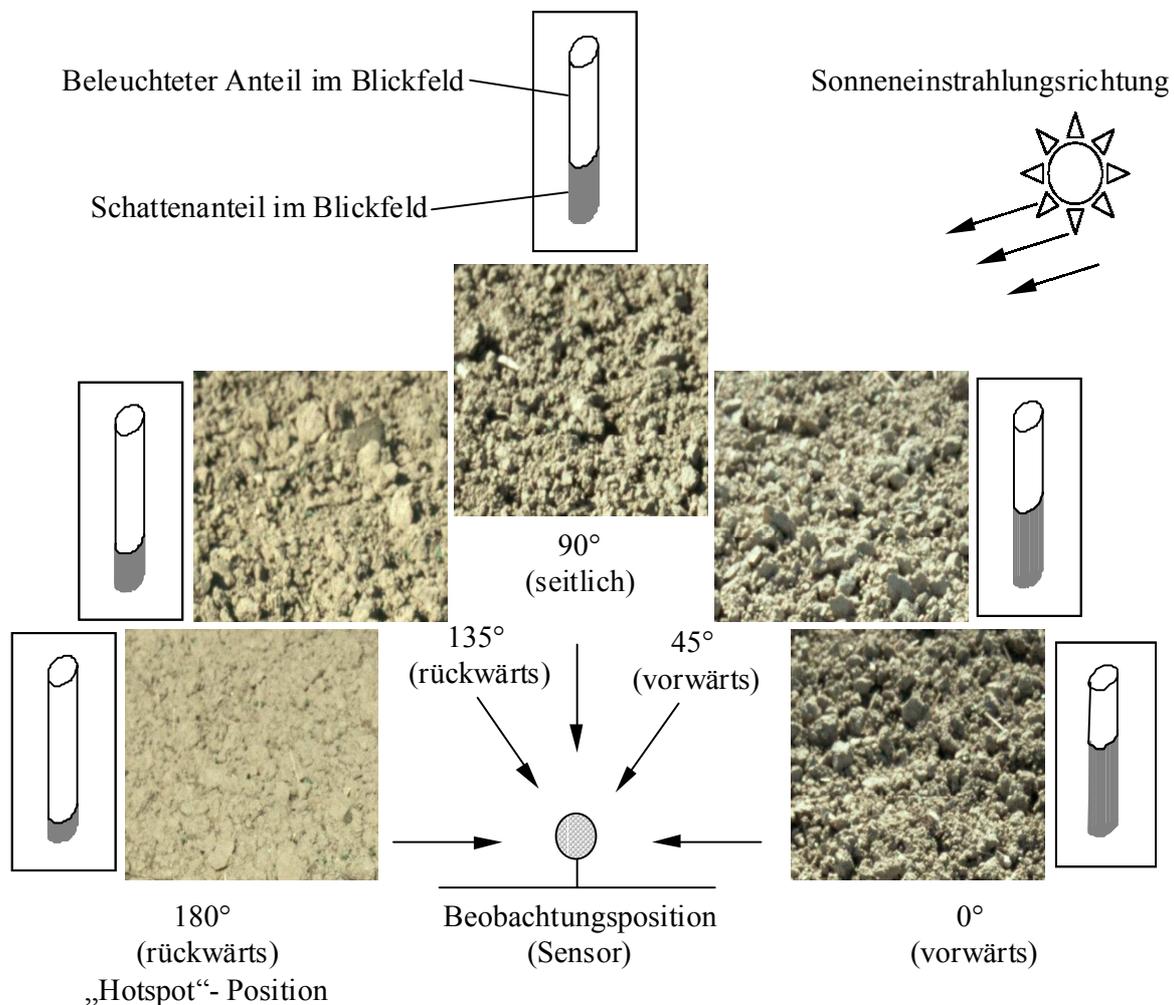
Die empfangene Reflexion wird von folgenden Faktoren beeinflusst:

1) Die Komponenten des Bodens:

- a) Zunehmender Tongehalt oder zunehmende organische Bestandteile sorgen für eine Abnahme der Reflexion (Al-Abbas et al., 1972).
- b) Zunahme der Bodenfeuchtigkeit führt zu einer Reduktion des Bodensignals. Boden wirkt dunkler (Abbildung 12).
- c) Zunehmender Sandgehalt verursacht eine Zunahme der Reflexion (Gerbermann et al., 1979).
- d) Die Art und Quantität von Mineralien beeinflusst die Absorptionsintensität in bestimmten Wellenlängenbereichen. Zum Beispiel sind eisenoxidhaltige Böden durch Absorptionen im blauen und grünen Spektralbereich rötlich gefärbt (Schneider, 1994; Astaras, 1995).

2) Die Bodenrauhigkeit:

Direkt nach dem Pflügen erreicht der Boden seine größte Rauigkeit. Unebenheiten der Bodenoberfläche, die von der Textur oder von Bodenaggregaten gebildet werden,



**Abbildung 13.** Das richtungsabhängige Reflexionsverhalten von gepflügten Böden: Abhängig von der Sonnen- und Beobachtersposition erscheinen beschattete und nicht beschattete Stellen auf der Bodenoberfläche. Die Anzahl der beschatteten Stellen nimmt mit der Abnahme des Beobachtungswinkels von 180° zu 0° ab.

produzieren Schattenbereiche an den Stellen, auf die eine direkte Sonnenstrahlung auftreffen kann. Die Reflexion solcher Schattenbereiche ist in der Regel geringer als diejenige von Bodenoberflächen, die direkt von der Sonneneinstrahlung getroffen werden (Abbildung 13). Mit der Zeit verringert der Regen die Rauigkeit und wäscht Ton- und Humusbestandteile aus. Dadurch erscheinen an der Oberfläche vermehrt Quarzkristalle. Diese Prozesse führen bei Ackerböden zu einer zunehmenden Reflexion (Cierniewski, 1999).

Böden weisen normalerweise ein Reflexionsmaximum in Richtung der Sonneneinstrahlung auf (Beobachtungssazimutwinkel  $180^\circ$  / rückwärts in Abbildung 13). Die Reflexion nimmt mit zunehmendem Abstand von diesem Beobachtungssazimut ab. Sie erreicht ihr Minimum in der Gegenrichtung der Sonneneinstrahlung (Beobachtungssazimutwinkel  $0^\circ$  / vorwärts in Abbildung 13), wenn die Beobachtungsposition nahe dem Horizont liegt (Cierniewski, 1999). Irons et al. (1990) berichten dagegen über Fälle, wo kultivierte, nackte Böden nur eine schwache Tendenz aufweisen, die Reflexion bevorzugt in der Gegenrichtung der Sonneneinstrahlung (vorwärts) zu streuen.

### **2.3.2 Reflexion der Pflanze im Einzelnen**

Die Reflexion der Pflanze ist wellenlängenabhängig. Die Reflexionskurve der Pflanze zeigt im sichtbaren Bereich des Spektrums (VIS: 400 – 700 nm) zwei Absorptionsbänder im blauen und roten Spektralbereich (Abbildung 14). Dagegen erscheint im grünen Bereich eine verhältnismäßig erhöhte Reflexion. Der Reflexionsfaktor erhöht sich von einem Minimum im VIS bzw. roten Spektralbereich zu einem relativ konstanten, hohen Niveau („Rotschulter“) im Nahen Infrarot (NIR: 700 – 1300 nm) (Abbildung 14). Mit der Zunahme der Wellenlängen im kurzwelligen infraroten Bereich (SWIR: 1300-3000 nm) nimmt die Reflexion allmählich wieder ab. Tiefere Absorptionsbänder sind in mehreren Wellenlängenbereichen entlang des NIR- und SWIR-Bereiches zu verzeichnen (Abbildung 14).

Die Form der jeweilig registrierten Reflexionskurve ist abhängig von

- 1) der chemischen Zusammensetzung (wie z.B. Chlorophyll-Konzentration) im Blatt. Sie ist damit auch abhängig vom Wachstumszustand der Pflanze sowie von den photo- und biochemischen Prozessen in der Pflanze.
- 2) dem strukturellen Aufbau der Pflanze. Dieser wiederum ist bestimmt durch den genetisch bedingten Aufbau, die Phänologie und die Zellstruktur der Pflanze.

#### **2.3.2.1 Einfluss der chemischen Zusammensetzung der Pflanze auf ihr Reflexionsverhalten**

Vegetation besteht im wesentlichen aus Wasser, Luft und Kohlenhydraten. Unter pflanzenphysiologischen Aspekten kann man unterscheiden:

- Proteine, welche die Funktionsträger des Stoffwechsels ausmachen,

- Zellulose, die Grundsubstanz der Zellwände,
- Lignin, das die Zellwände stützt,
- Katalysatoren und Enzyme (Pigmente) und
- Spurenelemente.

Pigmente (Chlorophyll a & b, Pheophytin, Karotinoide, usw.), Proteine, Lignin, Zellulose und Wasser zeigen in bestimmten Wellenlängenbereichen charakteristische Absorptions- bzw. Reflexionsmerkmale:

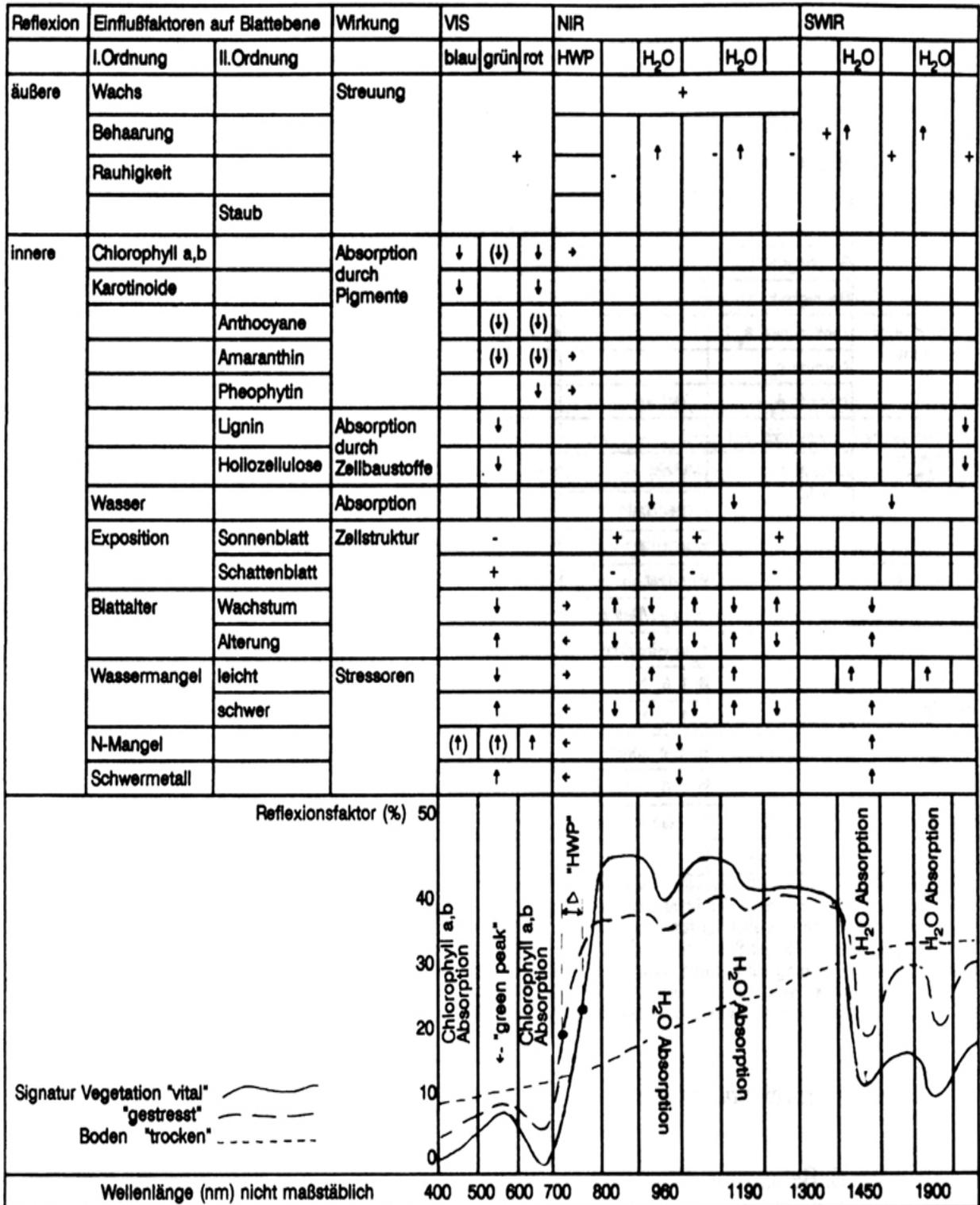
- 1) Die Zusammensetzung und die Konzentration der zur Photosynthese fähigen Pigmente (Chlorophyll a, b und die Karotinoiden) bestimmen nach Tucker et al. (1977) im wesentlichen das Reflexionsverhalten der Vegetation im VIS. Grundsätzlich gilt: Je größer die Konzentration der zur Photosynthese fähigen Pigmente ist, desto geringer ist die Reflexion (Abbildung 14).
- 2) Der Wassergehalt der Blätter hat Auswirkungen auf die Reflexionsintensität in bestimmten Wellenlängenbereichen im NIR und über den gesamten SWIR. Zwischen Wassergehalt im Blatt und Reflexion gibt es eine negative Beziehung: Wenn der Wassergehalt abnimmt, dann nimmt die Reflexion zu (vgl. auch Abbildung 14). Im Vergleich zum NIR wird die Reflexion im SWIR vom Wassergehalt in den Blättern stärker beeinflusst.
- 3) Neben dem Wassergehalt der Blätter beeinflussen Proteine, Lignin und Zellulose die Reflexion im SWIR. Ihre Absorptionsmaxima liegen zwischen 1.9µm und 2.4µm (Baret et al., 1995). Zusätzlich wirken sich Lignin und Zellulose auf die Reflexion im VIS bzw. im grünen Spektralbereich reduzierend aus (Abbildung 14).

### 2.3.2.2 Einfluss der Struktur der Pflanze auf ihr Reflexionsverhalten

Neben den chemischen Baustoffen beeinflusst auch die Struktur der Pflanze ihre Reflexion:

- 1) Makroskopisch betrachtet, lässt sich die Struktur der Pflanze als eine genetisch bedingte dreidimensionale Anordnung der Pflanzenteile beschreiben. Der Aufbau der Pflanze und besonders die Ausrichtung und Form der Blätter sind dafür entscheidend, welche Richtungen bei der Reflexion bevorzugt werden.
- 2) Weitere äußere Pflanzenmerkmale, wie z.B. Behaarung, Wachsschicht, Rauigkeit oder andere Blattoberflächenmerkmale wirken sich zusätzlich auf die Reflexion der Pflanze aus (Abbildung 14) (Schneider, 1994). Ihr Einfluss auf die Reflexion ist aber geringer als die vorhergehend erwähnten Faktoren: chemische Zusammensetzung und Pflanzen- sowie Bestandsaufbau.
- 3) Über die makroskopische Struktur der Pflanzen hinaus beeinflusst die Struktur der Zellwände und Organellen der Pflanze die Reflexion im NIR. Pflanzenzellen verfügen über eine glatte Oberfläche und ihre Dicke entspricht in etwa der Wellenlänge des Lichtes im NIR (ca. 1 µm). Hierbei kommt es verstärkt zur Totalreflexion an den Grenzschichten

der Zellorganellen und der Zellwände. Durch Änderung der Struktur der Zellen ändert sich auch die Reflexion, wie z.B. bei der Auflösung der Zellwände und Zellorganellen.



Zeichenerklärung: VIS = Sichtbarer Wellenlängenbereich, NIR = Nahes Infrarot, SWIR = Kurzweiliger Infrarotbereich, red edge = Wendepunkt der Signaturkurve im Bereich des Rotanstieges, H<sub>2</sub>O meint Wasserabsorptionsbereiche, +/- = additive/subtraktiver Einfluß auf die Reflexion, ↑, ↓, +, - = Wirkungssinn bei zunehmendem Einfluß des Parameters

Abbildung 14. Wirkungsweise ausgewählter Einflussfaktoren auf die Reflexion von Blattorganen (aus Schneider, 1994).

### 2.3.2.3 Die Reflexion der Pflanze als Informationsquelle

Aus der Kenntnis des Reflexionsverhaltens lassen sich Informationen über die bestimmenden chemischen und strukturellen Faktoren gewinnen und darüber hinaus Rückschlüsse auf die zugrunde liegenden Prozesse ziehen. Diese Prozesse betreffen das Wachstum und die Alterung der Pflanzen sowie die auf das Wachstum und die Alterung der Pflanzen wirkenden Schädigungs- oder Nährstoffversorgungsprozesse. Letztere beziehen sich wiederum auf Stressoren, wie Nährstoff-, Sauerstoff- oder Wassermangel, die Anwesenheit von Zellgiften (wie z.B. toxische Mengen von Schwermetallen), Krankheiten oder Umweltverschmutzung (Westman et al., 1987; Schneider, 1994; Astaras, 1995).

So wird zum Beispiel, wie Abbildung 14 erkennen lässt, die Reflexion

- wegen des Wachstums und der Zunahme der Biomasse und der Chlorophyllkonzentration im VIS bzw. roten Bereich geringer.
- im NIR mit dem Alterungsprozess der Pflanze und den entsprechenden Änderungen in der Zellstruktur je nach Wellenlängenbereich geringer oder höher.
- aufgrund von Mangel an Stickstoff im NIR geringer und im VIS und SWIR höher.
- aufgrund von Wassermangel im SWIR höher.

### 2.3.3 Auswirkung der dreidimensionalen Geometrie des Bestandes auf die Reflexion

Die dreidimensionale Geometrie des Vegetationsbestandes

- bestimmt die Eindringtiefe der Sonneneinstrahlung in den Bestand,
- wirkt sich durch die Dichte und Ausrichtung der Reflexionszentren (Suboberflächen) innerhalb des Bestandesvolumens auf den Mehrfachstreuprozess im Bestand aus,
- beeinflusst das Reflexionsverhalten der vegetativen Komponenten je nach Streurichtung unterschiedlich,
- bestimmt die Teilnahme des unterliegenden Bodens am empfangenen Mischsignal entsprechend der Vegetationsentwicklung und dem Vegetationsbedeckungsgrad und
- führt im Zusammenhang mit der geometrischen Struktur der Pflanze je nach Sonnenstand zu unterschiedlich ausgeprägtem Schattenwurf. Schatten tritt verstärkt auf der sonnenabgewandten Seite der Vegetation auf (vgl. auch Abbildung 15 {1}).

Je nach Beobachtungsrichtung wird vom Sensor ein Mischsignal erfasst, in dem die Oberflächen-Reflexion, die Volumenreflexion und der Schatten- bzw. Bodeneinfluss mit jeweils verschiedenem Auswirkungsgrad beteiligt sind. Zum Beispiel

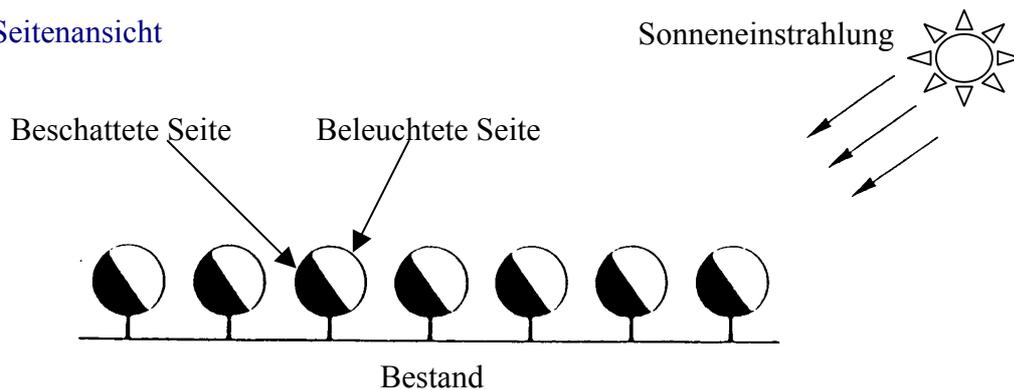
- wird mit steigendem Beobachtungszenitwinkel hauptsächlich die Reflexion der oberen Schichten des Bestands registriert. Auf diese fällt ein größerer Anteil der Sonneneinstrahlung als auf die unteren Schichten. Dazu kommt, dass der Schattenwurf im Bereich der oberen Schichten geringer ist. Als Ergebnis nimmt der Reflexionsfaktor des Vegetationsbestandes dann zu.

- nimmt mit steigendem Beobachtungszenitwinkel der Bodenanteil im Blickfeld des Sensors ab. Im Zusammenhang mit der Wellenlänge ergibt dies eine Zunahme der Reflexion, wenn der Boden dunkler ist als die Vegetation, und eine Abnahme der Reflexion, wenn der Boden heller ist als die Vegetation.

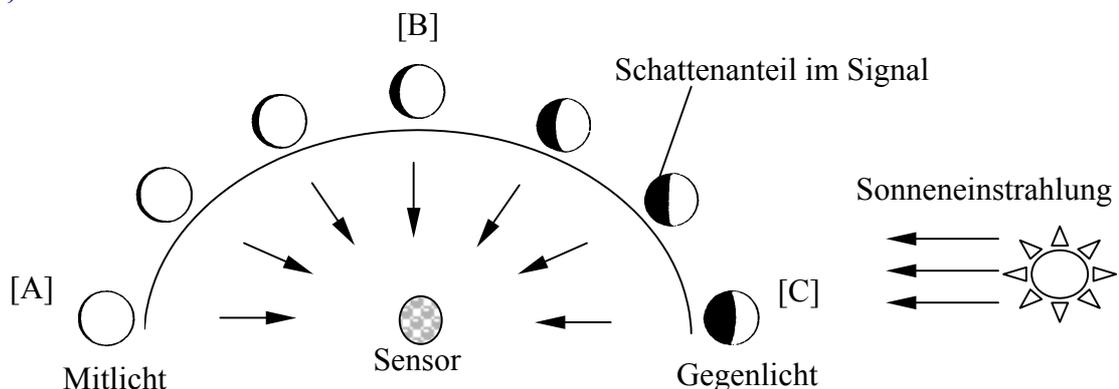
Insgesamt lassen sich drei typische Fälle aufgrund der unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen im Verhältnis zur Sonneneinstrahlungsrichtung beschreiben:

- 1) Die Beobachtungsrichtung stimmt mit der Richtung der Sonneneinstrahlung überein: In diesem Fall ist der beobachtete Schatten- und Bodenanteil minimal und das Objekt erscheint in seiner maximalen Helligkeit (Abbildung 15 {2} [A]). Diese Situation wird als "hotspot"-Effekt bezeichnet (Abbildung 16). Will man ein möglichst unbeeinflusstes Vegetationssignal registrieren, muss man die Reflexion in dieser Richtung aufnehmen. Modellstudien (Kuusk, 1985; Gerstl et al., 1986; Verstraete et al., 1990; Qin et al., 1994) und Feldmessungen (Myneni et al., 1988; Asrar et al., 1989; Deering, 1989) bestätigen, dass aus der Reflexionskurve bei der „hotspot“-Position Informationen über den dreidimensionalen Aufbau der Vegetation abgeleitet werden können und dass die Breite und die Größe des "hotspot"-Effekts von der Blattgröße und -form abhängig sind.

{1} - Seitenansicht

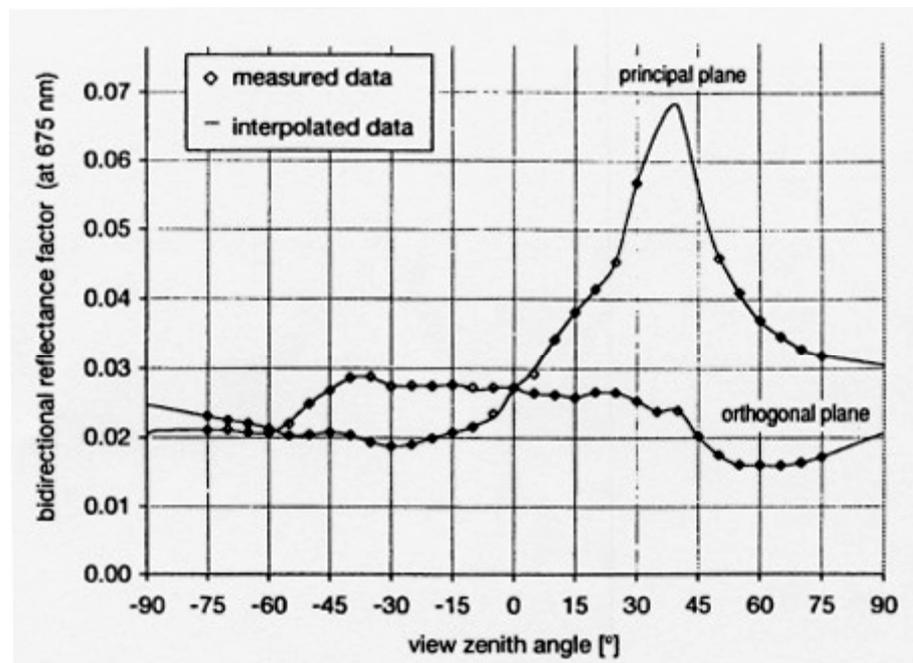


{2} - Aufsicht



**Abbildung 15.** Schattenwurfeffekte im Vegetationsbestand {1} im Zusammenhang mit den Beobachtungspositionen {2} ([A] Richtung Sonne, [B] senkrecht zur Sonne & [C] Gegenrichtung zur Sonne). (Nach Albertz, 1991 – stark verändert).

- 2) Beobachtungsrichtung ist senkrecht zur Oberfläche (Nadir-Position) (Abbildung 15 {2} [B]): An dieser Stelle ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die Reflexion der tieferen Vegetationsschichten und des Bodens miterfasst wird. Dazu wird ein größerer Anteil Schatten als beim vorerwähnten Fall erfasst. Bei dieser Position wirkt bei der Reflexion der Bodenanteil maximal und der Vegetationsanteil minimal.
- 3) Die Beobachtungsrichtung ist der Sonneneinstrahlungsrichtung entgegengesetzt (Abbildung 15 {2} [C]). In diesem Fall ist der beobachtete Schattenanteil maximal, der Boden wird, wie im ersten Fall, kaum erfasst, aber man beobachtet vor allem den unbeleuchteten Teil der Vegetation.



**Abbildung 16.** Reflexionsverteilung parallel zur Sonneneinstrahlungsrichtung (principal plane) und senkrecht zur Sonneneinstrahlungsrichtung (orthogonal plane) über Gras (Sonnensenitwinkel: 35°). Die Spitze der “principal plane”-Kurve stellt die “hotspot”-Position dar. (View zenith angle: Beobachtungszenitwinkel, bidirectional reflectance factor: gerichteter Reflexionsfaktor {BRF}). Negative Werte des Beobachtungszenitwinkels beschreiben Messungen in der sonnenabgewandten Seite (Gegenlicht-Situation). (Aus Sandmeier et al., 1998b).

### **3 FERNERKUNDLICHER HINTERGRUND**

Der Zustand eines Bestands an einem Standort, insbesondere die Unterschiede in der Versorgung mit Düngemitteln und Wasser bzw. abhängig davon die Entwicklung der Pflanze und des Bestandes, sind für den erfahrenen Beobachter visuell gut erkennbar. Das Ziel fernerkundlicher Bemühungen ist, diese Erkenntnis über die Interpretation von Reflexionseigenschaften zu automatisieren und quantitativ fassbar zu machen. Die Methodik dafür verwendet Korrelationen der Reflexion in bestimmten Wellenlängenbereichen mit chemo- bzw. bio-physikalischen Bestandesmerkmalen.

#### **3.1 ZUSAMMENHANG DER AUFGENOMMENEN REFLEXION MIT DEN BESTANDESMERKMALEN**

Nach Price (1990, 1992) lässt sich die gesamte - aus der Reflexion der Vegetation ableitbare - spektrale Information an der Reflexion weniger Wellenlängen (6 bis 25) ablesen. Baret et al. (1995) fügten hinzu, dass zehn Wellenlängenbereiche (jeder kleiner als  $0.02\mu\text{m}$ ) für eine zuverlässige und präzise Bestimmung des Wasser- und trockenen Massegehalts auf Blatt- und Bestandesebene sowie des Blattflächenindex (BFI) reichen. Curran (2001) vertritt die Meinung, dass, wenn es sich um die einfache Klassifikation von Weizenbeständen als Landbedeckungsklasse (Identifikation) oder um die Bestimmung eines Blattflächenindex handelt, vier bis fünf Wellenlängenbereiche im spektralen Bereich von  $0.4\mu\text{m}$  bis  $2.5\mu\text{m}$  ausreichen. Wenn es sich jedoch um die Erfassung des aktuellen Zustandes der Landbedeckungsklasse (z.B. des Weizens) handelt, wird die Information über das Reflexionsverhalten mehrerer enger Wellenlängenbereiche benötigt.

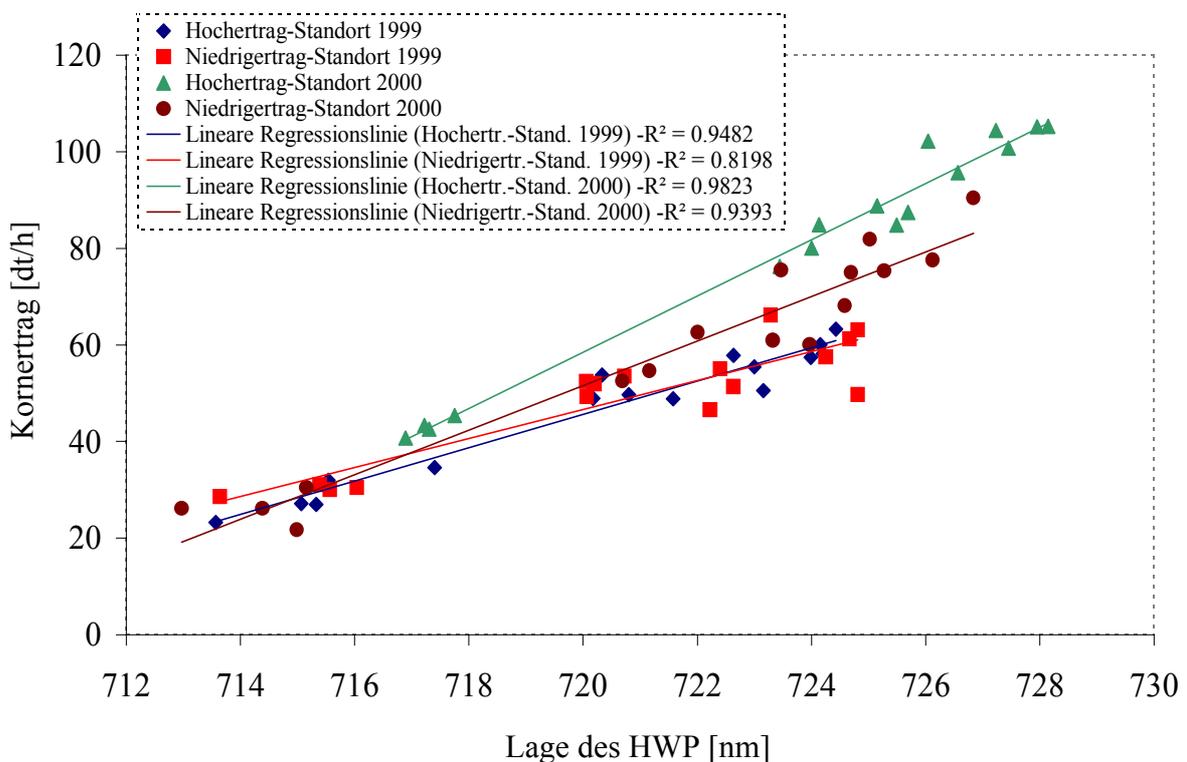
##### **3.1.1 Vegetationsindizes**

Zur Ableitung der Information über den Bestandeszustand wird die Reflexion einzelner Wellenlängenbereiche nicht isoliert betrachtet, da dies selten, wenn überhaupt, erwähnenswerte Ergebnisse bringt. Denn die „in situ“ erfasste Reflexion ist ein Mischsignal. Um die Komponente der Vegetation herauszufiltern, werden algebraische Kombinationen von Wellenlängen verwendet. Sie machen die so genannten Vegetationsindizes aus und produzieren dimensionslose Zahlen. Ein „optimaler“ Vegetationsindex, der alle nicht zur Vegetation gehörenden Einflussfaktoren eliminiert, konnte bis heute nicht entwickelt werden. Die Vegetationsindizes werden meistens entweder mit der Blattfläche pro  $\text{m}^2$  oder dem Anteil der photosynthetisch aktiven Einstrahlung, die vom Bestand absorbiert wird, oder dem

Chlorophyllgehalt korreliert (Baret, 1995). Die Verknüpfung von Vegetationsindex und Bestandesmerkmal erfolgt über die Korrelation mit Messungen des entsprechenden Merkmals nach standardisierten Methoden.

Vegetationsindizes wurden in der Praxis unter anderem eingesetzt:

- zur Determinierung der photosynthetisch aktiven Biomasse durch die Evaluierung der Dichte der Vegetationsdecke (Bannari et al., 1995),
- zur Diskriminierung unterschiedlicher Vegetationsbestände (Schneider, 1994),
- zur Erkennung von Wachstumsunterschieden innerhalb eines Bestandes (Schneider et al., 2000; Manakos et al., 2000) und
- zur teilflächenspezifischen Bestimmung von Ertragsaussichten (Abbildung 17).



**Abbildung 17.** Ertragsaussicht / -abschätzung (Dissertation J. Liebler, in Vorbereitung): Hohe Korrelationswerte zwischen dem Vegetationsindex „HWP“ (berechnet zur Zeit der Blüte – EC 65) und dem Kornertrag (Weizensorte Pegassos).

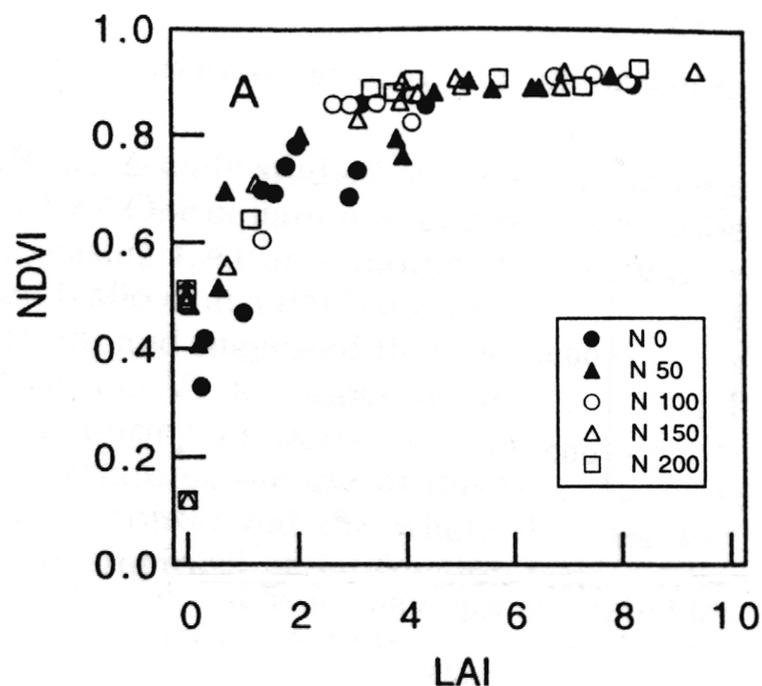
### 3.1.2 Schwachpunkte der verwendeten Korrelationen

Die Aussagefähigkeit über die Bestandesmerkmale mit Hilfe der Vegetationsindizes erreicht in folgenden Situationen ihre Grenzen:

- 1) Einige der am häufigsten verwendeten Vegetationsindizes, wie z.B. der normalisierte differenzierte Vegetationsindex (NDVI) (Rouse et al., 1974) oder einfache Quotienten (wie z.B. Rot/Infrarot), erreichen, sobald der Pflanzenbestand geschlossen ist und mehr als

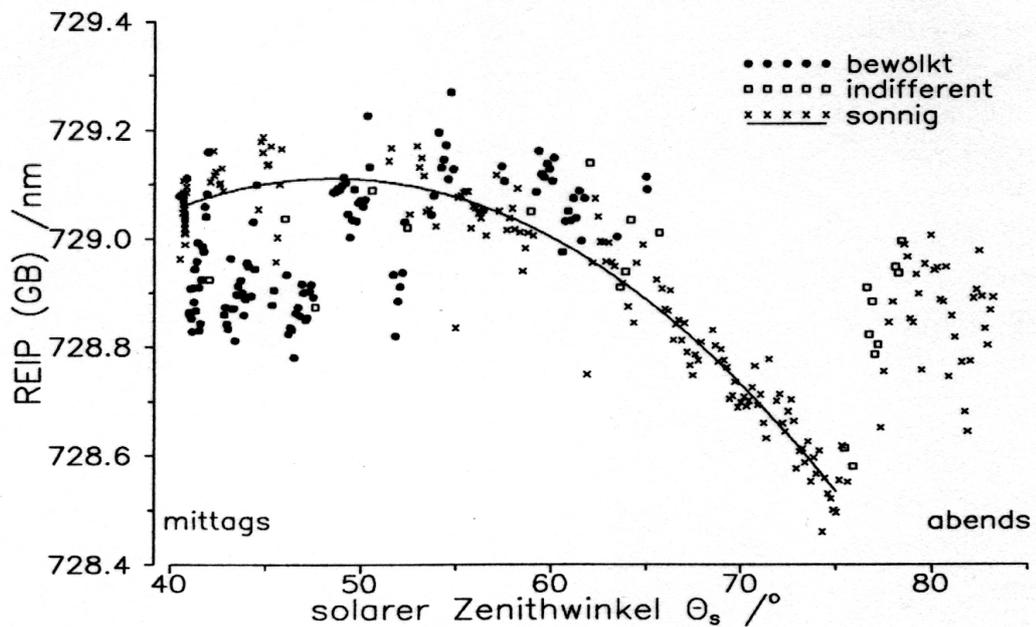
drei bis vier Blattschichten auftreten (BFI 3-4), einen Sättigungspunkt, bei welchem ihre Korrelationsquote mit den Bestandsmerkmalen stark reduziert wird (Choudhury et al., 1994; Serrano et al., 2000) (Abbildung 18). Besonders am Ende des vegetativen Stadiums des Pflanzenwachstums, eine der wichtigsten Perioden für Ertragszunahme durch Düngemittelanwendung, ist dies für die Mehrheit der Getreidearten der Fall.

- 2) Zusätzlich erschweren auch natürliche Prozesse die Interpretation des empfangenen Signals: In der vegetationsorientierten Feldspektroradiometrie ist es eine bekannte Tatsache, dass ein geringfügiger Wassermangel eher zu einer Betonung der Anzeichen eines besseren Zustands in der Reflexionskurve führt, anstatt die Darstellung eines schlechteren Zustands in der Reflexionskurve zu verursachen. Dies hängt mit dem schrumpfenden Blatt und den damit verbundenen Effekten, wie der Konzentration der Pigmente und einer Zunahme des Schattens, zusammen. Es kann sich folglich eine Zunahme der NIR-Reflexion und eine Abnahme der VIS-Reflexion ergeben. Bei den häufig benutzten Vegetationsindizes zeigt dieses Reflexionsverhalten einen besseren Zustand an und führt zu Fehlern in der Stauseinschätzung, besonders am Anfang von Dürrephasen (Schneider, 1994).
- 3) Neben den vom Pflanzenbestand abhängigen (größerer BFI oder Blätterschrumpfen wegen Wassermangel) Parametern wirken sich Parameter auf die Berechnung von Vegetationsindizes aus, die unabhängig vom Bestandeszustand sind. Solche Parameter sind die Sonnen- und die Beobachtungsposition (Abbildung 19), wie u.a. Epiphonio et al. (1995), Qi et al. (1995), Bannari et al. (1995) und Privette et al. (1997) darlegen. Die Auswirkung der Sonnen- und der Beobachtungsposition auf die richtungsabhängige Reflexion variiert nämlich je nach Wellenlängenbereich (Qi et al., 1995; Wu et al., 1995).

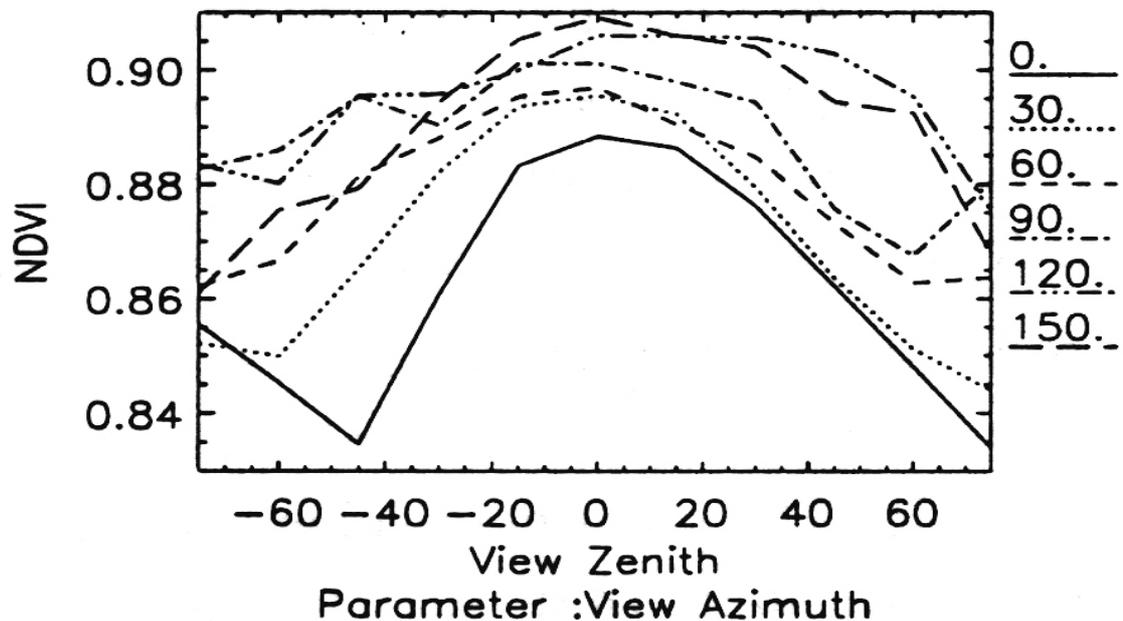


**Abbildung 18.** Korrelation zwischen NDVI und BFI (LAI) für fünf unterschiedliche Düngevarianten (N [dt/h]) bei Winterweizen (aus Serrano et al., 2000). Die Abbildung zeigt, dass die verschiedenen Korrelationskurven ab einem bestimmten Sättigungsgrad nicht mehr differieren.

[A]



[B]



**Abbildung 19.** Beispiele

[A] der Auswirkung der Sonnenposition auf die Berechnung des Vegetationsindex „HWP“ {REIP(GB), GB: nach Guyot et al., 1988} an einem Messtag (aus Reflexionsmessungen über Getreide) (aus Reusch, 1997) und

[B]. der Auswirkung der Beobachtungsposition auf die Berechnung des Vegetationsindex „NDVI“ beim Sonnenzenitwinkel von 54° (aus Reflexionsmessungen über Getreide) (aus Beisl, 2001). {Die Nummern der Legende auf der rechten Seite des Diagramms betreffen den Beobachtungsazimutwinkel (:View Azimuth) / View Zenith: Beobachtungszenitwinkel}.

### **3.1.3 Berücksichtigung der Strukturmerkmale des Bestandes zur Ermittlung seines Zustands**

Neben den chemo-bio-physikalischen Bestandesmerkmalen, die durch die Analyse von über der Nadir-Position erfassten Reflexionsdaten ableitbar sind, erwartet man heutzutage, zusätzliche Information über den Pflanzenbestand via Strukturmerkmale zu gewinnen. Pflanzenaufbau und Bestandesstruktur ändern sich mit der phänologischen Phase und dem physiologischen Zustand. Zum Beispiel ändert sich der Blattneigungswinkel bei Getreide im Laufe des Wachstums- und Alterungsprozesses der Pflanzen. Verschiedene Pflanzenarten ändern wiederum den Blattneigungswinkel und die Blattausrichtung als Reaktion auf ein Wasserdefizit (Verstraete, 1987). Eine typische Reaktion auf die Minderung der Wasserverfügbarkeit bei Dürre ist z.B. für Mais das Einrollen der Blätter und für Zuckerrübe oder Raps das Schrumpfen von Blättern.

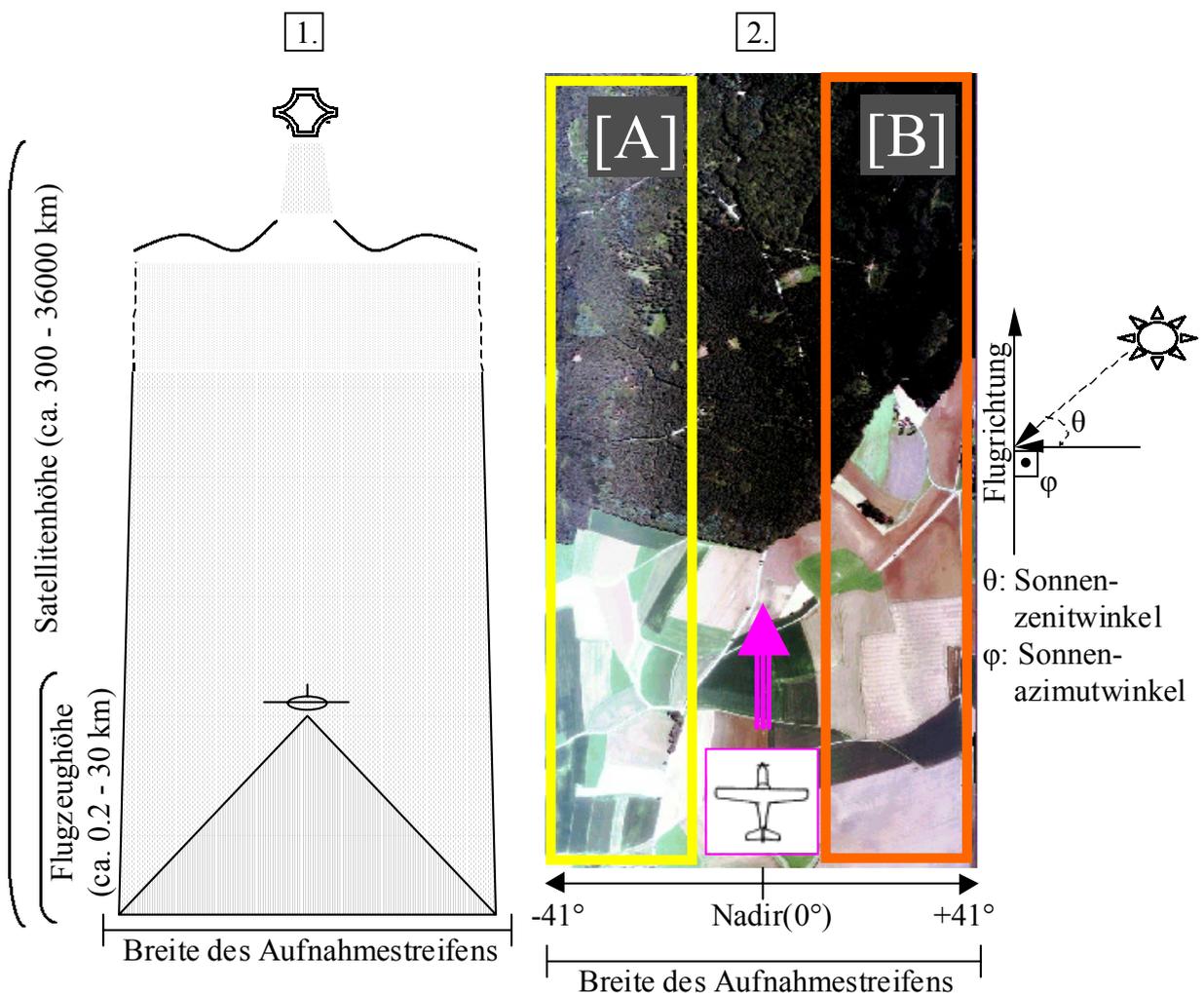
Strukturmerkmale können nicht aus spektralen Reflexionsmessungen abgeleitet werden, die über der Nadir-Position aufgenommen wurden. Eine Möglichkeit, an Informationen über Strukturmerkmale des Pflanzenbestandes zu kommen, ist die Erfassung der richtungsabhängigen („Off-Nadir“-) Reflexion. Der Pflanzenaufbau (die Pflanzenarchitektur) und die Bestandesstruktur bestimmen die richtungsabhängige Reflexionsverteilung (Baret et al., 1997). So ruft zum Beispiel jede Änderung des Blattneigungswinkels oder der Ausrichtung der Blattoberfläche eine Änderung der Reflexionsverteilung hervor. Sandmeier et al. (1999b) berichten zum Beispiel, dass die BRDF des „Prairie“-Grases durch das Einrollen der Blätter während des Wasserstress zur Mittagszeit beeinflusst wird.

## **3.2 DAS „OFF NADIR“-SIGNAL IN DER FERNERKUNDUNG**

Die bisher verfügbaren, räumlich hochauflösenden flugzeug- oder satellitengestützten Sensoren wurden für die Erfassung von Spektralinformationen aus der Nadir-Position gebaut. Abweichungen von dieser Regel sind als Kompromiss zugunsten der Streifenbreite (Flugzeugscanner), der Aufnahmeprioritäten (SPOT, bis zu 27° schwenkbar; IKONOS, bis zu 40° schwenkbar) oder der radiometrischen Auflösung (panchromatische Bänder) zu werten. Das „Off Nadir“ registrierte Fernerkundungssignal blieb dabei ein relativ unerforschtes Feld. Erst die Anforderungen der Klimamodellierer, insbesondere hinsichtlich der Auswertung der sogenannten „Wettersatelliten“-Daten (METEOSAT, v.a. aber NOAA AVHRR), die ja aufgrund ihrer Aufnahmegeometrie große Blickwinkelunterschiede innerhalb einer Szene aufweisen, führten zu weiterführenden Untersuchungen der richtungsabhängigen Reflexionsverteilung.

Das richtungsabhängige Verhalten der Reflexion wurde zunächst nahezu ausschließlich als Störfaktor für die Auswertung von Fernerkundungsdaten angesehen. Es macht den direkten Vergleich zwischen zeitlich und/oder räumlich unterschiedlichen Datensätzen unmöglich (Verstraete et al., 1999). Dies betrifft

- vor allem Aufnahmewinkel, bei welchen die Reflexion weiter von der Nadir-Position entfernt aufgenommen wird (Abbildung 20 {2}), wie z.B. bei abbildenden flugzeuggestützten Spektroradiometern mit einem ungünstigen Höhen-Basis-Verhältnis (Abbildung 20 {1}), und
- Aufnahmen bei unterschiedlichen Sonnenpositionen, wie z.B. bei unterschiedlichen Satellitenlaufbahnen, zu unterschiedlichen Zeiten oder bei unterschiedlichen Breitengraden.



**Abbildung 20.** Das richtungsabhängige Reflexionsverhalten als Störfaktor:

1. Ungünstiges Höhen-Basis-Aufnahmeverhältnis eines Flugzeuges im Vergleich mit dem eines Satelliten (z.B. HyMap mit 3.5/3km gegenüber LANDSAT-7 ETM+ mit 705/185 km).
2. Randaufhellungen bei einem Flugzeug-Aufnahmestreifen. Der Streifenrand ist heller [A] oder dunkler [B] im Vergleich mit der Helligkeit über der Nadir-Position. Beispiele der operationellen Öffnungswinkel von flugzeuggestützten Sensoren: ATM ( $\pm 42.96^\circ$ ), AVIRIS ( $\pm 15^\circ$ ), DAIS ( $\pm 39^\circ$ ), HyMap ( $\pm 30.65^\circ$ ), AVIS ( $\pm 34^\circ$ ).

Verstraete et al. (1999) fassen in ihren Beobachtungen zusammen, dass die spektrale Reflexion

- für einen 50km breiten Abbildungsstreifen, der an der Nadir-Position registriert wurde, bis zu 5% variieren könne,
- sich bis zu 50% unterscheiden könne, wenn sich der Registrierungszenit zwischen 0° und 60° bewegt, und
- bis zu 30% schwanken könne, wenn der Sonnenzenit zwischen 30° und 50° schwankt.

Kimes et al. (1985a) untersuchten die Fehler, wenn aus einer gerichteten Messung auf das in den Halbraum reflektierte Licht geschlossen wird. Zwischen Sonnenzenitwinkeln von 30° und 40° lag der Fehler unterhalb von 20%, sonst betrug er bis zu 45%. Vogt et al. (2000) fügten für den roten Spektralbereich und NIR hinzu, dass in Abhängigkeit vom Sonnenstand und von der Beobachtungsposition dieser einzigen gerichteten Messung der erzeugte Albedo-Fehler zwischen -35% und +55% betragen kann.

Auf der anderen Seite zeigten Untersuchungen auf der Basis von Stereo-Datensätzen, wie z.B. die Untersuchungen mit Hilfe von MOMS-2P Stereo-Datensätzen von Schneider et al. (1999a, b & c), den versteckten Informationsgehalt der richtungsabhängigen Reflexion:

- 1) Identifizierung und Trennbarkeit landwirtschaftlicher Flächen sowie Erkennung von teilflächenspezifischen Unterschieden waren durch die Anwendung von “Off Nadir”-Reflexionsdaten möglich. Die bevorzugte Reflexionsrichtung und ihre Intensität pro Fruchtart kann als ein weiteres, unabhängiges physikalisches Merkmal für die Klassifikation von landwirtschaftlichen Flächen genutzt werden (Abbildung 21).
- 2) Synergieeffekte sind bei ergänzender Auswertung zu hyperspektralen Reflexionsdaten festgestellt worden.

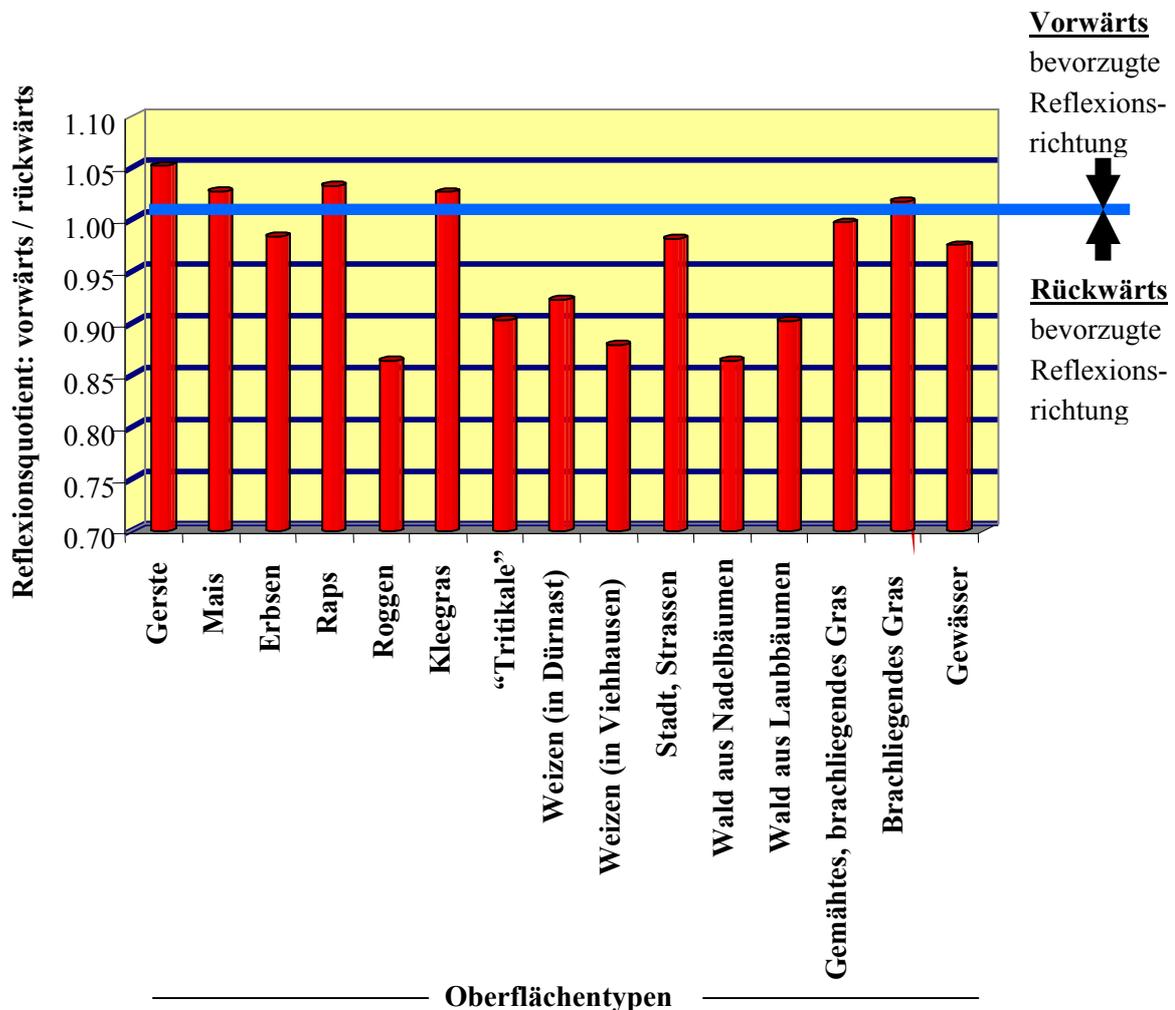
Wenn man sich nicht nur auf die Erfassung der Reflexion aus wenigen “Off Nadir”-Blickwinkeln (wie bei der Stereo-Erfassung der Reflexion) beschränkt, steigt das Anwendungspotenzial der richtungsabhängigen Reflexion:

- 1) Korrektur der richtungsabhängigen Effekte bei
  - a) Zeit-Serien von Reflexionsmessungen, die mit Hilfe von Sensoren mit systembedingt ungünstigem Höhen- zu Aufnahmebreiten-Verhältnis (z.B. mit NOAA-AVHRR) aufgenommen wurden, und der daraus berechneten Vegetationsindizes (Leroy et al., 1994; Wu et al., 1995).
  - b) der Reflexion von Flugzeugscanner-Daten (Beisl, 2001), wie z.B. HyMap-, ATM-, DAIS- oder AVIS-Daten.
- 2) Berechnung der Albedo (Wanner et al., 1997; Cabot et al., 1997; Capderou, 1998).
- 3) Bestimmung des Blattflächenindex und anderer bio-physikalischer Variablen (Privette et al., 1994; Knyazikhin et al., 1998; Bicheron et al., 1999).
- 4) Klassifikation der Landbedeckung (Abuelgasim et al., 1996, Bicheron et al., 1997; Hyman et al., 1997).

5) Berechnung von Umrechnungsfaktoren zwischen Reflexion und Strahlungsfluss für die Studie des Budgets der Strahlung der Erde (Manalo-Smith et al., 1998).

Privette et al. (1997) fassen in ihrem Bericht die resultierenden Feststellungen auf dem „Workshop on Multiangular Remote Sensing for Environmental Applications“ zusammen und betrachten das richtungsabhängige Reflexionsverhalten einerseits als einen Störfaktor für die direkt erfasste Reflexion, andererseits aber als eine Informationsquelle, die unabhängig vom spektralen und spatialen Bereich existiert.

Die Notwendigkeit zur Erkundung des richtungsabhängigen Reflexionsverhaltens für die Korrektur der richtungsabhängigen Reflexionseffekte auf den Aufnahmen im Zusammenhang mit den neu entdeckten Anwendungsmöglichkeiten des „Off Nadir“-Signals führten zur Entwicklung von flugzeuggestützten Systemen, wie u.a. ASAS und HRSC, oder satellitengestützten Systemen, wie u.a. MODIS, MISR und ASTER, die neben der multi- bis hyperspektralen auch multidirektionale Aufnahmefähigkeit besitzen.



**Abbildung 21.** Das richtungsabhängige Reflexionsverhalten als Informationsquelle: Unterschiedliche Oberflächentypen und ihre bevorzugte Reflexionsrichtung als physikalisches Merkmal (aus Schneider et al., 1999c)

### 3.3 SIMULATION DER REFLEXIONSVERTEILUNG VON VEGETATIONSBESTÄNDEN

Im Gegensatz zur Entwicklung der multidirektionalen Aufnahmesysteme ist die Entwicklung von Reflexionsmodellen seit Jahrzehnten im Gange. Das Interesse

- 1) der Biologie, Ökologie und Landwirtschaft an der Wechselwirkung zwischen Sonneneinstrahlung und Vegetation hinsichtlich der Prozesse der Absorption, der Photosynthese und der Produktivität und
  - 2) der Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung an der Simulation der Streuprozesse, die Bestimmung der Reflexion des Pflanzenbestands oder der Albedo der Oberflächen
- förderte und forderte die Entwicklung von Reflexionsmodellen. Nach Ustin (1998) sind unter den Reflexionsmodellen die BRDF-Modelle die am besten entwickelten Werkzeuge, um die Reflexion eines Pflanzenbestandes zu beschreiben.

Nach Kuusk (1999) und Kuusk et al. (2001) erfordert das angestrebte bessere Simulationsresultat die Anwendung von BRDF-Modellen, die eine große Anzahl von physikalischen Eingabevariablen benötigen. Der damit verbundene größere Registrierungs- und Bearbeitungsaufwand verbessert zwar die akkurate Beschreibung der natürlichen Prozesse, verhindert aber einen realistischen Einsatz solcher Modelle in der Praxis, wie z.B. in der Landwirtschaft. Kompromisse müssen geschlossen werden.

Im Hinblick auf die Anwendbarkeit von BRDF-Modellen in der Praxis wird erwartet, dass sie

- aus möglichst einfachen, invertierbaren mathematischen Algorithmen bestehen,
- aus Algorithmen bestehen, die auf physikalische Zusammenhänge basieren,
- nur wenige, einfach registrierbare Eingabevariablen benötigen,
- das Reflexionsverhalten einer größeren Zahl von Oberflächen abbilden können,
- aber auch erhöhte Bedürfnisse einer besseren Anpassung an spezifische Oberflächentypen erfüllen können.

Zur Zeit findet ein langfristig angelegter Vergleich der existierenden Modelle unter dem Namen RAMI (Radiation trAnsfEr Model Intercomparison) statt, um

- die Effektivität und Sensitivität acht existierender Modelle zu überprüfen,
- die Fähigkeit dieser Modelle nachzuweisen, ein ähnliches Strahlungsfeld aus denselben Eingabedaten zu simulieren und
- die Schwachstellen dieser Modelle zu ermitteln (Pinty et al., 2001).

Obwohl es noch vieler Anstrengungen bedarf, um alle relevanten physikalischen Prozesse in ein kohärentes, umfassendes Reflexionsmodell zu integrieren, stellte Verstraete zum Abschluss des IWMMM-2 Workshops fest (Verstraete et al., 2000), dass die Entwicklung der Theorie und die Verfügbarkeit von fortgeschrittenen Modellen keinen begrenzenden Faktor für die Übertragung in die praktische Anwendung mehr darstellt.

### 3.3.1 BRDF-Modelle

BRDF-Modelle lassen sich in physikalische, empirische und semiempirische Modelle einteilen:

1) Physikalische BRDF-Modelle basieren auf einer physikalischen Theorie. Durch Verwendung von Parametern mit physikalischer Bedeutung wird versucht, die Art und Weise zu simulieren, mit welcher der Strahlungstransfer sowohl von der regelmäßigen Anordnung der Pflanzen im Bestand und von der Anordnung der funktionalen Teile der Pflanze (Stamm, Blätter, Blüten), als auch von der chemischen Zusammensetzung der Pflanzenorgane und der Zellenanordnung beeinflusst wird. Die Ansätze und Methoden, auf welchen die Entwicklung von physikalischen Modellen basiert, sind vielfältig. Einen Überblick über die existierenden Modelle bis 1997 verschafft Ustin (1998). Ustin (1998) teilt die physikalischen Modelle in drei Gruppen ein:

- a) Die erste Gruppe beinhaltet alle jene Modelle, die auf der klassischen Theorie des Strahlungstransfers basieren, die anfangs für die Beschreibung der Fortbewegung des Lichts in extraterrestrischer Umwelt entwickelt wurde (Chandrasekhar, 1944, 1960). Beispiele solcher Modelle, die für Vegetationsbestände entwickelt wurden, bieten u.a. Nilson et al. (1989), Pinty et al. (1990), Verstraete et al. (1990), Knyazikhin & Marshak (1991), Kuusk (1991), Privette et al. (1995) und Gobron et al. (1997) an.
- b) Die zweite Gruppe bezieht sich auf BRDF-Modelle, die entwickelt wurden, um die geometrischen / optischen Merkmale der Vegetation einzubeziehen. Sie beschreiben normalerweise die Reflexion der Oberfläche in Abhängigkeit von Dimension, Form, Ausrichtung und gemittelten optischen Eigenschaften der untersuchten Streuvolumen und -oberflächen. Bekannte Modelle dieser Gruppe sind das Model von Suits (1972) und seine Weiterentwicklung, das SAIL-Modell (Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves) von Verhoef (1984) sowie die Modelle von Li et al. (1985, 1986, 1992 & 1995).
- c) Die dritte Gruppe umfasst Modelle, die auf der expliziten Wiederherstellung der Position, der Form, der Ausrichtung und der optischen Eigenschaften aller relevanten Streuelemente innerhalb des Blickfeldes basieren (Ross et al., 1988; Goel et al., 1991a; Govaerts et al., 1994). Dies wird entweder durch
  - die Berechnung der relativen Beiträge jedes Streuelementes zur gemeinsamen Reflexion (Goel et al., 1991b; Borel et al., 1991; Gerstl et al., 1992) oder
  - das Verfolgen einer großen Anzahl individueller Strahlengänge bzw. die Verwendung von Monte-Carlo-Strahlungstransfertechniken realisiert (Govaerts et al., 1996; North, 1996).

Sie nutzen die technologischen Fortschritte in der Computergrafik und in den Visualisierungstechniken. Die Modelle können mit Hilfe von Techniken, die auf künstlicher Intelligenz basieren, weiter entwickelt werden (Kimes et al., 1994). Ihr Anwendungsspektrum umfasst hauptsächlich

- i) die Herstellung hochqualitativer Muster („standards“) zur Kalibrierung einfacherer Modelle (Govaerts et al., 1995) oder spektraler Vegetationsindizes (Goel et al., 1994) und
  - ii) die Unterstützung von Sensitivitätsstudien, um den exakten Einfluss bestimmter Eigenschaften des Pflanzenbestandes auf die totale Reflexion zu bestimmen (Ross et al., 1989).
- 2) Empirische BRDF-Modelle basieren auf der Anpassung mathematischer Funktionen an die allgemeine Form der beobachteten Reflexionsfelder. Sie sind einfach zu berechnen und verwenden keine „a priori“ Annahmen über die Natur des Zielobjektes (Barnsley, 1994). Zusätzlich können sie bei einer Vielfalt von Oberflächentypen angewendet werden. Andererseits können sie nicht benutzt werden, um Verständnis und Kenntnisse über die physikalischen Prozesse zu gewinnen, die das richtungsabhängige Reflexionsverhalten bestimmen.

Im Jahr 1941 wurde der erste derartige Ansatz von Minnaert vorgestellt, um die Schwankung der Reflexion des Mondes zu beschreiben. Dieser Modell-Kategorie sind u.a. das lineare, invertierbare Drei-Parameter-Modell von Walthall et al. (1985) und die quadratischen Modelle von Royer et al. (1985) und Kennedy et al. (1997) zuzuordnen. Sie wurden verwendet, um BRDF-Korrekturen von Fernerkundungsaufnahmen durchzuführen. Nach Solheim (1998) wird für die nahe Zukunft erwartet, dass empirische Reflexionsmodelle mit Hilfe von neuen Techniken, wie u.a. neuronale Netzwerke, entwickelt werden.

- 3) Semiempirische BRDF-Modelle basieren auf der näherungsweise Berücksichtigung physikalischer Prozesse, die durch empirische Parameter ergänzt werden. Sie bieten eine Lösung zwischen der Komplexität der physikalischen Modelle und der Einfachheit der empirischen Modelle.

Bekannte semiempirische BRDF-Modelle sind das AMBRALS-Modell (Algorithm for MODIS Bidirectional Reflection Anisotropy of the Land Surface) (Wanner et al., 1995) (s. Kapitel 3.3.2.2) und das EMRPV-Modell (Engelsen-Martonchik-Rahman-Pinty-Verstraete) (Engelsen et al., 1996). AMBRALS basiert auf dem linearen Modell von Roujean et al. (1992) und EMRPV auf dem nicht-linearen Drei-Parameter-Modell von Rahman et al. (1993a) & Rahman et al. (1993b). Beide wurden zur Korrektur der BRDF-Effekten durch die Simulation der BRDF und zur Bestimmung des Albedo aus „Off Nadir“-Aufnahmen (z.B. MODIS- oder MISR-Aufnahmen) entwickelt (Leroy et al., 1994; Wu et al., 1995; Li et al., 1996; Engelsen et al., 1996; Lucht, 1998).

### **3.3.2 Beschreibung der ausgewählten BRDF-Modellen**

Das PROSAIL- und das AMBRALS-Modell sind für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit ausgewählt worden. Sie werden daher in den Kapiteln 3.3.2.1 und 3.3.2.2 ausführlich beschrieben.

### 3.3.2.1 Das PROSAIL-Modell

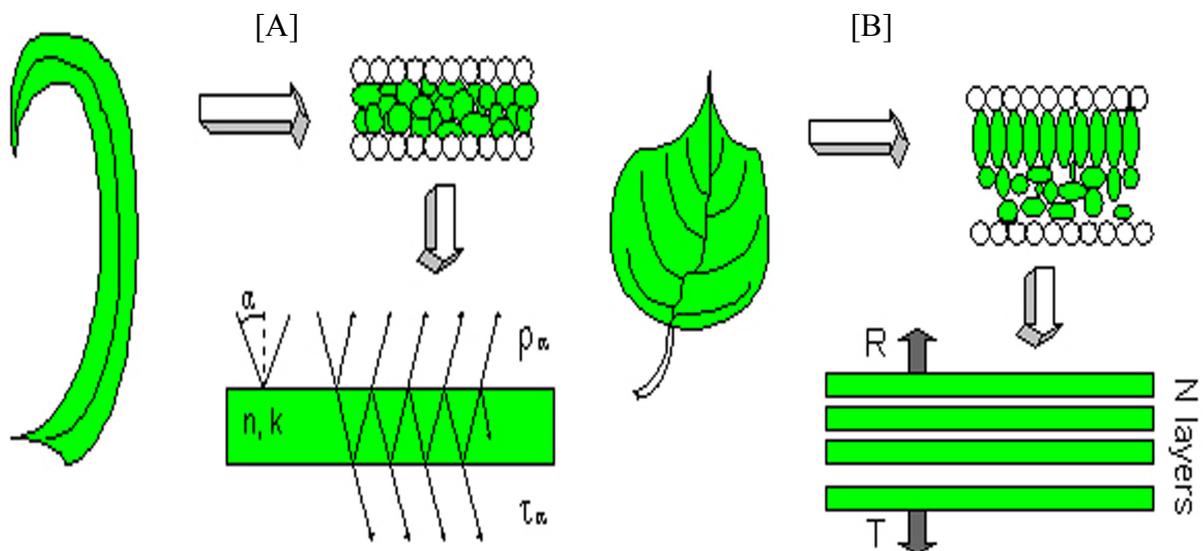
Das PROSAIL-Modell (Jacquemoud et al., 2000; Bacour et al., 2001a; Bacour et al., 2001b), ist eine Kombination zweier physikalischer Reflexionsmodelle, des PROSPECT-Modells (Model of Leaf Optical Properties Spectra) (Jacquemoud et al., 1990) und des SAIL-Modells (Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves) (Verhoef, 1984):

- a) Das PROSPECT-Modell ist eine verbesserte Version des Modells von Allen et al. (1969) und Allen et al. (1970). Es nimmt das Blatt als einen Stapel von  $x$  dicken absorbierenden Schichten mit  $(x-1)$  dazwischenliegenden Luftschichten an (Abbildung 22). Jede dieser Schichten ist uneben und reflektiert diffus. Die Reflexions- und Transmissionsvorgänge innerhalb dieses Schichtstapels werden mit Hilfe einer modifizierten Version des Systems von Stokes (1862) mathematisch beschrieben. Die analytische Formel des PROSPECT-Modells wird in Jacquemoud et al. (1990) beschrieben.

PROSPECT benötigt

- die Blatt-Mesophyll-Strukturvariable ( $N$ ), die sich auf die zelluläre Anordnung im Blatt bzw. die Anzahl der angenommenen Blattschichten bezieht,
- den Chlorophyllgehalt ( $C_{ab}$  [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ]),
- den Wassergehalt ( $C_w$  [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ]) und
- den Gehalt an trockener Masse des Blattes ( $C_m$  [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ])

als Eingangsvariablen, um die Reflexion und die Transmission jedes frischen Blattes zu berechnen (Jacquemoud et al., 2000).

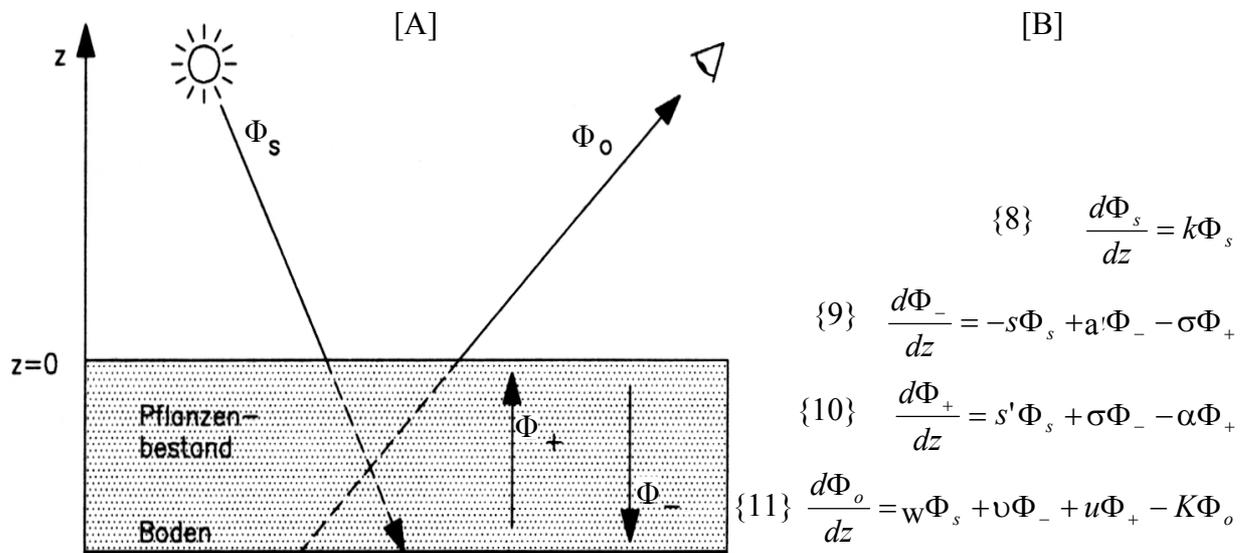


**Abbildung 22.** Reflexion und Transmission auf und durch ein aus einer Schicht bestehendes, kompaktes Blatt (z.B. „monocotyledonos“ Blatt) [A] und ein aus mehreren Schichten bestehendes Blatt (z.B. „dicotyledonos“ Blatt) [B] nach dem Modellansatz von Allen et al. (1969), Allen et al. (1970) und Jacquemoud et al. (1990). ( $\alpha$ : Winkel der einfallenden und reflektierten gerichteten Strahlung,  $n$ : Koeffizient der Streuung,  $k$ : Koeffizient der Absorption,  $\rho$ ,  $R$ : Reflexion,  $\tau$ ,  $T$ : Transmission,  $N$  layers:  $x$  Schichten). (aus [http://www.dideropt7.jussieu.fr/Led/LED\\_leafmod\\_e.htm](http://www.dideropt7.jussieu.fr/Led/LED_leafmod_e.htm) {am 15.03.2000}).

b) Das SAIL-Modell ist eine verbesserte Version des Modells von Suits (1972). Es basiert auf einer Vier-Fluss-Theorie: Es berücksichtigt den von der Sonne gerichtet einfallenden ( $\Phi_s$ ), den diffus einfallenden ( $\Phi_-$ ), den diffus reflektierten ( $\Phi_+$ ) und den zum Beobachter gerichteten Strahlungsfluss ( $\Phi_o$ ) separat (Abbildung 23 [A]). Ein Gleichungssystem beschreibt diese Strahlungsflüsse (Abbildung 23 [B]):

- Mit Hilfe von Absorptionskoeffizienten ( $k$ ,  $K$  &  $a$ ) wird die Absorption durch den Bestand angenähert und
- mit Hilfe von Streukoeffizienten ( $s$ ,  $s'$ ,  $\sigma$ ,  $w$ ,  $v$  &  $u$ ) werden die Übergänge von einer Sorte des Strahlungsflusses zu einer anderen berücksichtigt.

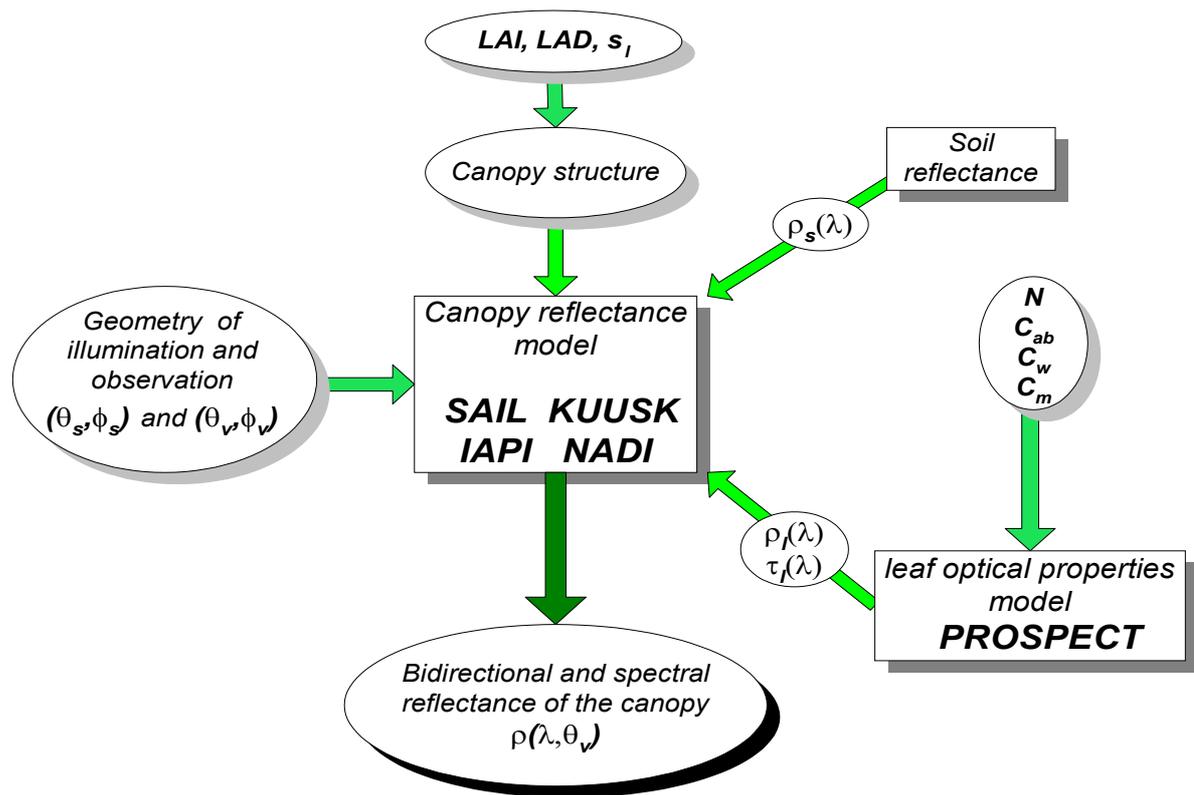
Die analytische Formel des SAIL-Modells kann in Verhoef (1984) nachgeschlagen werden.



**Abbildung 23.** [A] Querschnitt durch einen Modell-Pflanzenbestand mit Strahlungsflüssen (nach Reusch, 1997). [B] Gleichungssystem der Vier-Fluss-Theorie des SAIL-Modells. ( $\Phi_s$ : von der Sonne gerichteter einfallender Strahlungsfluss,  $\Phi_-$ : diffuser einfallender Strahlungsfluss,  $\Phi_+$ : diffuser reflektierter Strahlungsfluss,  $\Phi_o$ : zum Beobachter gerichteter Strahlungsfluss,  $z$ : Höhe,  $k$  / $K$  / $a$ : Absorptionskoeffizienten,  $s$  / $s'$  / $\sigma$  / $w$  / $v$  / $u$ : Streukoeffizienten,  $\{x\}$ : Formelnummer im Text).

Neben den von PROSPECT simulierten  $\rho_l$  und  $\tau_l$  benötigt das SAIL-Modell als Eingabevariablen um die richtungsabhängige („bidirektionale“) und spektrale Reflexion des Pflanzenbestandes zu simulieren (Abbildung 24):

- den Blattflächenindex (BFI),
- den gemittelten Blattneigungswinkel der Verteilung der Blattneigungswinkel ( $\theta_l$ ),
- das Verhältnis der durchschnittlichen Länge eines Blattes zur Bestandeshöhe ( $s_l$ ) („hotspot“-Parameter),
- die geometrischen Variablen, welche die Sonnen- und Beobachtersposition beschreiben ( $\theta_s$ ,  $\varphi_s$ ;  $\theta_v$ ,  $\varphi_v$ ), und
- die Reflexion des Bodens ( $\rho_s$ ).



**Abbildung 24.** Verknüpfung der Modelle (Coupling of the models) (aus Bacour et al., 2001b). (LAI: Blattflächenindex (BFI), LAD: Verteilung des Blattneigungswinkels bzw. gemittelter Blattneigungswinkel der Verteilung der Blattneigungswinkel ( $\theta_l$ ),  $s_1$ : “hotspot”-Parameter, N: Blatt-Mesophyll-Strukturvariable,  $C_{ab}$ : Chlorophyllgehalt,  $C_w$ : Wassergehalt,  $C_m$ : Gehalt an trockener Masse des Blattes,  $\theta_s$ : Sonnenzenitwinkel,  $\phi_s$ : Sonnenazimutwinkel,  $\theta_v$ : Beobachtungszenitwinkel,  $\phi_v$ : Beobachtungsazimutwinkel,  $\rho_s$ : Bodenreflexion,  $\rho_l$ : Blattreflexion,  $\tau_l$ : Blatttransmission,  $\lambda$ : Wellenlänge, KUUSK, IAPI & NADI: Weitere Bestandesreflexionsmodelle von Kuusk (1995), Iaquina et al. (1994) & Gobron et al. (1997)).

Der Prozess der Simulation der Reflexionsverteilung durch das PROSAIL-Modell (Abbildung 24) lässt sich invertieren. Das heißt, dass es durch die Eingabe der Reflexionsverteilung möglich ist, die bio-chemo-physikalischen Variablen des Pflanzenbestandes (N,  $C_{ab}$ ,  $C_w$ ,  $C_m$ , BFI,  $\theta_l$ ,  $s_1$ ,  $\rho_s$ ) zu simulieren. Der Erfolg der Simulation der Bestandesmerkmale hängt u.a. von der Anzahl und der räumlichen Verteilung der Erfassungswinkel ab, die für die Inversion genutzt werden können (Bacour et al., 2001a).

### 3.3.2.2 Das AMBRALS-Modell

Das AMBRALS-Modell (Wanner et al., 1995) ist ein semiempirisches, invertierbares Modell. Durch modulare Zusammensetzung (lineare Kombination) physikalischer Teilprozesse des Reflexionskomplexes wird die beobachtete Reflexionsverteilung der Zieloberfläche angenähert (Formel 12):

- Kernels genannte Funktionen beschreiben Strahlungsvorgänge auf der Streuoberfläche (Oberflächen-Reflexion) und im Streuvolumen (Volumenreflexion) des Zielobjekts (s. Kapitel 2).
- Die Gewichtung jedes Kernels für die Anpassung des Modells an das aufgenommene richtungsabhängige Reflexionsverhalten erfolgt durch Koeffizienten (Gewichtungsfaktoren), die empirisch bestimmt und dahingehend getrimmt werden, dass die gemessenen Strahlungswerte getroffen werden.

$$R(\theta_e, \theta_r, \varphi; \lambda) = f_{\text{iso}}(\lambda) + f_{\text{geo}}(\lambda)k_{\text{geo}}(\theta_e, \theta_r, \varphi) + f_{\text{vol}}(\lambda)k_{\text{vol}}(\theta_e, \theta_r, \varphi) \quad \text{Formel 12}$$

(R: Reflexion,  $\theta_e$ : Zenitwinkel der Sonneneinstrahlung,  $\theta_r$ : Zenitwinkel der zur Beobachtungsposition reflektierten Strahlung,  $\varphi$ : Beobachtungssazimutwinkel im Verhältnis zum Sonnenazimutwinkel,  $\lambda$ : Wellenlänge, f: Koeffizient (Gewichtungsfaktor), k: Kernel, iso: isotrope Streuung, geo: Oberflächen-Reflexion, vol: Volumenreflexion)

Das AMBRALS-Modell besteht aus drei Teilen (Formel 12):

- 1) Der  $f_{\text{iso}}$  Koeffizient in der Formel 12 ist eine Konstante, welche die diffuse, isotrope Streuung beschreibt.
- 2) Der  $k_{\text{geo}}(\theta_e, \theta_r, \varphi)$  Kernel wurde auf der Basis der geometrischen-optischen Theorien für die Simulation der Oberflächen-Reflexion entwickelt. Zwei Kerneln-Typen stehen zur Verfügung. Sie entstanden aus dem geometrischen-optisch BRDF-Modell für Waldbestände von Li et al. (1986, 1992). Die Li-Kernel geben Auskunft über die dreidimensionale Struktur einer Objektoberfläche und sind mit den Schattenwurfeffekten verbunden, welche die Geometrie des Objekts verursacht.
  - a) Der Li-Sparse-Kernel (Wanner et al., 1995) und seine Varianten (Beisl, 2001) basieren auf der Theorie von Li et al. (1986). Sie simulieren die Oberflächen-Reflexion bei spärlich im Raum verteilten Objekten (z.B. lichte Waldbestände).
  - b) Der Li-Dense-Kernel (Wanner et al., 1995) und seine Varianten (Beisl, 2001) basieren auf der Theorie von Li et al. (1992), die diesmal den gegenseitigen Schattenwurf von dicht neben einander stehenden Objekten mit berücksichtigten. Li-Dense-Kernel simulieren die Oberflächen-Reflexion bei dicht im Raum verteilten Objekten (z.B. dichte Waldbestände).
- 3) Der  $k_{\text{vol}}(\theta_e, \theta_r, \varphi)$  Kernel basiert auf der Theorie von Ross (1981) und wurde von Roujean et al. (1992) entwickelt. Zwei Kernel stehen zur Verfügung. Sie geben Auskunft über die volumetrische Streuung und sind mit der Dichte der Reflektoren (z.B. Blätter) korreliert.
  - a) Der Ross-Thick-Kernel (Roujean et al., 1992; Wanner et al., 1995) bezieht sich auf große Werte des Blattflächenindex und
  - b) der Ross-Thin-Kernel (Wanner et al., 1995) bezieht sich auf kleine Werte des Blattflächenindex.

Die analytischen Formeln der Kernel, die im AMBRALS-Modell verwendet werden, finden sich bei Wanner et al. (1995) und Beisl (2001).

Ursprünglich wurde das AMBRALS-Modell für die Simulation des MODIS-BRDF und -Albedo Produktes (Wanner et al., 1995; Wanner et al., 1997; Lucht et al., 2000) entwickelt. Trotz der Anwesenheit von Li-Kernen im Modell, die ursprünglich für die Simulation der Reflexionsverteilung über Waldbeständen entworfen wurden (Li et al., 1986 & 1992), ist AMBRALS nach Hu et al. (1997) und Wanner et al. (1997) für das Studium und die Korrektur der Auswirkung der Sonnen- und Beobachtungsposition auf die Reflexion einer großen Vielfalt natürlicher Oberflächen entwickelt worden. Ergebnisse von Hu et al. (1997) und Wanner et al. (1997) zeigten u.a. eine gute Anpassung des AMBRALS-Modells an approximierete BRDF aus „in situ“ Reflexionsaufnahmen über bewässertem und hartem Weizen ( $R^2$  im roten Spektralbereich und NIR: 0.83 – 0.93 und 0.85 – 0.88 entsprechend / RMSE: 0.019 - 0.037).

Im Zusammenhang mit der Anpassungsfähigkeit von AMBRALS an die Reflexionsverteilung über Weizenbeständen ist für die Teilschlagbewirtschaftung der von Beisl (2001) veröffentlichte Korrekturansatz der Effekte des richtungsabhängigen Reflexionsverhaltens (BRDF-Effekte) in flugzeug- und satellitengestützten Aufnahmen von großer Bedeutung. Nach diesem Ansatz ist es mit Hilfe des angepassten AMBRALS-Modells und der Normierungsmethodik von Royer et al. (1985) möglich, die BRDF-Effekte einer Fernerkundungsaufnahme allein mit der Information aus derselben Fernerkundungsaufnahme zu korrigieren.

### **3.4 „IN SITU“-MESSUNG DER REFLEXIONSVERTEILUNG**

Die Entwicklungen bei den flugzeug- und satellitengestützten Sensoren, bei der Modellierung der Reflexion und bei den „Real Time“-Sensoren verlangen nach der Registrierung der Reflexionsverteilung von Vegetationsbeständen „in situ“, um anhand solcher Referenzdatensätze

- die Einflussfaktoren vor Ort auf die rückgestreute Strahlung und
- das richtungsabhängige Reflexionsverhalten des Vegetationsbestandes zu erkennen und einzuordnen.

Multidirektionale feldspektroradiometrische Messungen

- bieten die Möglichkeit, Reflexionsmodelle für Vegetationsbestände zu entwickeln, zu validieren und zu verbessern. Der Wert von „in situ“ erfassten Datensätzen für die Modellierung wird beim Studium der Modellansätze deutlich: Kuusk (1996) z.B. benutzt Datensätze von Ranson et al. (1984) für seine Modellentwicklung. Privette et al. (1997) stellten dazu fest, dass die BRDF-bezogenen Untersuchungen sich mehr mit „in situ“-Validierungsstudien beschäftigen sollten.
- sind für die Interpretation der registrierten „Off Nadir“-Reflexion (z.B. mit „Real Time“-Sensoren) notwendig: Anhand von Begleitmessungen werden richtungsabhängiges Reflexionsverhalten und biophysikalische Bestandeseigenschaften verknüpft. In Form von

(BRDF-)Kalibrierungsdatenbanken pro Entwicklungsstadium und Fruchtart dienen solche Korrelationen zur Auswertung und Interpretation der Reflexionsdaten.

### 3.4.1 Rahmenbedingungen

Die Reflexionsaufnahme „in situ“ muss sich unter realen Bedingungen mit folgenden Einflussfaktoren und möglichen Störquellen auseinandersetzen:

- 1) Klima- und regionale Witterungsverhältnisse: Neben dem wechselnden Sonnenstand (s. Kapitel 2.2.1) beeinflussen
  - a) die variierende atmosphärische Zusammensetzung durch die sich daraus ergebende variierende Kombination von Absorption und Streuung entlang des Lichtweges (s. Kapitel 2.2.1) das Verhältnis der direkten zur diffusen Einstrahlung und
  - b) der Wind durch die Bewegung der Pflanzen des Bestandes während der Aufnahme die Vegetations-, Schatten- und Bodenanteile im Blickfeld des Sensors.
- 2) Relief: Seine Auswirkung ist im Kapitel 2.2.2 ausführlich beschrieben. Dazu muss erwähnt werden, dass durch die Inklination des Geländes
  - a) das Blickfeld je nach Beobachungsposition unterschiedlich groß ist und
  - b) das Signal unterschiedliche Abstände zurückzulegen hat, um vom Sensor aufgenommen zu werden.

Dies ruft unregelmäßige Abschwächungen und Verstärkungen der empfangenen Reflexion hervor.

- 3) Menschliche Bewirtschaftungsaktivitäten auf dem Feld:
  - a) Der Einsatz von Chemikalien zur Bekämpfung von Krankheiten, Insekten oder Unkraut,
  - b) die Managementspuren (Fahrspuren),
  - c) die Saatchichte und
  - d) die Reihenanordnung.

Ihr Einfluss bezieht sich entsprechend auf

- a) die chemischen Rückstände auf den Blättern,
- b) die Abwesenheit von Vegetation im Blickfeld des Sensors,
- c) die Dichte des Vegetationsanteils im Blickfeld des Sensors und
- d) den geometrischen Aufbau des Pflanzenbestandes bzw. die geometrische Verteilung der Reflexionszentren im Bestandesvolumen.

Die Auswertung der „in situ“ registrierten Reflexionsverteilung setzt Kenntnisse über diese Einflussfaktoren und Störquellen voraus.

Darüber hinaus ist für die Registrierung der Reflexionsverteilung „in situ“ wichtig, die passende Messstrategie für jedes Experiment zu konzipieren und die nötigen

Begleitmessungen zu definieren. Öfters ergeben sich aus der verfügbaren Ausrüstung Einschränkungen, wie z.B. das Signal-Rausch-Verhältnis des Sensors, die Art der radiometrischen Kalibrierung, die Beobachtungsgeometrie oder der Öffnungswinkel. Sie definieren die Strategiealternativen.

### **3.4.2 Bodengestützte Aufnahmesysteme für die Erfassung der Reflexionsverteilung von Vegetationsbeständen**

Für die Erstellung (Erfassung) von multidirektionalen, spektroradiometrischen Felddaten benötigt man eine spezielle Ausrüstungs- und Messanordnung, die gemäß den Erwartungen an das Experiment und den gegebenen Einschränkungen zu entwickeln ist. Zusammenfassend kann man für die existierenden, unterschiedlichen Ausrüstungs- und Messanordnungen folgende Regeln aufstellen:

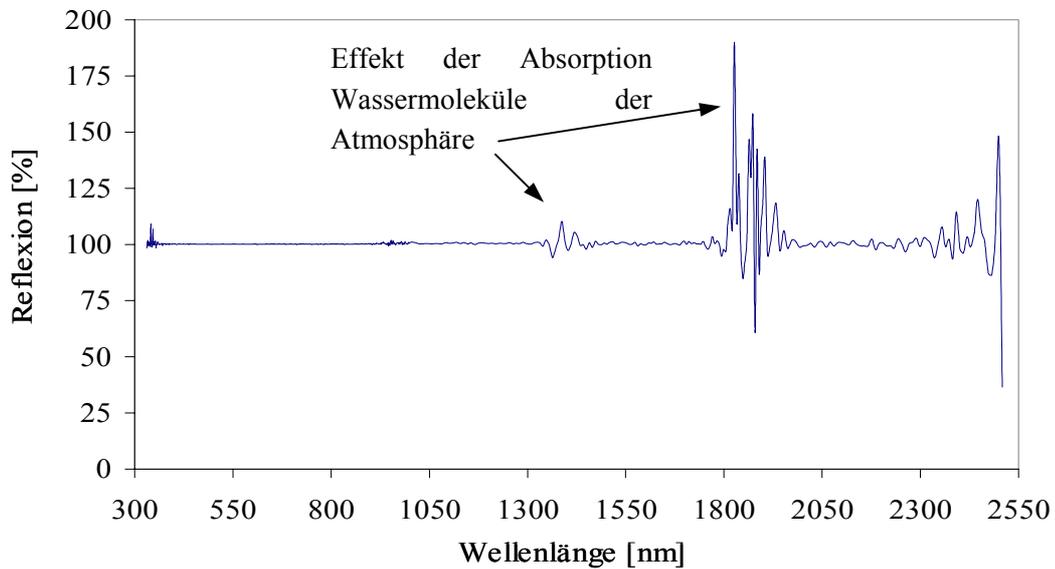
- a) Als Einstrahlungsquelle wird die Sonne oder eine künstliche Lichtquelle genutzt.
- b) Man verwendet Sensorik, die aus Spektroradiometern oder CCD-Kameras besteht.
- c) Die Normierung des empfangenen Signals wird unter Verwendung eines zum Himmel gerichteten Sensors oder einer Referenzfläche, welche die einfallende Strahlungsdichte zu angenommenen 100% reflektiert und sich unabhängig von der Richtung der ein- und ausfallenden Strahlung isotrop verhält („Lambert’sche“-Strahlungseigenschaft), durchgeführt. Als Material für die Referenzfläche wird heute meistens Polytetrafluoroethylen (PTFE) benutzt. Es erzielt Reflexionswerte von über 98% zwischen 400 - 1900 nm (Abbildung 25). Zwischen 2000 - 2500 nm werden Absorptionscharakteristika beobachtet (Beisl, 2001).
- d) Die Aufnahmekonstruktion wird entweder ortsfest oder mobil auf terrestrischen Einrichtungen wie Hebebühnen, Plattformen oder Masten, die an einem Fahrzeug befestigt sind, eingesetzt.

Grundsätzlich sind zwei Messstrategien zu unterscheiden:

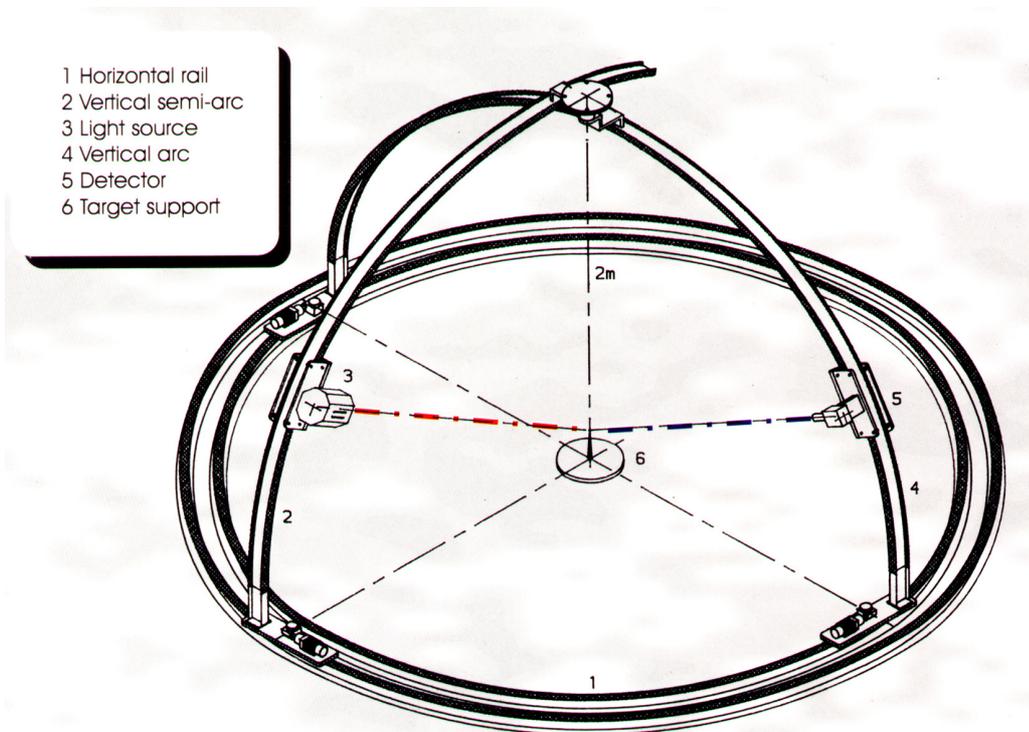
- 1) Die eine Messstrategie benutzt ein bewegliches Messgerät, um stets denselben Messausschnitt des Zielobjekts zu erfassen. Sie wird durch die Anwendung spezieller Aufnahmekonstruktionen, so genannten Goniometern, verwirklicht. Zwei bekannte Vertreter dieser Messstrategie sind:
  - a) der Goniometer EGO (European Goniometric Facility) (Koechler et al., 1994) in Ispra (Abbildung 26), JRC, Italien, der unter Laborbedingungen mit einer eigenen Lichtquelle eingesetzt wird:

Er besteht aus kreisförmigen Schienen mit 4m Durchmesser, auf denen zwei Stützbogen mit einer Höhe von 2m in beliebigen Azimutwinkeln bewegt werden können. Auf den Stützbogen sind die künstliche Lichtquelle und ein

Spektroradiometer montiert. Ihre Position kann in Zenitrichtung beliebig variieren. EGO erlaubt die hemisphärische Erfassung der Reflexion eines untersuchten Objektes in beliebigen Zenit- und Azimutwinkeln.



**Abbildung 25.** Reflexionsverhalten einer PTFE-Referenzfläche am 09.05.00 „in situ“ beim Sonnenazimutwinkel von  $135^\circ$  und Sonnenzenitwinkel von  $38^\circ$ . (Wegen verstärktem Rausch-Signal-Verhältnis des verwendeten Spektroradiometers dürfen die Absorptionscharakteristika der Reflexionskurve oberhalb von 2300nm nicht berücksichtigt werden).



**Abbildung 26.** Konstruktion des EGO (aus der Werbebroschüre des „European Goniometric Facility“, Institute for Remote Sensing Applications, JRC).

b) der Goniometer FIGOS (Field Goniometer System) (Sandmeier et al., 1999a) (Abbildung 27), der „in situ“ einsetzbar ist:

Er verfügt über ein ähnliches Aufbau- und Aufnahmeprinzip wie EGO. Auf ihn wird ein GER-3700 Spektroradiometer montiert, das den Spektralbereich zwischen 331nm - 2509nm erfasst und über eine spektrale Auflösung von 1.5nm (400-1050nm) bis 9.5nm (1900-2509nm) verfügt. FIGOS ist tragbar, aber nicht mobil. Man muss ihn ab- und wieder aufbauen, um an einem neuen Standort zu messen. Seine Höhe stellt einen weiteren Begrenzungsfaktor dar. Da er nur 2m hoch ist, bleibt das Blickfeld klein, so dass nur homogene kleinstrukturierte Oberflächen erforscht werden können.



**Abbildung 27.** Reflexionsmessungen mit FIGOS über einer Weizenkiste im Gewächshaus in Dürnast (Forschung im Rahmen dieser Arbeit - April 1999)

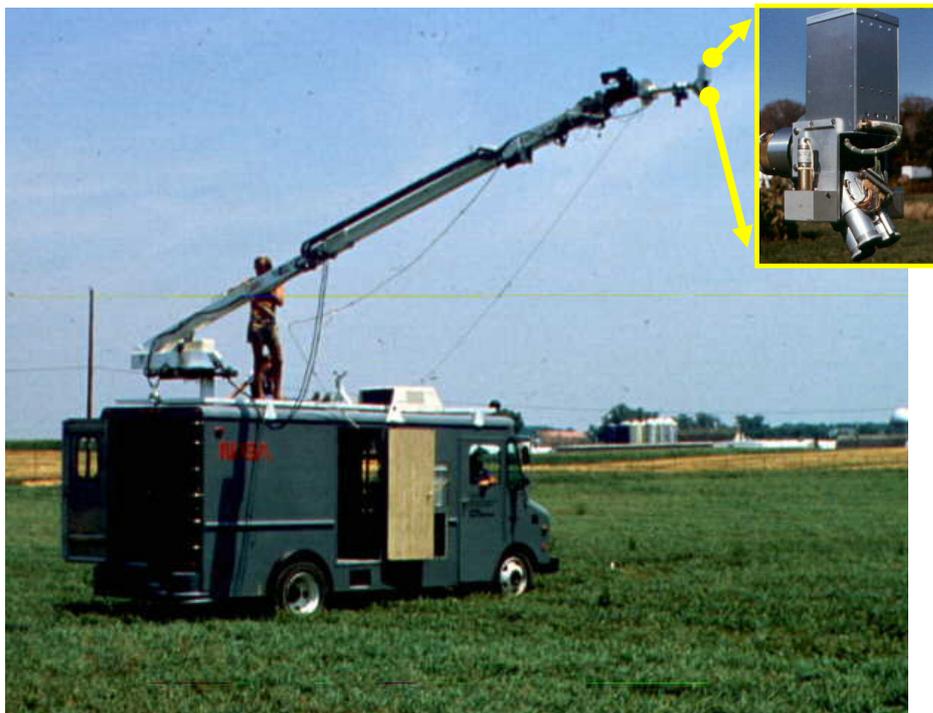
2) Die zweite Messstrategie benutzt ein ortsfest montiertes Messgerät, das stets einen unterschiedlichen Messausschnitt einer als homogen betrachteten Oberfläche erfasst. Sie wird bei mobilen Einheiten eingesetzt. Diese ermöglichen eine Vor-Ort-Aufnahme der Reflexion und die Durchführung mehrerer Messreihen an unterschiedlichen Feldstandorten unter vergleichbaren Witterungsbedingungen. Zwei bekannte Aufnahmekonstruktionen, die diese Messstrategie verwenden, sind folgende:

a) PARABOLA (Portable Apparatus for Rapid Acquisition of Bidirectional Observations of Land and Atmosphere) (Deering et al., 1986) wurde für die NASA GSFC konstruiert (Abbildung 28):

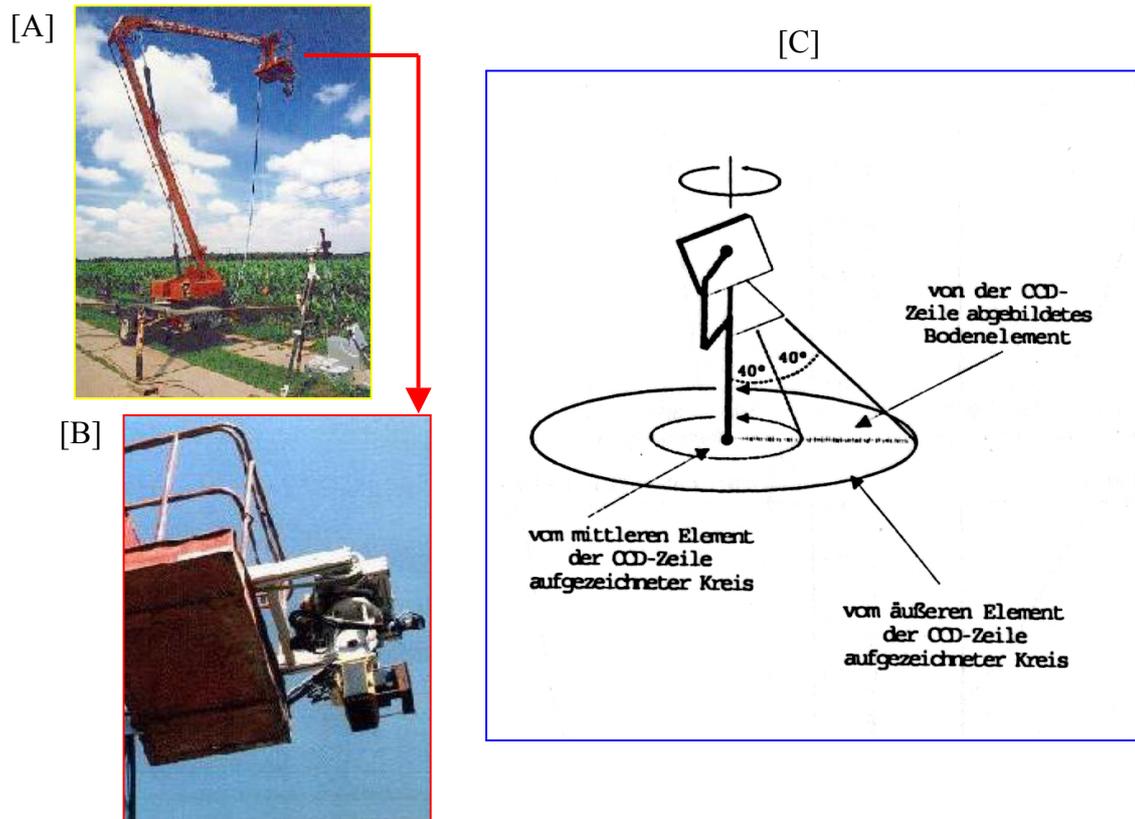
PARABOLA ist ein batterieversorgtes, in zwei Achsen drehfähiges, dreikanaliges (650-670nm, 810-840nm, 1620-1690nm), motorisiertes Radiometer, das fast die ganze Einstrahlung und Reflexion in 15°-Schritten innerhalb von 11 Sekunden erfassen kann. Das ganze System wird meist auf einen Mast (Transportable Pickup Mount System) montiert und von einer Rechnerbetrieboberfläche gesteuert. Es kann auf einem Fahrzeug, auf einer Schiene, auf einem Luftballon oder festmontiert auf dem Boden operieren. Die Arbeitshöhe ist variabel, und deswegen kann PARABOLA für unterschiedliche Einsätze benutzt werden. PARABOLA kann gleichzeitig die einfallende Strahlung und die Reflexion registrieren.

- b) WAAC (Wide Angle Airborne Camera) (Rösel et al., 1998; Radke, 2000) wird bei der DLR in Berlin verwendet (Abbildung 29), um BRF-Messreihen durchzuführen: WAAC wird auf einer Hebebühne installiert. Im Gegensatz zu anderen Messverfahren können auch relativ hoch wachsende Pflanzen vermessen werden. Die Kamera kann sich mit Hilfe eines Drehmechanismus in Azimutrichtung drehen. Sie hat drei CCD-Linien zum Scannen. Eine davon wird für die Aufnahme der Reflexionsverteilung benutzt und hat einen Öffnungswinkel von 80°. Die Messungen werden per Fernbedienung durchgeführt. In 30 Sekunden kann die vollständige Reflexionsverteilung einer Oberfläche aufgezeichnet werden. Die hohe Auflösung der Kamera, sowohl in Azimut- als auch in Zenitrichtung, erlaubt, BRF-Daten in sehr kleinen Winkelschritten aufzunehmen.

Keines der existierenden Systeme erfüllt allerdings die gewünschten Anforderungen in allen Punkten. Der Kompromiss muss zwischen Mobilität, Messausschnittgröße, Öffnungswinkel der Optik, radiometrischer und spektraler Auflösung und Dauer einer Messserie gefunden werden.



**Abbildung 28.** PARABOLA (zusammengestellt aus zwei Abbildungen aus <http://parabola-web.gsfc.nasa.gov/parabola/source/para.html> {am 06.09.99})



**Abbildung 29.** Überblick des Messeinsatzes mit der WAAC (zusammengestellt aus drei leicht geänderten Abbildungen aus Radke, 2000):

[A] Hebebühne mit Drehvorrichtung und WAAC im Messeinsatz.

[B] Drehvorrichtung mit WAAC im Einsatz.

[C] Prinzipielle Methodik zur BRDF-Messung mit der CCD-Zeilenkamera WAAC zur Aufnahme der von der Oberfläche reflektierten Strahlung.

## 4 MATERIAL UND METHODE

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Untersuchung der Reflexionsverteilung über Winterweizenbeständen, wobei ein Standort höherer und ein Standort niedrigerer Feldkapazität verglichen werden.

- Ein spezielles Verfahren wurde entwickelt, um das richtungsabhängige Reflexionsverhalten der untersuchten Winterweizenbestände erfassen zu können (s. Kapitel 4.1 & 4.2).
- Die Beschreibung und Auswertung des richtungsabhängigen Reflexionsverhaltens über Winterweizenbeständen fand durch die Approximation der Reflexionsverteilungsfunktion (s. Kapitel 4.4.5) aus den “in situ” aufgenommenen HDRF-Messungen (s. Kapitel 4.3) statt.
- Die Untersuchungen umfassen u.a. Studien über die Auswirkung der Richtungsabhängigkeit der Reflexion auf die Vegetationsindizes und die Korrelation des richtungsabhängigen Reflexionsverhaltens in benachbarten Wellenlängenbereichen (s. Kapitel 4.4.3 & 4.4.4).
- Die Integrationsmöglichkeit der Erkenntnisse in Entscheidungsunterstützungsketten wurde mit Hilfe der Ableitung von Bestandesvariablen aus der aufgenommenen Reflexion durch die Anpassung von invertierbaren BRDF-Modellen untersucht (s. Kapitel 4.5).

### 4.1 MUFSPERM (MOBILE UNIT FOR FIELD SPECTRORADIOMETRIC MEASUREMENTS)

Ein grundsätzliches Problem bei feldspektroradiometrischen Aufnahmen ist der vergleichsweise kleine Messausschnitt. Die feldspektroradiometrisch erfasste Messfläche kann über größere Aufnahmehöhen, größere Öffnungswinkel oder aber über eine größere Anzahl erfasster Messstellen gesteigert werden:

- 1) Größere Aufnahmehöhen sind über Hubleitern erreichbar. Aufgrund langer Auf- und Abbauzeiten schränkt diese Methode die Anzahl der erfassbaren Oberflächentypen aber drastisch ein.
- 2) Die Wahl eines größeren Öffnungswinkels führt dazu, dass im Messausschnitt Signale mit stark abweichendem Blickwinkel integral erfasst werden. Für Messungen des gerichteten Reflexionsfaktors ist daher nach Milton (1989) ein schmalerer als 20°-Öffnungswinkel nötig und nach Kriebel (1996b) ein 10°-Öffnungswinkel gerade noch tolerierbar.
- 3) Eine größere Anzahl erfasster Messstellen bedeutet Zeitverlust.

Die Zielsetzung der vorgestellten Arbeit erfordert eine Messkonstruktion, welche die oben erwähnten Nachteile vermeidet und die zusätzlich noch folgende Bedingungen erfüllen sollte:

- den Ausgleich der Veränderung des Beleuchtungsazimuts im Tagesgang.
- eine variable Aufnahmehöhe und die Möglichkeit, zu beiden Seiten der Wirtschaftswege im Feld messen zu können.

- Zusätzlich sollten Mobilität und Geschwindigkeit so groß sein, dass möglichst viele Messstandorte bei vergleichbaren Beleuchtungsverhältnissen messbar sind. Dies ist eine Grundvoraussetzung für die Vergleichbarkeit der Messstandorte untereinander und mit Satellitendaten.
- Die Messstandorte sollten über die gesamte Vegetationsperiode, also auch bei feuchtem Boden, erreicht werden können.

Schneider (1994) hat eine solche mobile Messkonstruktion für spektroradiometrischen Messungen im Feld entwickelt, die den besten Kompromiss zwischen den technischen Vorgaben und gewünschten Leistungen darstellt. MUFSPPEM (Abbildung 30) ist die Weiterentwicklung dieser Messkonstruktion und gewährleistet die „in situ“ Aufnahme der Reflexionsverteilung von Oberflächen und ermöglicht die Approximation der BRDF.

#### **4.1.1 Aufbau**

Eine zweiteilige Schiebeleiter wird an einer speziell konstruierten Plattform befestigt (Abbildung 30).

Auf der Plattform erreicht die Schiebeleiter eine Arbeitshöhe von 6.5 - 11m über dem Bestand. Die Plattform (3.5m<sup>2</sup> groß) kann an der 3-Punkt-Hydraulik jedes beliebigen Traktors angebracht werden. Sie legt die Arbeitsebene auf einer Höhe von ca. 2m fest, auf welcher der tragbare Rechner und die elektronische Stützausrüstung für MUFSPPEM aufgestellt werden.

Auf das obere Ende der Schiebeleiter sind eine anschiebbare Vorrichtung für eine Referenzscheibe, eine Befestigungsplatte für das Spektroradiometer und ein in zwei Achsen regelbarer, waagrecht ausgerichteter Aufbau für die Drehvorrichtung (Schwenk/Neige-Kopf) aufgesetzt (Abbildung 31).

Die Referenzscheibe, das Spektroradiometer und der automatisch gesteuerte Schwenk/Neige-Kopf werden während des Aufbaus auf vorbestimmten Positionen am oberen Ende der Schiebeleiter befestigt.

Der Aufbau findet am Messort statt und dauert für die aus mindestens zwei Personen bestehende Mannschaft ungefähr 40 Minuten.

#### **4.1.2 Messtechnik**

Das verwendete Spektroradiometer ist das „GER-3700“ der Firma „Geophysical Environmental Research“ („GER“) (Abbildung 31):

Es verfügt über eine spektrale Auflösung

- von 1.5 nm im 331 - 1050 nm Bereich, wobei ein Si-Detektor tätig ist,

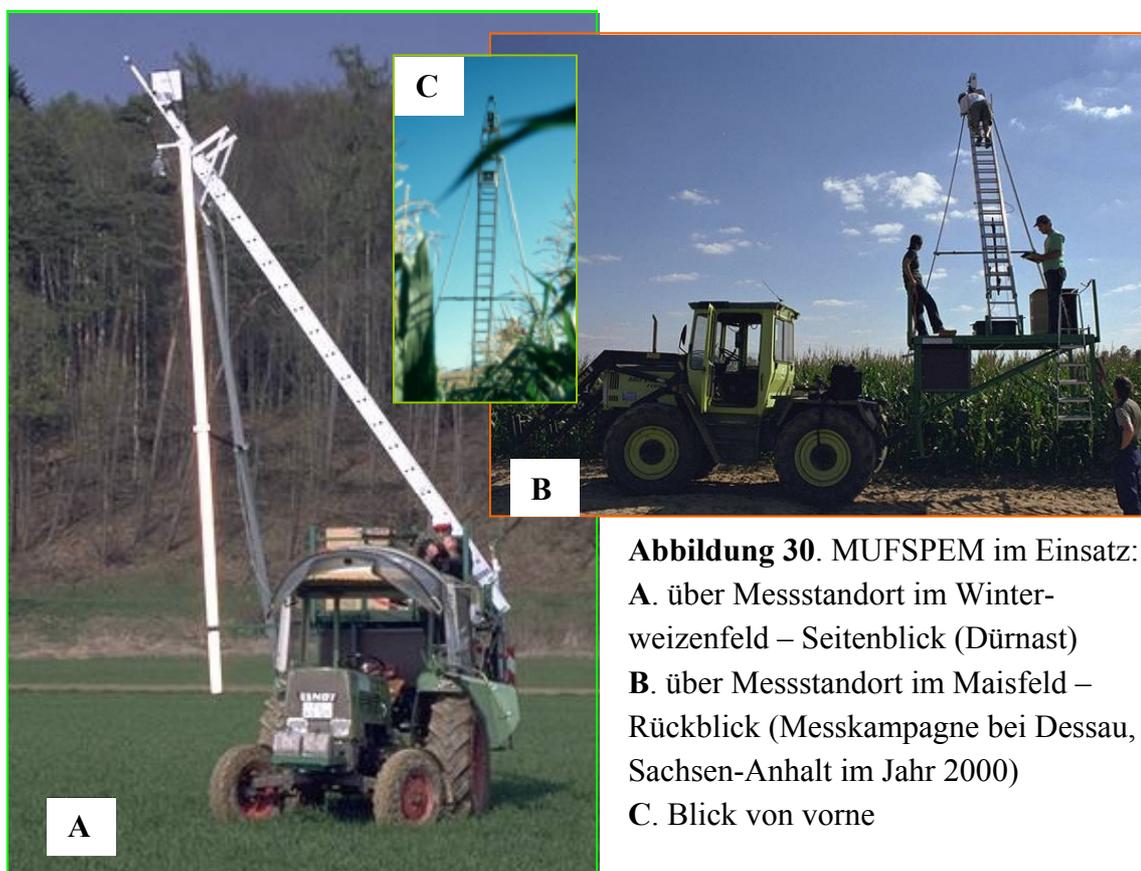
- von 6.5 nm im 1050 - 1900 nm Bereich, wobei ein PbS-Detektor eingesetzt ist und
- von 9.5 nm im 1900 - 2509 nm Bereich, wo ebenfalls ein PbS-Detektor die Strahldichte registriert.

Die Zeitspanne für eine Einzelmessung beträgt 50 Millisekunden.

Der Öffnungswinkel der Faseroptik ist mit  $23^\circ$  angegeben, wurde aber mit einer speziellen Voroptik der Firma GER auf  $10^\circ$  reduziert.

Die Größe des Blickfelds des Sensors wird neben dem Öffnungswinkel der Optik jeweils von der Aufnahmehöhe und dem Aufnahmewinkel bestimmt.

Die Kalibrierung des Spektroradiometers erfolgte im Labor der Firma GER. Dateien, unter anderem für Dunkelstrom und Wellenlängenposition, ordnen dem gemessenen Strahlungsfluss die entsprechende Wellenlänge zu und korrigieren radiometrische Sensorabweichungen.



**Abbildung 30.** MUFSPER im Einsatz:

**A.** über Messstandort im Winterweizenfeld – Seitenblick (Dürnast)

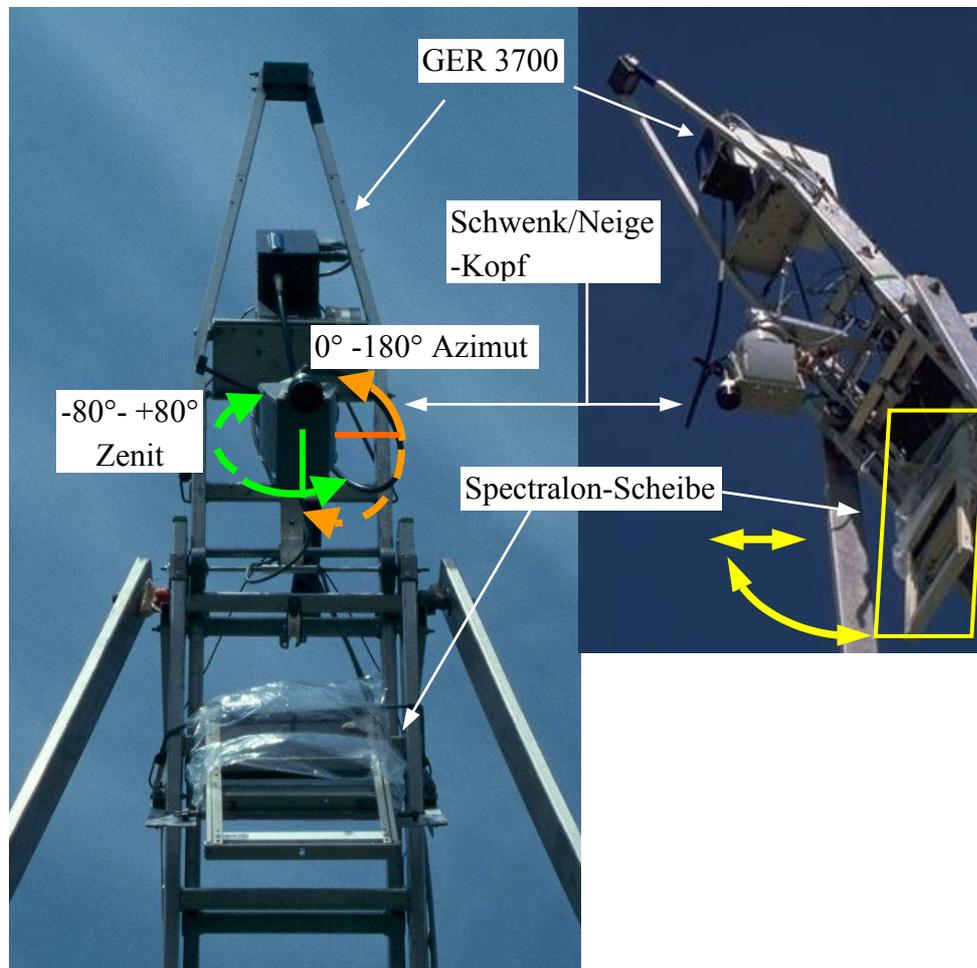
**B.** über Messstandort im Maisfeld – Rückblick (Messkampagne bei Dessau, Sachsen-Anhalt im Jahr 2000)

**C.** Blick von vorne

Der Schwenk/Neige-Kopf ist ein Prototyp und ermöglicht Drehungsschritte zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  im Azimutwinkelbereich und zwischen  $-80^\circ$  und  $80^\circ$  im Zenitwinkelbereich (Abbildung 31) mit einer Genauigkeit von  $\pm 1^\circ$ . Zwei Schrittmotoren werden durch den tragbaren Rechner entweder in beliebigen Aufnahmewinkeln oder in vorbestimmter Reihenfolge der Blickrichtungen mit Hilfe einer ASCII-Datei gesteuert. Auf diese Weise kann das Instrument auf einfache Art programmiert werden, um eine Messreihe gemäß der Untersuchungsbedürfnisse in vorbestimmten Azimut- und Zenitstufen zu erfassen.

Gekoppelt mit dem Faseroptikkabel ermöglichen Spektroradiometer und Schwenk/Neige-Kopf, die Reflexion des Pflanzenbestandes in beliebigen Winkeln aufzunehmen.

Die verwendete Referenzscheibe ist eine 25x25cm PTFE-Scheibe (s. Kapitel 3.4.2), die unter den Handelsbezeichnungen "Spektralon" oder "Halon" vertrieben wird. Bei regelmäßiger Pflege gewährleistet sie die Vergleichbarkeit zwischen den Aufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten.



**Abbildung 31.** MUFSPeM : Oberes Ende der Schiebeleiter.

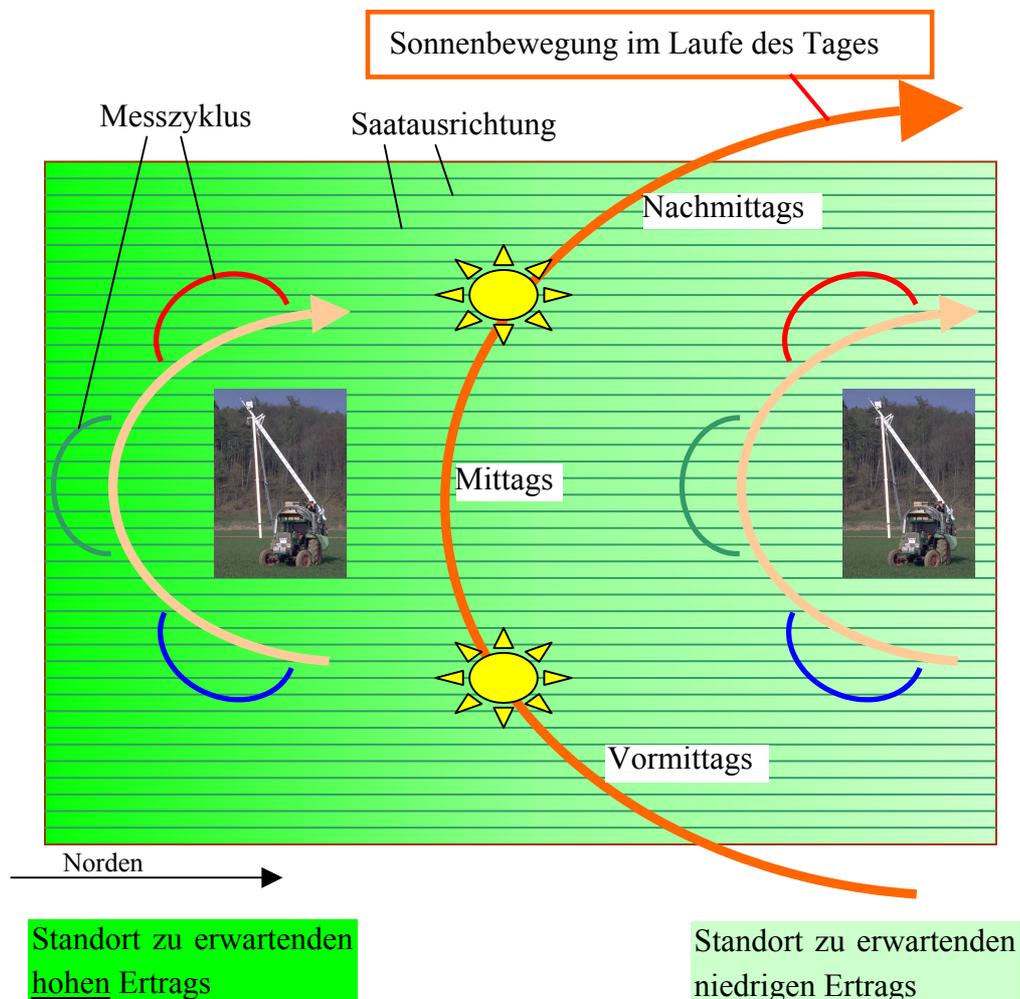
## 4.2 MESSSTRATEGIE

In den zwei untersuchten Winterweizenfeldern (s. Kapitel 1.3) (eins im Jahr 2000 & eins im Jahr 2001) wurden jeweils zwei Standorte ausgesucht. Mit Hilfe der verfügbaren Ertragsdaten früherer Vegetationsperioden, Boden- und nutzbarer Feldkapazitätskarten wurden dabei die Untersuchungsstandorte so ausgewählt, dass

- 1) der eine Standort dem Fall eines zu erwartenden niedrigen Ertrags entsprach (Standort NE) und
- 2) der zweite Standort den Fall eines zu erwartenden hohen Ertrags repräsentierte (Standort HE).

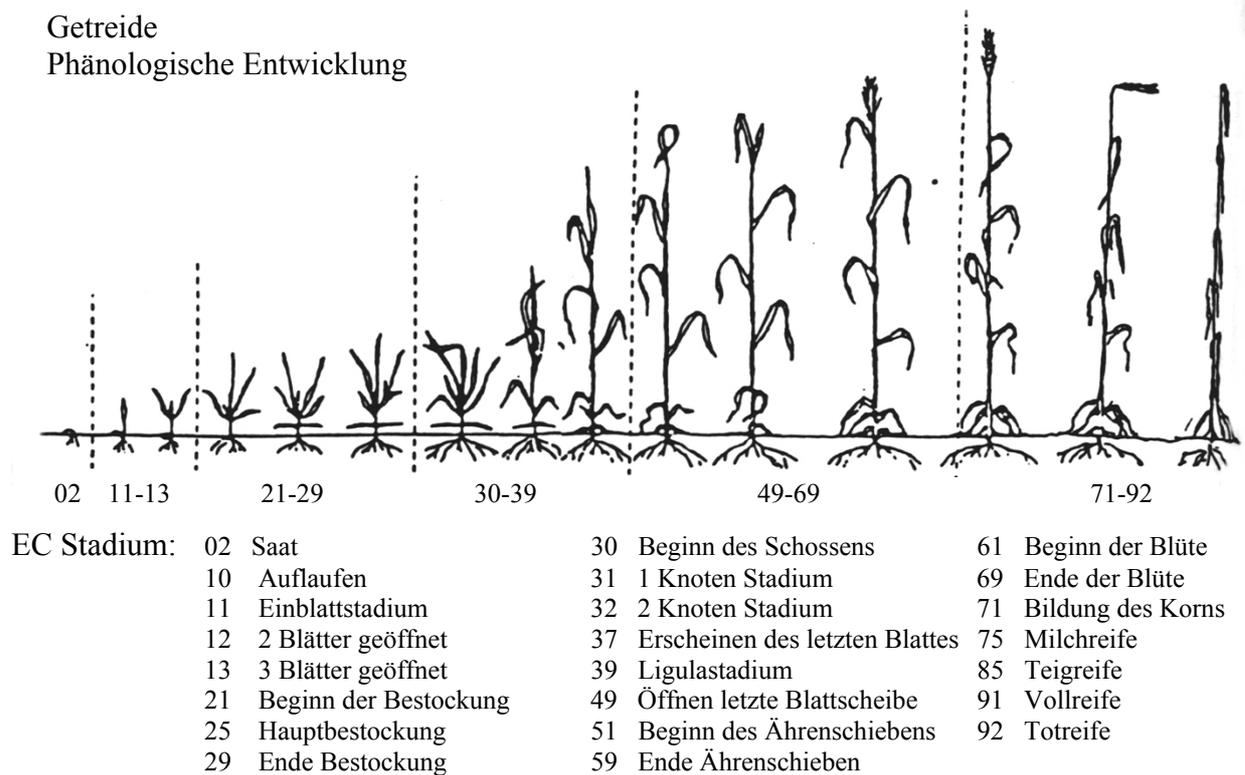
Außerdem wurde für die Auswahl der Untersuchungsstandorte mit berücksichtigt, dass multidirektionale Reflexionsmessungen zeitempfindlich und zeitraubend sind. Aus diesem Grund wurden zwei Standorte so ausgewählt, dass es die räumliche Distanz erlaubte, die Reflexionsverteilung beider Standorte mit Hilfe von MUFSPeM innerhalb einer Stunde zu registrieren. Somit wurde die Vergleichbarkeit der aufgenommenen Reflexionsdaten gewährleistet.

Jeder untersuchte Standort wurde mindestens dreimal pro Tag spektroradiometrisch erfasst, um die Reflexionsfunktion aus den erfassten Reflexionsdaten für den gesamten Tag berechnen zu können. Das heißt, dass die Reflexion eines Messstandorts bei unterschiedlichen Sonnenständen - von der tiefen Sonnenposition am Morgen über den Höchststand am Mittag bis zum abendlichen, tiefen Sonnenstand - aufgenommen wurde (Abbildung 32). Auf diese Weise kann durch Interpolation zwischen den registrierten Reflexionswerten bei den verschiedenen Sonnenständen eine Aussage über die Reflexionsverteilung zu jeder beliebigen Tageszeit formuliert werden.



**Abbildung 32.** Die Erfassung der Reflexionsverteilung im Laufe des Tages.

Die Termine für die Reflexionsaufnahmen während der Entwicklung des Bestands wurden im Hinblick auf die Düngungstermine und auf wichtige Entwicklungsstadien des Winterweizens vorgeplant. Die Entwicklungsstadien (EC) der untersuchten Weizenbestände wurden nach der Eucarpiaskala bestimmt. Diese ist durch die Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (1997) definiert (Abbildung 33). Die für die Reflexionsaufnahme vorgeplanten Entwicklungsstadien (EC 30-32, 37-39, 49, 55, 65 & 75) mussten durch die Witterungsverhältnisse angepasst werden. Kompromisse mussten geschlossen und alternative Messtermine in den Zeitplan eingeführt werden.



**Abbildung 33.** Entwicklungsstadien von Getreide nach der EC-Skala (aus Schneider, 1994).

#### 4.2.1 Annahmen

Versuchsziele, Messaufbau und nicht zuletzt das verfügbare Budget setzten die Rahmenbedingungen für die Messstrategie:

- 1) Die Gültigkeit des Helmholtz's Reziprozitäts-Theorems wurde angenommen. Das heißt, dass sich die Strahldichte von einfallendem und reflektiertem Strahl nicht ändert, wenn man den Strahlengang umkehrt (Helmholtz, 1883).
- 2) Die Rückstreueigenschaften der untersuchten Oberflächen wurden in bezug auf die Ebene, welche die Sonne, das Zielobjekt und den Beobachter einschließt (Sonnenhauptebene), als symmetrisch angenommen. Diese Annahme erlaubt es, die Messungen auf die Sonnenhauptebene und eine Seite der Sonnenhauptebene zu beschränken.

- 3) Während der Reflexionsaufnahme wurde nicht die Messposition, sondern der erfasste Messausschnitt geändert. Das heißt,
- a) dass der Schlag in Unterbereiche eingeteilt wurde, die als homogen angenommen wurden. Jeder Unterbereich wurde als Bestandseinheit (BE) betrachtet. Ihre Größe hing von der Aufnahmehöhe, dem schrägsten der verwendeten Beobachtungszenitwinkel und dem Öffnungswinkel der verwendeten Optik ab. Eine Messreihe erfasste die Reflexionsverteilung einer BE. Mit jedem Aufnahmeblickwinkel wurde die Reflexion eines unterschiedlichen Abschnitts der BE registriert.
  - b) dass in Abhängigkeit vom Beobachtungszenitwinkel die Reflexion unterschiedlich großer Messausschnitte erfasst wurde.
- Die Messverfahren von PARABOLA und WAAC (s. Kapitel 3.4.2) setzen obige Annahme ebenfalls als gegeben voraus.

#### 4.2.2 Methodik der Reflexionsaufnahme „in situ“

Ein Messzyklus begann, indem man die Längsachse des MUFSPM-Trägers parallel zur Sonnenhauptebene orientierte. Die Sonnenhauptebene entspricht der  $0^\circ$  - Sonnenposition -  $180^\circ$  Azimutebene in dem verwendeten Koordinatensystem (Abbildung 34), das u.a. von Kimes et al. (1985b, 1986), Ranson et al. (1991), Sandmeier (2000) und Beisl (2001) benutzt wurde:

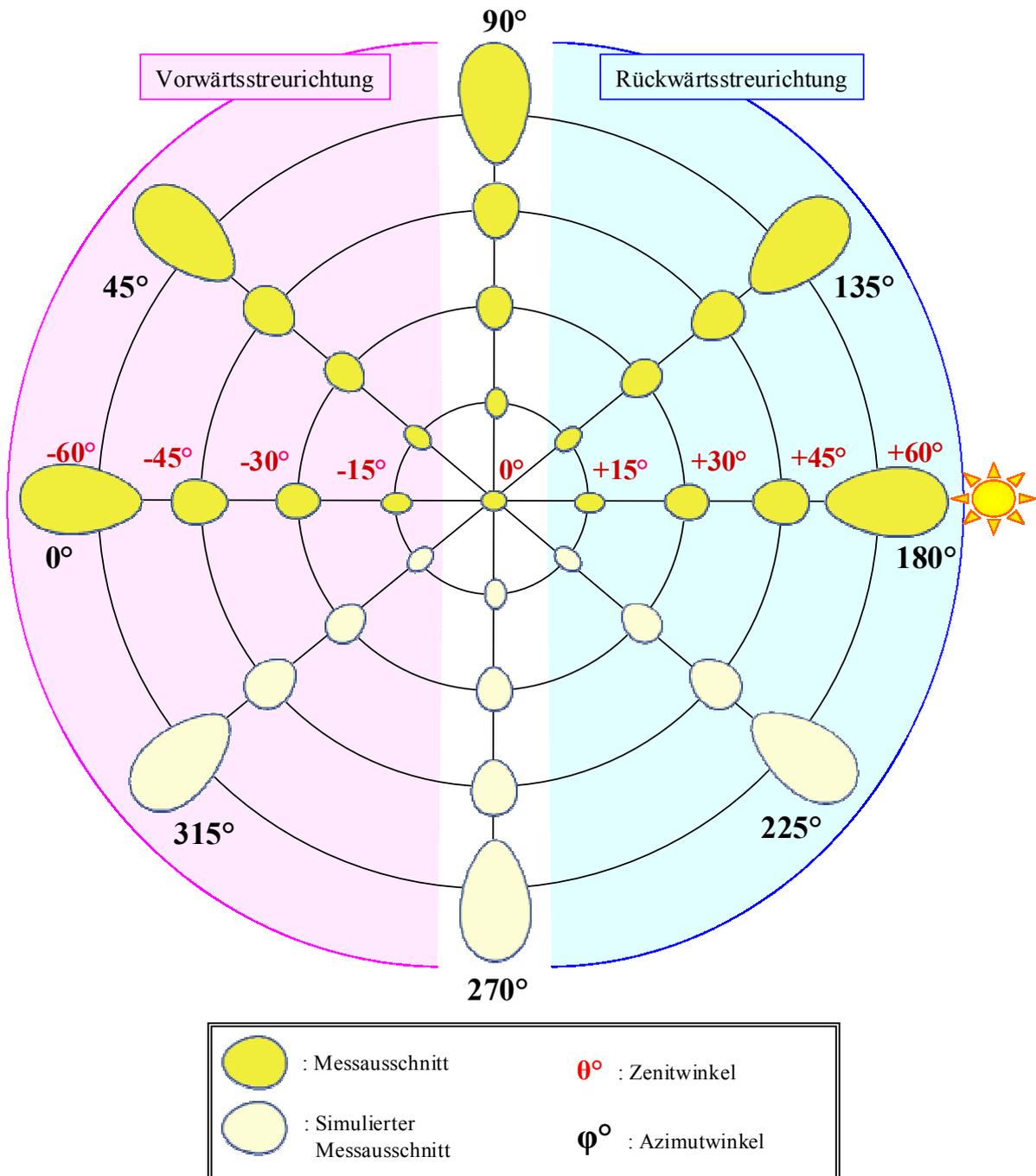
- Das Koordinatensystem orientiert sich an der Sonneneinstrahlungsrichtung:
  - In Sonneneinstrahlungsrichtung ist der Azimutwinkel  $0^\circ$ .
  - Gegen die Sonneneinstrahlungsrichtung ist der Azimutwinkel  $180^\circ$ .
  - Die Azimutwinkel wurden von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  im Uhrzeiger-Sinn berechnet.
- Bezüglich der Messwinkel im Zenitbereich gelten folgende Regeln:
  - $0^\circ$  Zenitrichtung entspricht der Nadir-Beobachtungsposition.
- Der Zenitwinkelbereich, in dem “vorwärts” gerichtete Reflexion aufgenommen wird, wird mit negativen Zeichen beschriftet (z.B.  $-45^\circ$ ).
- Mit positiven Zenitwinkeln wird die “rückwärts” gerichtete Reflexion bezeichnet.

Messungen fanden alle  $45^\circ$  in der Azimutrichtung ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  und  $180^\circ$ ) und alle  $15^\circ$  in der Zenitrichtung ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $60^\circ$ ) statt (Abbildung 34). Die Höhe der Messungen betrug 6.5 m über dem Bestand, und dies über die gesamte Vegetationsperiode hinweg.

Um aus der gemessenen Strahldichte den hemisphärisch-gerichteten Reflexionsfaktor (HDRF) zu ermitteln, wurde zusätzlich die Strahldichte über die Spectralon-Referenzscheibe erfasst. Referenzmessungen zur Berechnung des HDRF wurden nur nadirblickend über der Referenzscheibe durchgeführt. Bewusst wurde dabei der Fehler, der sich aus dem Empfang der Rückstrahlung der Referenzfläche in einer bestimmten Richtung

bzw. aus einer nicht 100%-igen Lambertreflexion der Referenzfläche ergibt, in Kauf genommen.

Aus Zeitersparnisgründen wurden Referenzmessungen am Anfang und am Ende eines Messzyklus registriert. Ein Messzyklus bestand aus 25 Messungen, einschließlich der Referenzmessungen, und dauerte ca. 15 Minuten. Unter wolkenfreien Bedingungen konnten bis zu drei Messzyklen (an unterschiedlichen Untersuchungsstandorten) pro Stunde durchgeführt werden.



**Abbildung 34.** Messzyklus {21 Messpositionen + 12 simulierte Messpositionen (+ 4 Referenzmessungen)}. (Simulierter Messausschnitt: entsteht durch die Spiegelung der aufgenommenen Reflexionswerte um die Sonnenhauptebene (s. Kapitel 4.2.1)).

### 4.2.3 Atmosphärische Rahmenbedingungen für die Reflexionsaufnahme

Die angestrebten atmosphärischen Rahmenbedingungen für die Messungen waren:

- Strahlungswetter mit weniger als 2/8 Bewölkung,
- horizontale Sichtweite von über 25 km,
- freie Einstrahlung auf den Messfleck und
- kaum Wind.

Solche optimalen Witterungsverhältnisse waren nicht immer vorhanden. Um begonnene Messserien zu vervollständigen wurden Reflexionsmessungen auch bei teilbewölkten Himmelsverhältnissen aufgenommen. In solchen Fällen wurden Zeitfenster ausgewählt, während denen der Himmel in einem großen Radius um die Sonne frei von Wolken war und die Einstrahlungsverhältnisse relativ stabil blieben (kontrolliert durch Luxmeter-Messungen - s. Kapitel 4.2.4).

Außerdem wurden gezielt Messzyklen bei wechselnder Himmelsbedeckung registriert, um den Einfluss der Bewölkung auf die Reflexionsverteilung abzuschätzen. Die Voraussetzung war der rasche, aber für einen vollen Messzyklus ausreichende, Wechsel von einem gänzlich bewölkten zu einem weitgehend klaren Himmel. Der schnelle Übergang ermöglichte die Aufnahme vergleichbarer Datensätze.

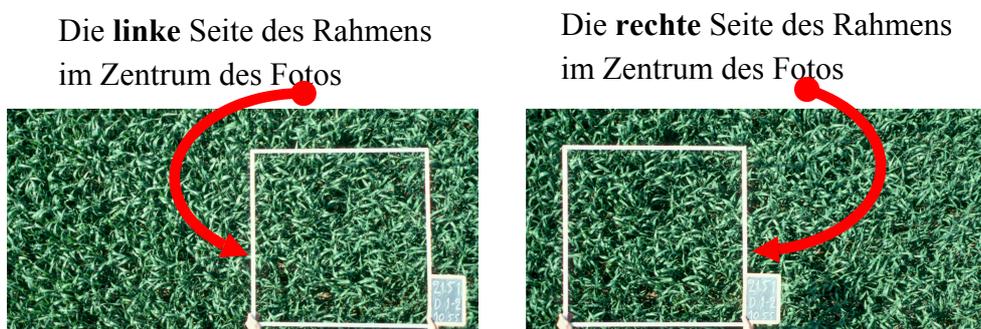
### 4.2.4 Begleitmessungen

Würde allein die Reflexion des Pflanzenbestandes aufgenommen, so wäre die Interpretation und Auswertung der erhobenen Daten unzureichend und schwer einsetzbar. Der Interpretations- und Auswertungsprozess benötigt deshalb auch Informationen über die jeweiligen Witterungsbedingungen, die physikalischen Bestandeseigenschaften, die chemischen Variablen der Pflanzen, die Lage und die Bewirtschaftung des Pflanzenbestands sowie die Beobachtungen des Bearbeiters während des Messvorgangs. Um diesen Informationsbedarf zu decken wurden folgende Begleitmessungen durchgeführt bzw. Begleitdaten von dritter Seite hinzugezogen:

1) Atmosphärische Verhältnisse:

- a) Zwei naheliegende (ein paar hundert Meter entfernte) meteorologische Stationen erheben regelmäßig Messwerte über die Einstrahlungsverhältnisse (globale und diffuse Einstrahlungswerte), die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Windgeschwindigkeit und weitere physikalische, atmosphärische Größen. Die für die Beurteilung der Vergleichbarkeit im Tagesgang und in der Vegetationsperiode wichtige direkte Einstrahlung wird bei einer der meteorologischen Stationen nach dem Vorschlag von Robinson et al. (1979) unter Verwendung einer kreisförmigen Scheibe, die dem Sonnenstand folgt, abgeschattet. Hierbei wird die direkte Einstrahlung durch Subtraktion der diffusen von der globalen Einstrahlung berechnet.

- b) Während der Messungen wurden Schwankungen der Einstrahlungsverhältnisse ständig mit einem Luxmeter der Firma Gossen registriert. Dieses erfasst die Halbraumeinstrahlung und die direkte Einstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 450nm - 700nm.
- 2) Physikalische Bestandesmerkmale:
- a) Der momentane Bedeckungsgrad des Bestands wurde mit Hilfe von Fotos aus ca. 5m Höhe erfasst. Es wurde eine besondere Aufnahmemethodik benutzt, um auch später die Möglichkeit zu haben, den Bestand dreidimensional betrachten zu können:  
 Ein leichter Rahmen aus Aluminium wurde gebaut, dessen innere Fläche genau 1 m<sup>2</sup> beträgt. Der Rahmen wurde aus zwei Blickwinkeln aufgenommen (Abbildung 35).  
 Auf diese Weise kann nach weiterer Bearbeitung die dritte Dimension virtuell erzeugt werden (Stereo-Effekt).  
 Aus diesen Aufnahmen wurden mit Bildverarbeitungsmethoden bzw. mit der überwachten „Maximum Likelihood“-Klassifikationsmethode (Richards et al., 1999) die maßgeblich an der Zusammensetzung des Signals beteiligten Bestandekomponenten herausgearbeitet. Die Anteile an glänzendem grünem pflanzlichem Material, an grünem beschattetem pflanzlichem Material, an offenem Boden, an beschattetem Boden und an sonstigen Materialien, wie z.B. liegende trockene Stoppeln, wurden pro Quadratmeter ermittelt.



Weizenstandort 2001 - EC39

**Abbildung 35.** Oberfläche eines Quadratmeters in der Stereoaufnahme.

- b) Neben den Stereo-Fotos wurden alle 45° (Azimutwinkel) weitere Fotos aufgenommen, um einen visuellen Überblick über das richtungsabhängige reflektierte Sonnenlicht und den Bestandeszustand zu bekommen.
- c) Reflexionsmessungen des unbedeckten Bodens (Nadir-Position) wurden, wo und wann es möglich war, registriert. Im Bestand erfolgte generell eine qualitative Abschätzung der Bodenfeuchtigkeit (nass, feucht oder trocken).

- d) Weitere reguläre Messungen bezogen sich auf die Ermittlung der jeweiligen Höhe des Bestands, der Länge und Breite der Blätter, der Anzahl der Blätter und der Bestimmung des Entwicklungsstadiums.
  - e) Besondere Merkmale, wie Dürresymptome (Einrollen der Blätter, usw.), Flecken unterschiedlicher Farbe auf den Blättern wurden registriert.
  - f) Mit Hilfe von Partnern des IKB-Dürnast-Projektes (<http://ikb.weihenstephan.de>) wurden zu bestimmten Zeitpunkten Biomasseschnitte durchgeführt, die quantitative Aussagen über die frische und trockene Masse sowie den Wassergehalt pro Quadratmeter des untersuchten Standortes erlauben.
  - g) Der Blattflächenindex wurde aus der Anzahl der Pflanzen pro m<sup>2</sup> und die Fläche der pro Pflanze entnommenen Blätter ermittelt.
  - h) Am Ende jeder Vegetationsperiode wurden Ernteproben geschnitten, um die Erträge (Korn, Stroh u.s.w.) genau zu bestimmen.
- 3) Chemische Bestandesmerkmale:  
Während der Vegetationsperiode wurde sporadisch der Chlorophyllgehalt der Blätter mit Hilfe des mobilen Chlorophyllmeters SPAD-502 (Soil-Plant Analysis Development section) (Minolta, 1989; Dwyer et al., 1991; Castelli et al., 1996) registriert.
- 4) Lage und GIS-Zusatzdaten über die untersuchten Standorte:  
Alle untersuchten Standorte wurden mit Hilfe der GPS-Technologie (Global Positioning System) genau lokalisiert. Dies ermöglichte die Bearbeitung der registrierten im Zusammenhang mit bereits vorhandenen Daten (z.B. GIS-Karten). Vorhandene GIS-Karten enthielten Informationen über den Ertrag vorheriger Jahre, die nutzbare Feldkapazität, die Bodeneigenschaften und die Reliefmerkmale.

### 4.3 REFLEXIONSDATENSÄTZE

Die Messobjekte waren Bestände von Winterweizen der Sorte „Pegassos“. 70 Messzyklen wurden, den Entwicklungsstadien und den Witterungsbedingungen entsprechend, über zwei Winterweizenbestände und zwei Vegetationsperioden (im Jahr 2000 & im Jahr 2001) an jeweils zwei Standorten mit zu erwartenden unterschiedlichen Erträgen erfasst.

In der Vegetationsperiode 2000 wurden Datensätze zu den Entwicklungsstadien (EC) 29, 30, 32, 33, 39, 51, 65 und 71 registriert. Der Standort mit höherer nutzbarer Feldkapazität (Standort HE) erzielte einen Ertrag von 75dt/ha, der Standort mit niedrigerer nutzbarer Feldkapazität (Standort NE) 65dt/ha.

In der Vegetationsperiode 2001 wurden Datensätze zu den EC-Stadien 21, 30, 32, 39, 51 und 71 registriert. Der Standort HE erzielte einen Ertrag von 86dt/ha und der Standort NE 81dt/ha.

## 4.4 AUFBEREITUNG DER REGISTRIERTEN DATEN

Die Aufbereitung der registrierten Daten für die Auswertung umfasste folgende Schritte:

- 1) Verknüpfung der Reflexions- mit den Begleitdaten (s. Kapitel 4.4.1).
- 2) Vorbereitung der Reflexionsdaten auf die Auswertung der Richtungsabhängigkeit (s. Kapitel 4.4.2)
- 3) Auswirkung der Sonnen- und Beobachtungsposition auf die Vegetationsindizes (s. Kapitel 4.4.3).
- 4) Auswahl relevanter Wellenlängen (s. Kapitel 4.4.4).
- 5) Approximation der Reflexionsverteilungsfunktion (BRDF) (s. Kapitel 4.4.5).

Die Aufbereitungsschritte 2 - 5 wurden von intelligenten, auf Kenntnis-Regeln basierenden Programmen unterstützt. Letztere gewährleisteten die semiautomatisierte Aufbereitung der aufgenommenen Reflexionsdaten (70 Messzyklen x 21 Beobachtungswinkel x 4 Referenzmessungen x 649 Wellenlängenbereiche = 3816120 Einzelwerte).

### 4.4.1 Verknüpfung der Reflexions- mit den Begleitdaten

Begleitdaten der Reflexionsmessungen und der Inhalt des Feldprotokolls wurden in eine Datenbank eingetragen. Diese Meta-Datenbank fasst folgende Daten zusammen (Abbildung 36 [A]):

- die geographische Lage,
- die atmosphärischen Verhältnisse,
- die Sonnenposition,
- die Aufnahmegeometrie,
- Aufnahmezeit und -datum,
- die jeweiligen Begleitmessungen auf dem Pflanzenbestand und
- die subjektiven Bemerkungen des Bearbeiters während der Feldmessungen.

Jeder Eintrag wurde durch Verwendung eines Codesystems mit einer Verzeichniskonstruktion verknüpft (Abbildung 36 [B]), welche die originalen Reflexionsdateien samt Bildern und Hilfsdateien enthält. In dieser Verzeichnisanordnung wurden die pro Messzyklus aufgenommenen Reflexionsdaten anhand der Vegetationsperiode, des Standorts, des Entwicklungsstadiums und des Sonnenstandes sortiert (Abbildung 36 [C]). Die angeordneten Messzyklen wurden dann mit Hilfe der Datenbank qualitativ eingestuft (Abbildung 36 [D]) und entsprechend ihrer Einstufung für weitere Aufbereitungen ausgewählt.

Die weitere Aufbereitung der Messzyklen erzeugte neben den Endprodukten /-dateien eine Menge von Hilfsdateien und Dateien, die in der jeweiligen Zwischenphase der Auswertung von großer Bedeutung waren. Für diese Dateien wurde eine zweite Verzeichniskonstruktion nach demselben Prinzip der Verzeichniskonstruktion für die originalen Reflexionsdaten

erstellt (Abbildung 36 [E]). Das Codesystem, das die Verknüpfung mit der Datenbank der Begleitdaten ermöglicht, wurde erhalten.

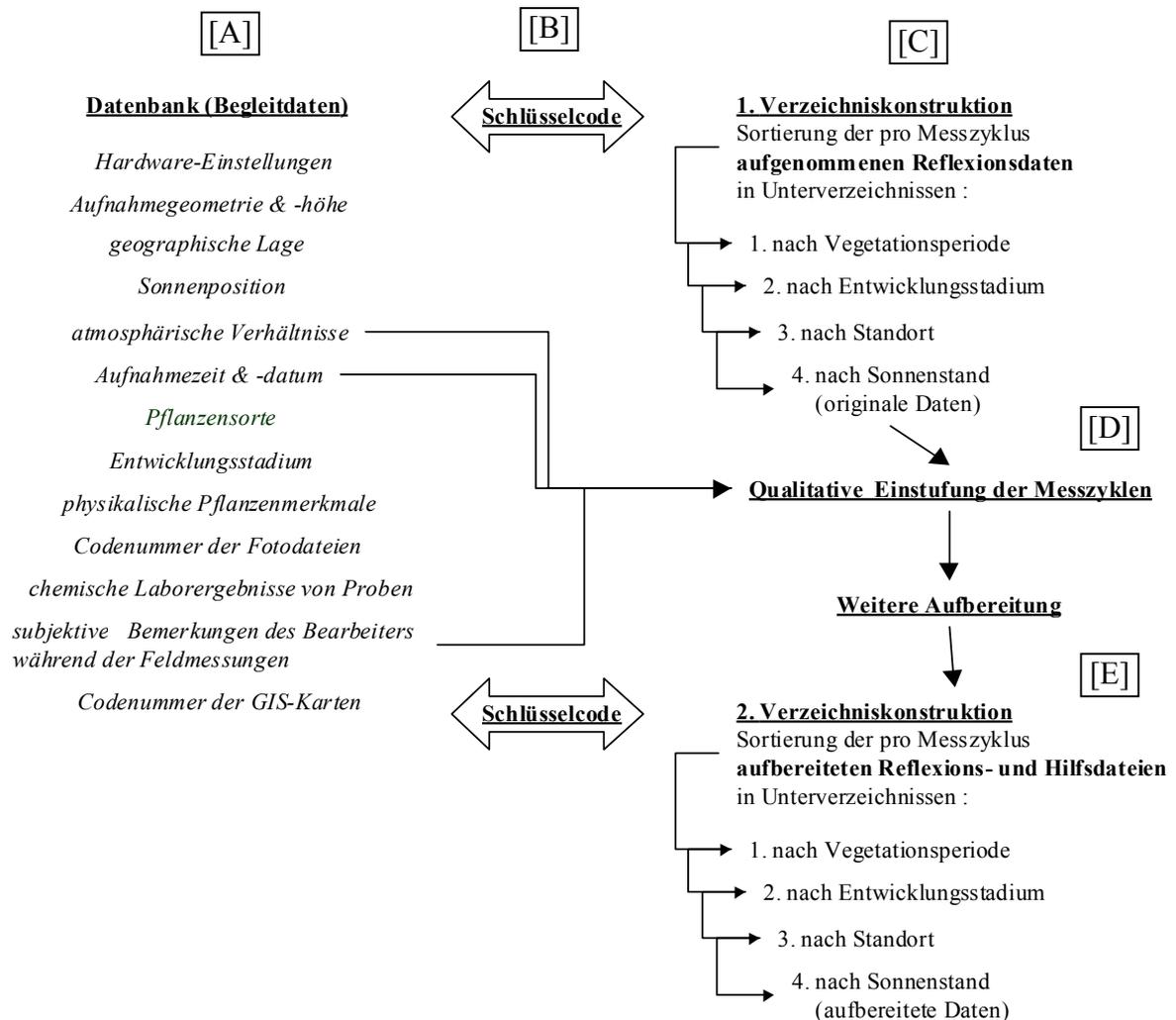


Abbildung 36. Organisation der Daten.

#### 4.4.2 Vorbereitung der Reflexionsdaten für die Auswertung der Richtungsabhängigkeit

Die Vorbereitung der Reflexionsdaten für die Auswertung der Richtungsabhängigkeit wurde folgendermaßen durchgeführt:

- 1) Die Referenzmessungen pro Messzyklus wurden verwendet, um die Reflexionsmessungen des Bestandes zu normieren:
  - a) Die Zeit der Aufnahme jeder Reflexionsmessung ist in jeder Messdatei registriert und wurde zum Ausgleichen der Schwankung der Sonneneinstrahlung innerhalb der 15-minütigen Dauer eines Messzyklus folgendermaßen verwendet:

- i) Der Zeitunterschied zwischen den Referenzmessungen am Anfang (Zeit A) und am Ende (Zeit E) eines Messzyklus wird in Sekunden berechnet.
  - ii) Der Zeitunterschied einer beliebigen Reflexionsmessung des Messzyklus (Zeit R) von Zeit A wird in Sekunden berechnet.
  - iii) Zeit R wird durch den Zeitunterschied der Referenzwerte (Zeit E - Zeit A) dividiert.
  - iv) Der Quotient wird mit dem absoluten Unterschied zwischen den Referenzwerten am Anfang ( $RA_\lambda$ ) und am Ende ( $RE_\lambda$ ) eines Messzyklus je nach Wellenlänge ( $\lambda$ ) multipliziert.
  - v) Das Ergebnis wird mit  $RA_\lambda$  addiert, wenn  $RA_\lambda$  kleiner als  $RE_\lambda$  ist oder von  $RA_\lambda$  subtrahiert, wenn  $RA_\lambda$  größer als  $RE_\lambda$  ist.
- Auf diese Weise wurden zeitlich genauen zuordenbare Referenzwerte ( $RN_\lambda$ ) zur Normierung der Reflexionsmessungen ermittelt (Formel 13).

$$RN_\lambda = \begin{cases} RA_\lambda + \left[ |RA_\lambda - RE_\lambda| * \frac{\text{Zeit R}}{\text{Zeit E} - \text{Zeit A}} \right] & \text{wenn } RA_\lambda < RE_\lambda \\ RA_\lambda - \left[ |RA_\lambda - RE_\lambda| * \frac{\text{Zeit R}}{\text{Zeit E} - \text{Zeit A}} \right] & \text{wenn } RA_\lambda > RE_\lambda \end{cases} \quad \text{Formel 13}$$

- b) Aus dem Quotienten zwischen der Reflexion des Objekts und dem entsprechenden Referenzwert ( $RN_\lambda$ ) wurde je nach Wellenlänge der hemisphärisch-gerichtete Reflexionsfaktor (HDRF) für jeden Aufnahmewinkel berechnet.
- 2) Spektralbereiche, die an Wasserabsorptionsmaxima der Atmosphäre (z.B. um die 1.45  $\mu\text{m}$  & 1.95  $\mu\text{m}$ ) oder an durch Hardware-hervorgerufenen Zuverlässigkeitsgrenzen (z.B. um die 0.35  $\mu\text{m}$ , 1.0  $\mu\text{m}$  & 2.4  $\mu\text{m}$ ) liegen, wurden für die Auswertung der Richtungsabhängigkeit nicht verwendet. Die zu untersuchenden Wellenlängenbereiche lagen zwischen 0.4 und 0.98  $\mu\text{m}$ , 1.05 und 1.355  $\mu\text{m}$ , 1.495 und 1.755  $\mu\text{m}$  und zwischen 2.0 und 2.3  $\mu\text{m}$ .
  - 3) Ein Mittelungsverfahren wurde innerhalb dieser Wellenlängenbereiche durchgeführt, um die Reflexionskurve entlang des Spektrums (Signaturkurve) zu glätten und eine gleichmäßige Auflösung im gesamten untersuchten Spektrum von 0.005  $\mu\text{m}$  zu erzeugen:
    - Im Falle der Wellenlängen bis 1.0  $\mu\text{m}$  wurde im  $\pm 0.003 \mu\text{m}$ -Bereich um die gezielte Wellenlänge und
    - im Falle größerer Wellenlängen im  $\pm 0.005 \mu\text{m}$ -Bereich gemittelt.

Der unterschiedliche Mittelungsbereich wurde wegen der ursprünglich vorhandenen spektralen Auflösung des Spektroradiometers definiert. Dieses Verfahren reduzierte die Anzahl der zu untersuchenden Wellenlängen um 293. Jede dieser Wellenlängen muss aber wiederum aufgrund des Mittelungsverfahrens als Vertreter des gemittelten Wellenlängenbereichs wahrgenommen werden. In diesem Sinne wird im Text weiterhin das Wort „Wellenlänge“ verwendet.

- 4) Fehlmessungen, nämlich Messungen, die unter dem Einfluss von Störquellen durchgeführt wurden, wie zum Beispiel Messungen, bei denen Fahrspuren partiell miterfasst wurden oder Fehlmessungen wegen Hardwareversagens, wurden nicht berücksichtigt. Sie wurden pro Messzyklus mit Hilfe der Datenbank der Begleitdaten (Abbildung 36 [A]) und der visuellen Auswertung von zwei- und dreidimensionalen Darstellungen der HDRF-Werte festgestellt und durch Interpolation der Werte der am nächsten liegenden Messpositionen ersetzt.
- 5) Die Änderung der Reflexionsverteilung während der Sonnenwanderung über den Tag wurde mit Hilfe folgender Methodik verfolgt:
  - a) Die im Tagesverlauf zwischen frühestem und spätestem Messzyklus zu berücksichtigende Sonnenzenitspanne pro Standort und Entwicklungsstadium wurde in 10°-Schritte unterteilt. Ein Beispiel:
 

Die Messzyklen zwischen Sonnenzenit 57° am Vormittag und 71° am Nachmittag wurden bei mindestens drei verschiedenen Sonnenständen registriert. Daraus wurden Zenitschritte für den Vormittag bei 55°, 45°, 35° und 25° (wenn es die Jahreszeit erlaubt, den Sonnenzenit 25° zu erreichen) und 35°, 45°, 55° und 65° Sonnenzenit für den Nachmittag berechnet.
  - b) Nach einem von Martonchick (1994) angewandten Verfahren wurden die HDRF-Werte für Messzyklen dieser Sonnenzenitschritte mit Hilfe einer kubischen „Spline“-Interpolation zwischen den über den Tag gemessenen HDRF-Werten berechnet.

Da dieser Vorgang an allen Messtagen durchgeführt wurde, sind vergleichbare Datensätze (Messzyklen) entstanden. Dies ermöglichte den Vergleich des richtungsabhängigen Reflexionsverhaltens auf der Basis des Sonnenzenits zwischen den Sonnenständen im Tagesgang, zwischen den Entwicklungsstadien und zwischen den Standorten.

#### **4.4.3 Auswirkung der Sonnen- und Beobachtungsposition auf die Vegetationsindizes**

Vegetationsindizes werden genutzt, um Aussagen über den Zustand der Vegetationsbestände zu machen (s. Kapitel 3.1.1). Zu hinterfragen war daher,

- welche Auswirkungen auf die Berechnung von Vegetationsindizes zu erwarten sind, wenn die Reflexionsaufnahme zu verschiedenen Tageszeiten (z.B. am früheren Vormittag und am Mittag) bzw. bei verschiedenen Sonnenpositionen und / oder aus verschiedenen Beobachtungspositionen (z.B. Nadir- und beliebiger „Off Nadir“-Position) durchgeführt wird.
- ob diese Auswirkungen quantitativ innerhalb der für „Precision Agriculture“ akzeptierbaren Aussagegenauigkeitsgrenzen liegen.

Um dieser Fragestellung nachzugehen, wurde nach folgender Methodik vorgegangen:

- 1) Vegetationsindizes wurden ausgewählt, die Hinweise auf die Vitalität des Pflanzenbestandes liefern:

Vitalität der Pflanzenbestände wird nach Bükér et al. (1991) das „im Zusammenspiel von genetischem Material (Sorteneigenschaften) und Umweltfaktoren (Klima, Witterung, Boden, Schädlinge, Krankheiten) beeinflusste Wachstum der Pflanzenbestände“ genannt.

Dafür geeignet sind u.a. solche Vegetationsindizes, die eine hohe Korrelation mit dem Pigmentgehalt, der Biomasse, der Zellstruktur oder dem Wassergehalt aufweisen. Aus diesem Grund wurden folgende Vegetationsindizes ausgesucht:

- a) Indikatoren zum Pigmentgehalt des Bestands:
    - i) Der Quotient  $0.551\mu\text{m}/0.67\mu\text{m}$  (maximale durch minimale Reflexion im grünen und roten Spektralbereich entsprechend) (Schneider, 1994).
    - ii) Der HWP (Wendepunkt im Rot-Infrarot-Anstieg der Vegetationssignaturkurve) (Horler et al., 1983). Der HWP wurde folgendermaßen bestimmt (Boochs et al., 1989):
      - die zweite Ableitung des Reflexionsspektrums nach der Wellenlänge wurde berechnet  $\{(d^2R/d\lambda^2), R: \text{Reflexion}, \lambda: \text{Wellenlänge}\}$ .
      - die Wellenlänge im Bereich des Rot-Infrarot-Anstiegs der Reflexionskurve wurde ausgesucht, bei der das Ergebnis der zweiten Ableitung gleich null ist  $\{(d^2R/d\lambda^2) = 0\}$ .
  - b) Vegetationsindizes, die Rückschlüsse auf die Biomasse ziehen lassen (Schneider, 1994):
    - iii) Der Quotient  $0.796\mu\text{m}/0.67\mu\text{m}$  (Beginn der „Rotschulter“ im NIR durch minimale Reflexion im roten Spektralbereich).
    - iv) Der NDVI (Rouse et al., 1974). NDVI wurde über das Verhältnis zwischen der Differenz und der Summe der Reflexion bei  $0.67\text{nm}$  und  $0.796\text{nm}$  Wellenlängen berechnet  $\{(R_{0.796}-R_{0.67})/(R_{0.796}+R_{0.67})\}$ .
  - c) Der Quotient  $1.082\mu\text{m}/0.796\mu\text{m}$  (Ende durch Beginn der „Rotschulter“ im NIR), der eine qualitative Aussage über die Zellstruktur erlaubt (Schneider, 1994).
  - d) Indikatoren zum Wassergehalt in der Vegetationsdecke oder zum gesamten Messfleck (Schneider, 1994):
    - i) Der Quotient  $0.901\mu\text{m}/0.972\mu\text{m}$  (Referenzpunkt im „Rotschulter“-bereich im NIR durch Referenzpunkt des Wasserabsorptionsbereichs im NIR).
    - ii) Der Quotient  $1.648\mu\text{m}/1.531\mu\text{m}$  (Referenzpunkt für die Beurteilung der Wasserabsorption des Bestandes im SWIR durch Referenzpunkt für die Evapotranspiration des Bestandes).
    - iii) Der Quotient  $0.796\text{nm}/1.531\mu\text{m}$  (Beginn der „Rotschulter“ im NIR durch Referenzpunkt für die Evapotranspiration des Bestandes).
- 2) Die ausgewählten Vegetationsindizes wurden für jede Aufnahmeposition eines Messzyklus, Messzyklen beider Standorte, für jedes untersuchte Entwicklungsstadium und über zwei Vegetationsperioden hinweg berechnet.
  - 3) Die quantitative Berechnung der Auswirkung des Wechsels der Sonnen- und Beobachtungsposition auf die ausgewählten Vegetationsindizes beruhte auf der Berechnung der Spannweite der bei den Indexwerten hervorgerufenen Unterschiede:

- a) Im Fall der Berechnung der Auswirkung der Sonnenposition wurden die Indexwerte der pro Tag erfassten Messzyklen auf der Basis der Beobachtungsposition in Gruppen zusammengestellt. Auf diese Weise enthielt eine Beobachtungspositions-Gruppe die Indexwerte unterschiedlicher Sonnenstände, aber einer einzigen Beobachtungsposition.
- b) Im Fall der Berechnung der Auswirkung der Beobachtungsposition wurden die Indexwerte der am Tag erfassten Messzyklen auf der Basis der Sonnenposition in Gruppen zusammengestellt. Auf diese Weise enthielt eine Sonnenpositions-Gruppe die Indexwerte aller Beobachtungspositionen, aber zu der jeweils einzelnen Sonnenposition.
- c) Der minimale und der maximale Indexwert jeder der formierten Beobachtungspositions- (MINb und MAXb) und Sonnenpositions-Gruppen (MINs und MAXs) wurden ausgesucht.
- d) Die Quotienten DIFb und DIFs wurden entsprechend zwischen MAXb und MINb und zwischen MAXs und MINs nach der Formel 14.a gebildet. Im Fall des Vegetationsindex „HWP“ wurde ausnahmsweise die Formel 14.b für die Berechnung der Unterschiede zwischen MAXb und MINb und zwischen MAXs und MINs verwendet.

$$DIF_x [\%] = \left\{ \frac{MAX_x}{MIN_x} - 1 \right\} * 100 \quad \text{Formel 14.a}$$

$$DIF_x [nm] = MAX_x - MIN_x \quad \text{Formel 14.b}$$

(x: s oder b)

- e) Je nach Entwicklungsstadium (bzw. Messtag), Vegetationsperiode und Vegetationsindex wurden aus den berechneten DIFb aller Beobachtungspositions-Gruppen der maximale und der minimale DIFb ausgesucht. Dasselbe geschah mit den berechneten DIFs aller Sonnenpositions-Gruppen.

#### 4.4.4 Auswahl relevanter Wellenlängen

Das richtungsabhängige Reflexionsverhalten der für die Bildung der ausgewählten Vegetationsindizes beteiligten Wellenlängenbereiche (s. Kapitel 4.4.3) war Kernpunkt der Untersuchungen. Zwei Tatsachen beeinflussten die Untersuchungsmethodik:

- a) Die Wellenlängenabhängigkeit des richtungsabhängigen Reflexionsverhaltens (Kriebel, 1996a; Sandmeier, 1998a) und
- b) die hohe Korrelation von Reflexionswerten benachbarter Wellenlängenbereiche vegetationsbedeckter Oberflächen (Baret, 1995).

Dem zu Folge wurde überprüft, in welchem Ausmaß sich die Datenmenge bzw. die Anzahl der zu untersuchenden Wellenlängen reduzieren lässt, ohne die fachliche Aussage über das richtungsabhängige Reflexionsverhalten der für die Bildung der ausgewählten Vegetationsindizes beteiligten Wellenlängenbereiche zu beeinträchtigen. Die Auswahl repräsentativer Wellenlängen in diesen Wellenlängenbereichen geschah folgendermaßen:

- 1) Das Kriterium für die Richtungsabhängigkeit der Reflexion je nach Wellenlänge gewährleistete die Bildung eines Anisotropie-Quotienten je nach Wellenlänge ( $AQ_\lambda$ ):

$AQ_\lambda$  ist der Quotient zwischen dem vorwärts gerichteten  $HDRF_{(\varphi^\circ, \theta_r^\circ)}$  an einem bestimmten Beobachtungsazimutwinkel ( $\varphi^\circ$ ) und -zenitwinkel ( $\theta_r^\circ$ ) (z.B.  $0^\circ$  Azimut und  $30^\circ$  Zenitwinkel) und dem rückwärts gerichteten  $HDRF_{(\varphi^\circ+180^\circ, \theta_r^\circ)}$  des entsprechenden gegenüberliegenden Beobachtungsazimutwinkels ( $\varphi^\circ+180^\circ$ ) und -zenitwinkels ( $\theta_r^\circ$ ) (z.B.  $180^\circ$  Azimut und  $30^\circ$  Zenitwinkel) :

$$AQ_\lambda = \frac{HDRF_{(\varphi^\circ, \theta_r^\circ)}}{HDRF_{(\varphi^\circ+180^\circ, \theta_r^\circ)}} \quad \text{Formel 15}$$

$AQ_\lambda$  liefert die Information über die räumliche Verteilung des Strahlungsflusses bzw. ist eine Art Maßstab der auftretenden Anisotropie je nach Beobachtungsazimutebene, Beobachtungszenitwinkel und Wellenlänge.

Auf diese Weise wurden pro Beobachtungsazimutebene innerhalb jedes Messzyklus  $AQ_\lambda$ -Werte für jedes Beobachtungszenitwinkelpaar ( $\theta_r^\circ$  in der Vorwärts- und  $\theta_r^\circ$  in der Rückwärtsstreurichtung) berechnet.

- 2) Es folgte ein iterativer Prozess, der auf den Vergleich der zu einem Beobachtungszenitwinkelpaar gehörenden  $AQ_\lambda$ -Werte untereinander zielte:

Der  $AQ_\lambda$  jeder Wellenlänge (Bezugs-Wellenlänge) wurde mit jeder der übrigen Wellenlängen (Prüf-Wellenlänge) verglichen. „Ähnlichkeits“-Prozentwerte (DIF) wurden zwischen jeweils zwei  $AQ_\lambda$  nach der Formel 16 berechnet:

$$DIF [\%] = \left| \left\{ \frac{AQ_\lambda A - AQ_\lambda B}{\max(AQ_\lambda A, AQ_\lambda B)} \right\} * 100 \right| \quad \text{Formel 16}$$

( $AQ_\lambda A$ :  $AQ$  der überprüften Wellenlänge,  $AQ_\lambda B$ :  $AQ$  der Bezugs-Wellenlänge,  $\max()$ : maximaler Wert der beiden  $AQ_\lambda$  in Klammern)

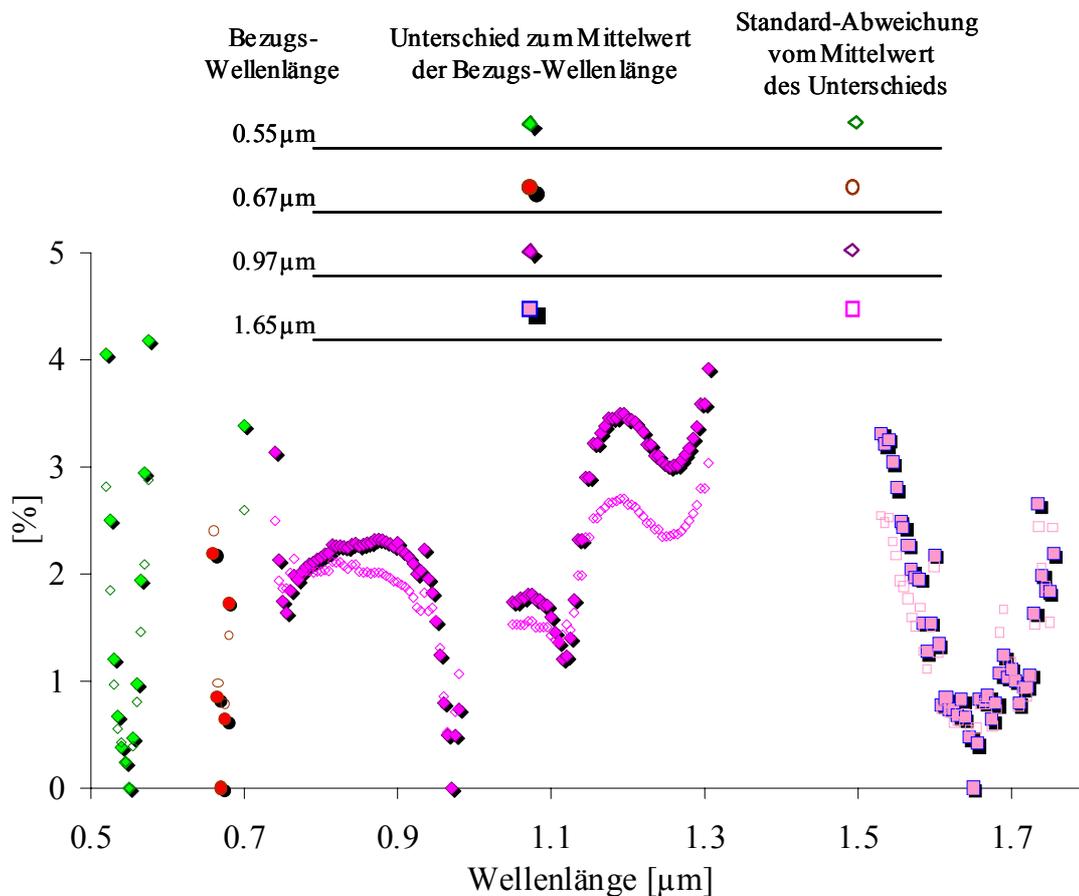
DIF-Werte wurden für alle Beobachtungszenitwinkelpaare in jedem untersuchten Messzyklus in beiden Vegetationsperioden berechnet.

- 3) Alle berechneten DIF wurden pro Wellenlänge, ohne Rücksicht auf Beobachtungsposition, Messzyklus, Entwicklungsstadium, Standort und Vegetationsperiode, in einer Gruppe zusammengestellt und gemittelt. Dazu wurde die Standard-Abweichung vom Mittelwert berechnet.

Auf diese Weise sind zwei Tabellen entstanden:

- Die eine Dimension jeder Tabelle gibt die Bezugs-Wellenlängen und die andere die überprüften Wellenlängen wieder.
  - Die eine Tabelle enthielt die DIF-Mittelwerte.
  - Die zweite Tabelle enthielt die Standard-Abweichungen.
- 4) Ein DIF-Mittelwert von weniger als 5% mit einer Standard-Abweichung von weniger als 3% wurde als Kriterium für die Gruppierung der Prüf-Wellenlängen im Verhältnis zu jeder Bezugs-Wellenlänge angenommen. Auf diese Weise wurden die Wellenlängen bzw. Wellenlängenbereiche aufgespürt, bei denen sich die Reflexion im Sinne der Richtungsabhängigkeit „ähnlich“ verhielt.
- 5) Die spezifische Wellenlänge innerhalb jeder dieser Wellenlängengruppen wurde ausgewählt, die am besten das richtungsabhängige Reflexionsverhalten der übrigen Wellenlängen bzw. Wellenlängenbereiche in der Gruppe repräsentieren konnte.

Auf diese Weise wurden die Wellenlängen  $0.55\mu\text{m}$ ,  $0.67\mu\text{m}$ ,  $0.97\mu\text{m}$  und  $1.65\mu\text{m}$  zur Repräsentation des richtungsabhängigen Reflexionsverhaltens der für die Bildung der ausgewählten Vegetationsindizes beteiligten Wellenlängenbereiche ausgesucht. Anhand dieser Wellenlängen werden detaillierte Ergebnisse in den Kapiteln 5 und 6 sowie im Anhang dargestellt.



**Abbildung 37.** Relevante Wellenlängen zur Ermittlung des richtungsabhängigen Reflexionsverhaltens und die damit korrelierten Wellenlängen.

$AQ_\lambda$ -Werte wurden zusätzlich für die übrigen zur Verfügung stehenden Wellenlängen (s. Kapitel 4.4.2) berechnet. Mit Hilfe der oben erwähnten Kriterien wurde das Ausmaß der Korrelation des richtungsabhängigen Reflexionsverhaltens dieser Wellenlängen mit demjenigen der vier ausgewählten Wellenlängen abgeschätzt. Wie in der Abbildung 37 dargestellt ist, besteht die Möglichkeit, die Ergebnisse der Untersuchung des richtungsabhängigen Reflexionsverhaltens der für die Bildung der ausgewählten Vegetationsindizes beteiligten Wellenlängenbereiche zu breiteren Wellenlängenbereichen zu übertragen.

#### 4.4.5 Approximation der Reflexionsverteilungsfunktion (BRDF)

Die BRDF wurde durch Interpolation zwischen den HDRF jedes Messzyklus, zwischen den Messzyklen im Tagesverlauf und zwischen den Entwicklungsstadien approximiert:

- 1) Die Anzahl der 21 Reflexionsmessungen über dem Bestand pro Messzyklus (s. Kapitel 4.2.2) sowie der zusätzlichen 12 simulierten Reflexionsmessungen aufgrund der Annahme, dass die Sonnenhauptebene auch die Symmetrieebene des Reflexionsverteilungsfelds ist (s. Kapitel 4.2.1), gewährleisteten nach Barnsley (1994) die Ermittlung der Reflexionsverteilungsfunktion (BRDF) pro Sonnenzenitdatensatz (s. Kapitel 4.4.2) mit mittlerer Abweichung von weniger als 5% (Abbildung 38).
- 2) Die Anzahl der pro Entwicklungsstadium bzw. Messtag erfassten Messzyklen ermöglicht die Ermittlung von Messwerten für jeden beliebigen Sonnenzenitwinkel, der innerhalb der tatsächlich gemessenen Winkelbereiche liegt (Martonchik, 1994).
- 3) Die regelmäßige Verteilung der Messtermine an wichtigen Stadien für die Entwicklung der Pflanzen in der Vegetationsperiode lässt Rückschlüsse über die Reflexionsverteilung der übrigen Entwicklungsstadien zu, die sich zwischen den tatsächlichen Messterminen in der Vegetationsperiode befinden.

##### 4.4.5.1 Quantitative Auswertung der Schwankungen der „Off Nadir“-Reflexion

Ausgehend von den approximierten BRDFs

- 1) wurde die Schwankungsbreite der „Off Nadir“-Reflexion an einem Standort mit Hilfe des „Anisotropie-Faktors“ (ANIF) quantitativ abgeschätzt.

ANIF wurde von Sandmeier et al. (1998a) eingeführt und ist ein quantitatives Maß der Ab- oder Zunahme der Reflexion je nach Reflexionsrichtung. ANIF ist der Quotient zwischen den HDRF an irgendeiner „Off Nadir“-Beobachtungsposition und dem HDRF, der über der Nadir-Position ( $HDRF_0$ ) aufgenommen wurde (Formel 17).



$$ANIF(\lambda, \theta_e, \phi_e, \theta_r, \phi_r) = \frac{HDRF(\lambda, \theta_e, \phi_e, \theta_r, \phi_r)}{HDRF_0(\lambda, \theta_e, \phi_e)} \quad \text{Formel 17}$$

( $\lambda$ : Wellenlänge,  $\theta_e$ : Zenitwinkel der Sonneneinstrahlung,  $\phi_e$ : Azimutwinkel der Sonneneinstrahlung,  $\theta_r$ : Zenitwinkel der zur Beobachtungsposition reflektierten Strahlung,  $\phi_r$ : Azimutwinkel der zur Beobachtungsposition reflektierten Strahlung)

Für jeden Standort wurden ANIF auf Basis der Beobachtungszimutebene bei allen Beobachtungszenitwinkeln zwischen  $60^\circ$  in der Vorwärts- und  $60^\circ$  in der Rückwärtsstreureichtung berechnet. Dieser Prozess umfasste alle Messtage in  $10^\circ$ -Schritten des Sonnenzenitwinkels. Eine feinere Auflösung als  $10^\circ$  würde die Auswertung eher erschweren als verbessern. Die  $10^\circ$ -Schritte des Sonnenzenitwinkels wurden nach der im Kapitel 4.4.2 beschriebenen Methodik ausgewählt.

- 2) wurden die Unterschiede der Reflexionsverteilung ( $UR_\lambda$ ) zwischen den Standorten hohen (HE) und niedrigen (NE) Ertrags mit Hilfe der Formel 18 berechnet.

$$UR_\lambda [\%] = \frac{FA_{HE} - FA_{NE}}{\max(FA_{HE}, FA_{NE})} * 100 \quad \text{Formel 18}$$

(FA:  $HDRF(\lambda, \theta_e, \phi_e, \theta_r, \phi_r)$  oder  $ANIF(\lambda, \theta_e, \phi_e, \theta_r, \phi_r)$  je nach Darstellungsart und -zweck,  $\max()$ : Maximal FA aus den beiden FA in Klammern)

#### 4.4.5.2 Graphische Darstellung

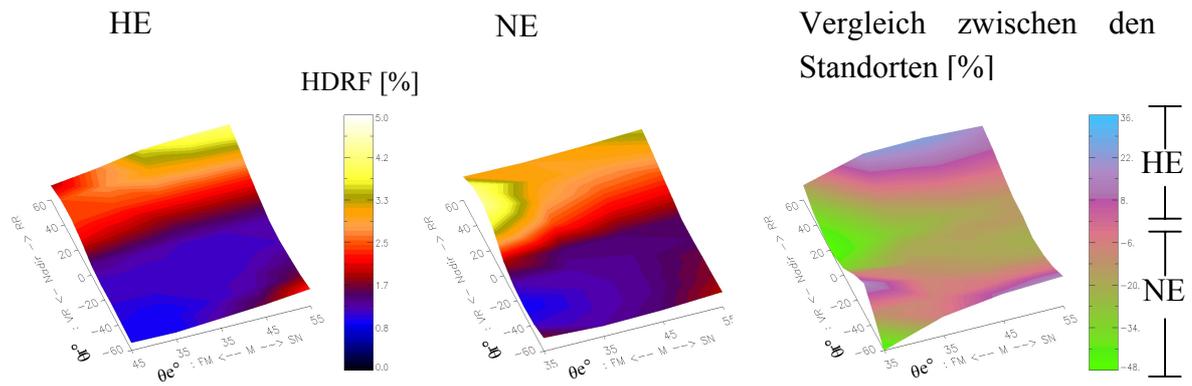
Die Beschreibung und Auswertung des richtungsabhängigen Reflexionsverhaltens über den untersuchten Winterweizenbeständen wurde mit Hilfe von zwei- und dreidimensionalen Darstellungen ermöglicht. Unterschiedliche Plotformen wurden entworfen, wie z.B. diejenige in den Abbildungen 38 oder 39.

Für die detailliertere Darstellung und grundsätzliche Analyse der Ergebnisse wurden jedoch zweidimensionale Diagramme des ANIF oder HDRF statt dreidimensionaler Plots bevorzugt (s. z.B. im Anhang). Die zweidimensionalen Diagramme sind

- kontrastreicher hinsichtlich der Trennbarkeit zwischen den darstellbaren Informationen,
- genauer bezüglich der Lokalisierung von Reflexionsmerkmalen und
- übersichtlicher im Bezug auf die Vergleichbarkeit zwischen zeitlich und räumlich unterschiedlichen BRDF-Daten.

Die zweidimensionalen Diagramme des ANIF oder HDRF in den folgenden Kapiteln beziehen sich auf die

- Beobachtungszimutebene parallel zur Sonnenhauptebene (Beobachtungszimutwinkel  $\phi^\circ$ :  $0^\circ / 180^\circ$ ).
- um  $45^\circ$  zur Sonnenhauptebene gedrehte Beobachtungszimutebene ( $\phi^\circ$ :  $45^\circ / 225^\circ$ ).
- um  $90^\circ$  zur Sonnenhauptebene gedrehte Beobachtungszimutebene ( $\phi^\circ$ :  $90^\circ / 270^\circ$ ).



$\theta_r^\circ$  : Beobachtungszenitwinkel, VR : Vorwärtsstreureichtung, RR : Rückwärtsstreureichtung,  
 $\theta_e^\circ$  : Sonnenzenitwinkel, FM : Früher Vormittag, M : Mittag, SN : Später Nachmittag

**Abbildung 39.** Beispiel dreidimensionaler verwendeter Plots: Reflexionsverteilung in der Vegetationsperiode 2000, bei Entwicklungsstadium EC32 und  $0.67\mu\text{m}$  und die Reflexionsunterschiede zwischen den Standorten (nach Formel 18). (HE & NE: Standorten hohen und niedrigen Ertrags entsprechend).

#### 4.5 INTEGRATION DER ABGELEITETEN INFORMATION IN DIE TEILSCHLAGBEWIRTSCHAFTUNG

Die Integration der Erkenntnisse aus der beobachteten Reflexionsverteilung in Entscheidungsunterstützungsketten erfolgt durch

- 1) Aufbau und Anwendung von BRDF-Kalibrierungsdatenbanken und / oder
- 2) Entwicklung und Anpassung von Reflexionsmodellen.

Neben der Gründung einer BRDF-Datenbank mit den approximierten BRDF und den vorhandenen Begleitdaten wurden die approximierten BRDF verwendet, um das PROSAIL-Modell (s. Kapitel 3.3.2.1) zu invertieren und das AMBRALS-Modell (s. Kapitel 3.3.2.2) anzupassen.

##### 4.5.1 Inversion des PROSAIL-Modells

Durch die Inversion des PROSAIL-Modells (s. Kapitel 3.3.2.1) wurden die bio-chemo-physikalischen Variablen des Winterweizenbestandes ( $N$ ,  $C_{ab}$ ,  $C_w$ ,  $C_m$ ,  $BFI$ ,  $\theta_l$ ,  $s_l$ ,  $\rho_s$ ) je nach Standort, Sonnenstand, Entwicklungsstadium und Vegetationsperiode ermittelt. Diese wurden mit „in situ“ gemessenen Werten derselben Variablen verglichen. Auf diese Weise wurde die Aussagegenauigkeit des Modells kontrolliert.

Die Inversion des PROSAIL-Modells fand nach der Inversionsmethode der simulierten Verstärkung („simulated annealing“) statt (Bacour et al., 2001a). Ziel dieser

Inversionsmethode ist das Erreichen des globalen Minimums einer Gleichung von x Variablen (Kirkpatrick et al., 1983):

- am Anfang wird ein Wert für die gesuchten Bestandesvariablen angenommen.
- mit Hilfe eines Quasi-Newton-Algorithmus („routine“ EO4jyf der NAG „library“) wird der multidimensionale Raum der unabhängigen Variablen arithmetisch durchsucht, um das Minimum zwischen tatsächlich gemessener Reflexion und simulierter Reflexion bzw. das Minimum der Gleichung von  $\chi^2$  zu erreichen (Anpassung des Modells) (Formel 19).

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^{n_v} \sum_{\lambda=1}^{wl} \left[ \frac{\rho_{meas}^j(\lambda) - \rho_{mod}^j(\lambda, \Theta)}{\rho_{meas}^j(\lambda)} \right]^2 \quad \text{Formel 19}$$

( $n_v$ : Anzahl der Beobachtungsrichtungen,  $wl$ : Anzahl der Wellenlängen,  $\rho$ : Reflexion,  $meas$ : gemessen,  $mod$ : simuliert,  $\lambda$ : Wellenlänge,  $\Theta$ : Vektor der gesuchten Variablen)

- jedes erreichte Minimum wird akzeptiert und der Algorithmus beginnt erneut mit diesem Minimum als Startwert. Im Falle eines lokalen Minimums, welches das Metropolis-Kriterium erfüllt (Bacour et al. (2001a) zitiert in Metropolis et al. (1953)), tritt der Optimierungsprozess einen Schritt zurück.
- im weiteren Verlauf des Optimierungsprozesses lässt die Wahrscheinlichkeit der Akzeptanz eines lokalen Minimums nach. Auf diese Weise läuft der Optimierungsprozess auf ein globales Minimum zu (Goffe, 1996).

#### 4.5.2 Anpassung des AMBRALS-Modells

Mit der Anpassung des AMBRALS-Modells (s. Kapitel 3.3.2.2) wurde die Möglichkeit untersucht, ob das Modell für die Simulation der Reflexionsverteilung über den untersuchten Winterweizenbeständen geeignet ist. Für den operationellen Betrieb soll damit eine Normalisierung des Signals auf die Nadir-Reflexionsrichtung erreicht werden.

Der Prozess der Anpassung des AMBRALS-Modells an die approximierten BRDF lässt sich folgendermaßen beschreiben:

- 1) Kernelkombinationen werden aus den Kernelvarianten der Ross- und Li-Kernel ausgewählt (s. Kapitel 3.3.2.2).
- 2) Mit Hilfe jeder Kernelkombination wird die Reflexionsverteilung simuliert und das Minimum zwischen der tatsächlich gemessenen Reflexion (bzw. approximierten BRDF) und der simulierten Reflexion durch die Justierung der empirischen Koeffizienten berechnet. Die Berechnung des Minimums wird mit Hilfe der Gleichung von RMSE durchgeführt (Formel 20).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{wv} \sum_{i=1}^{wv} \frac{1}{N - n_p} \sum_{j=1}^N \frac{(R_j^{meas} - R_j^{mod})^2}{GF_j}}$$

**Formel 20**

(wv: Anzahl der Wellenlänge, N: Anzahl der Reflexionsmessungen, n<sub>p</sub>: Anzahl der Parameter des Modells, R: Reflexion, meas: gemessen, mod: simuliert, GF: Gewichtungsfaktor {meistens GF=1})

3) Die beste Kernelkombination bzw. die Kernelkombination mit dem kleinsten RMSE-Wert wird ausgewählt und für die Simulation der Reflexionsverteilung vorgeschlagen.

Die Eingabedatensätze zur Anpassung des AMBRALS-Modells stammten aus den approximierten BRDF je nach Standort und untersuchtem Entwicklungsstadium. Die Reflexionsverteilung wurde in 10°-Schritten des Sonnenzenitwinkels berücksichtigt. Die zum Vormittag gehörenden Reflexionsverteilungen wurden getrennt von den zum Nachmittag gehörenden Reflexionsverteilungen ins Modell eingeführt. Auf diese Weise wurde die optimale Kernelkombination pro Vormittag oder Nachmittag und je nach Standort und Entwicklungsstadium samt der statistischen Auswertung ermittelt.

#### 4.6 SOFTWARE

Die Software, die für diese Arbeit verwendet wurde, besteht aus derjenigen,

- 1) die für die Durchführung der Reflexionsmessungen “in situ” mit MUFSPeM eingesetzt wurde:
  - Für die Steuerung des Spektroradiometers und die Registrierung der Reflexion wurde die GER3700-Software benutzt.
  - Der Schwenk/Neige-Kopf wurde durch die Software des Prototypentwicklers R. Kilgenstein betrieben.
- 2) die für die Daten- und Bildbearbeitung angewendet wurde:
  - Die Aufbereitung der Daten erfolgte mit Programmen, die mit Hilfe der IDL-Programmiersprache (Interactive Data Language), Version 5.2.1 der Firma Research Systems Inc., vom Autor dieser Dissertation entwickelt wurden.
  - Die statistische Datenanalyse wurde von SPSS, Version 10.0 unterstützt.
  - Die zwei- und dreidimensionale Darstellung der Ergebnisse wurde durch eine Reihe von speziell dafür entworfenen IDL-Programmen ermöglicht, die hauptsächlich vom Dr. S. Sandmeier (RSL/NASA) und Dr. U. Beisl (DLR/RSL) entwickelt wurden.
  - Die Bearbeitung der aufgenommenen Bilder wurde mit der ENVI-Software (The Environment for Visualizing Images), Version 3.2 der Firma Research Systems Inc., und der Xspace-Software, Version 7.0.0 der Firma PCI, durchgeführt.

- 3) die für den Einsatz von Reflexionsmodellen benutzt wurde:
- Der verwendete PROSAIL-Code wurde mit der Anwendung der Programmiersprache von Fortran (Fortran Company) von Dr. S. Jacquemoud & Dr. C. Bacour von der Universität Paris, Dr. F. Baret vom „Institut National de la Recherche Agronomique“ in Avignon und Dr. A. Kuusk vom „Tartu Observatory“ in Estonia entwickelt und mit Hilfe eines Quasi-Newton-Algorithmus („routine“ EO4jyf der NAG „library“) (Bacour et al., 2001a) invertiert.
  - Das AMBRALS-Modell wurde mit Hilfe von Programmen eingesetzt, die von Dr. U. Beisl in der IDL-Programmiersprache entwickelt wurden.

## 5 ERGEBNISSE

Die Messungen wurden unter Freilandbedingungen unter mitteleuropäischen Verhältnissen durchgeführt und sind allein schon durch wechselnde äußere Rahmenbedingungen gewissen Grundschwankungen unterworfen.

Unabhängig von der Blickrichtung rufen bereits die Änderung der Sonnenposition im Laufe des Tages und der aufgrund des Messaufbaus notwendige Positionswechsel zum Erreichen der Sonneneinstrahlungsparallelen Startposition des Messzyklus (s. Kapitel 4.2.2) Änderungen im Anteil der Vegetation, des Schattenwurfs und des Bodens im Blickfeld des Sensors hervor (Tabelle 2). Allein diese tageszeitlichen und messsystem-immanenten Schwankungen betragen im Fall des Beispiels in der Tabelle 2 beim Standort niedrigen Ertrags um die 8% beim Pflanzen-, 6% beim Schatten- und 5% beim Bodenanteil. Das Wachstum und Reifen des Pflanzenbestandes im Laufe einer Vegetationsperiode überlagert diese Änderungen zusätzlich. Die Größenordnungen dieser auf die natürliche Bestandesentwicklung zurückzuführenden und daher für die Diagnose des Zustands und die Ableitung der Bestandesparameter relevanten Veränderungen sind in Tabelle 3 als Tagesmittelwerte über die Vegetationsperioden 2000 und 2001 zusammengefasst.

	Vormittag		← Mittag →		Nachmittag	
Sonnenazimut [°]	103	114	207	223	245	255
Sonnenzenit [°]	55	47	33	37	47	53
Pflanzenanteil [%]	65	68	67	68	73	69
Bodenanteil [%]	8	7	11	9	6	7
Schattenanteil [%]	27	25	22	23	21	24
	NE	HE	NE	HE	NE	HE

**Tabelle 2.** Beispiel der Änderungen der Bestandeshauptkomponenten im Blickfeld des Sensors, im Laufe des Tages, bei EC32, in der Vegetationsperiode 2001 (pro m<sup>2</sup>). (HE: Standort hohen Ertrags, NE: Standort niedrigen Ertrags).

	Entwicklungsstadien												
	Vegetationsperiode 2000						Vegetationsperiode 2001						
	EC 29	EC 30	EC 32	EC 39	EC 51	EC 65	EC 71	EC 21	EC 30	EC 32	EC 39	EC 51	EC 71
Vegetationsanteil % pro m <sup>2</sup> (Tagesmittelwert*)	43	49	69	74	73	78	78	23	49	68	71	74	78
Bodenanteil % pro m <sup>2</sup> (Tagesmittelwert*)	48	36	5	3	0	0	0	63	31	8	5	0	0
Schattenanteil % pro m <sup>2</sup> (Tagesmittelwert*)	9	15	26	22	27	22	22	14	20	24	24	26	22

\* : in Abhängigkeit mit der Zeit und der Anzahl der verfügbaren Aufnahmen am und pro Messtag

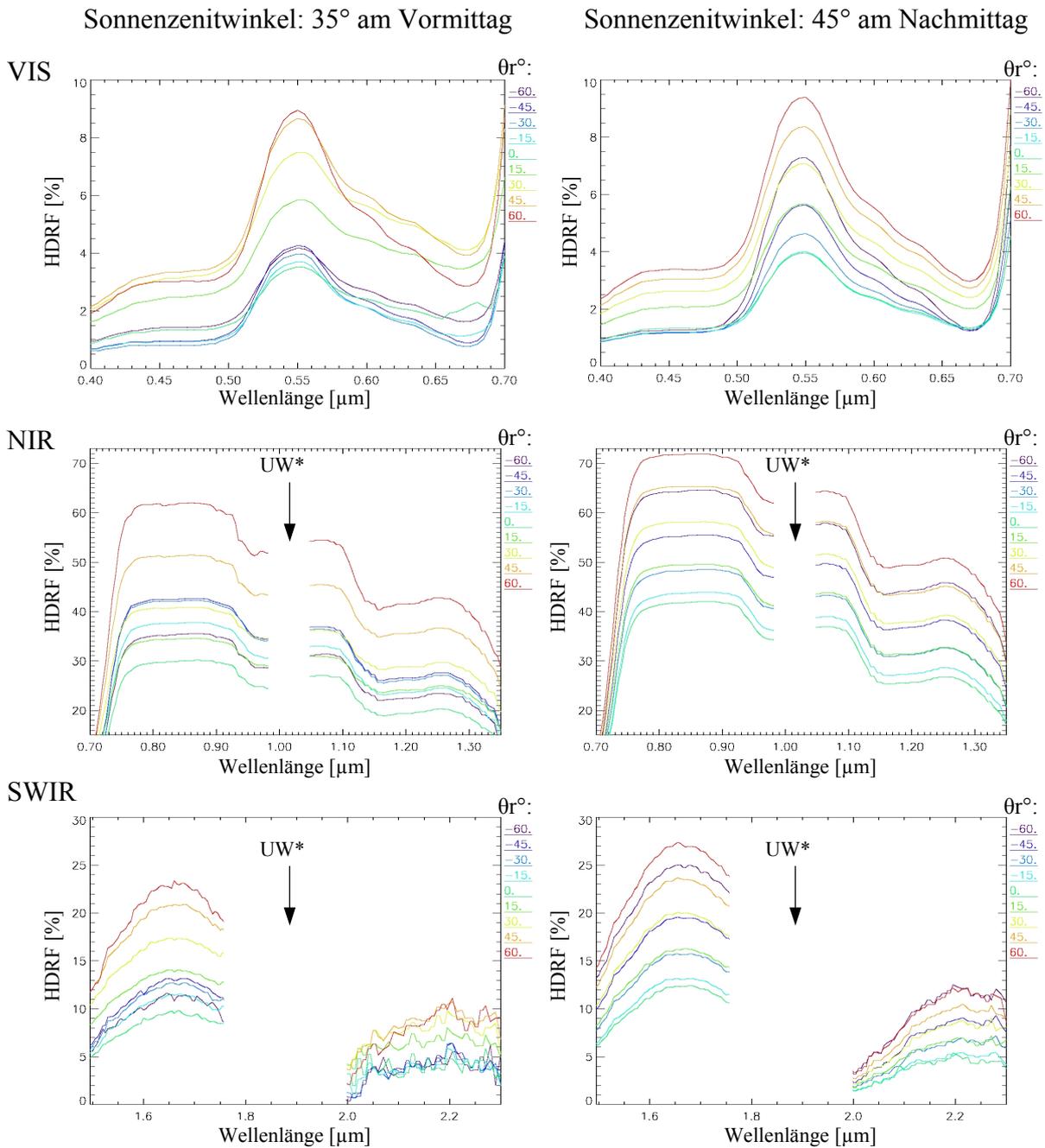
**Tabelle 3.** Die Hauptkomponenten des Bestandes pro Entwicklungsstadium, die an der Zusammensetzung der registrierten Reflexion pro m<sup>2</sup> beteiligt waren.

Diese tageszeitlichen Schwankungen der Anteile der Hauptkomponenten des Bestands im Blickfeld des Sensors aufgrund des Wechsels der Sonnenposition mussten für das Erreichen der als eine der Haupt-Zielsetzungen dieser Arbeit genannte Approximation der BRDF durch feldspektroradiometrische Messungen erfasst werden. Deswegen wurde nach dem im Kapitel 4.2 beschriebenen Schema mindestens an drei, zeitlich möglichst weit auseinander liegenden Zeitpunkten die gerichtete Reflexion gemessen. Zusätzlich sollte die Mittagsmessung möglichst zeitnah am Sonnenhöchststand durchgeführt werden, da dieser den Umkehrpunkt der zum Messsignal beitragenden Hauptkomponenten-Verteilung des Bestandes markiert (s. Tabelle 2). Unsicherheiten bestehen bezüglich des tatsächlichen Umkehrpunktes zum Sonnenhöchststand, der aus logistischen Gründen - es gab ja immer mindestens zwei Messstellen (ein Standort hohen Ertrags und ein Standort niedrigen Ertrags), an denen um diesen Zeitpunkt herum gemessen werden sollte - nicht immer erreicht werden konnte, aber auch bezüglich der Rahmenbedingungen (s. Kapitel 4.2.3), wie z.B. konstante Einstrahlungsbedingungen oder Windverhältnisse.

In welchen Größenordnungen sich die Muster der Reflexionsverteilung zwischen zwei Messzyklen desselben Tages ändern (bei wechselndem Sonnenstand) und die Signalunterschiede bei wechselndem Blickwinkel liegen, ist in Abbildung 40 zu sehen. Jeweils in die drei Wellenlängenbereiche des Sichtbaren Lichtes (VIS), des Nahen Infrarots (NIR) und des Kurzwelligen Infrarots (SWIR) getrennt, um eine bessere Detailerkennbarkeit der Signaturen zu erreichen, sind ein Messzyklus des Standortes niedrigen Ertrags bei 35° Sonnenzenitwinkel am Vormittag und ein Messzyklus bei 45° Sonnenzenitwinkel am Nachmittag dargestellt, beide aus der Vegetationsperiode 2000 bei EC Stadium 32, dem zwei Knoten – Stadium der Vegetationsentwicklung bei Getreide. Unterschiede in der Reflexionsintensität von über 400% im blauen Wellenlängenbereich und immerhin noch ca. 250% im SWIR und über 100% von sehr hohem Grundniveau im NIR wurden gemessen. Bei höherem Sonnenstand (Sonnenzenitwinkel von 35°) sind die Unterschiede größer. Der jeweils tiefste Intensitätswert wird nicht bei 0° Messzenitwinkel gemessen, sondern bei kleinen Blickzenitwinkeln in Vorwärtsstreureichtung.

Erwähnenswert ist, dass sich nicht nur die Intensitätswerte ändern, sondern, und das vor allem im VIS, auch der Verlauf der Signaturkurve unterschiedliche Charakteristiken aufweist. Auffällig ist dieses zwischen Grün Maximum und dem Chlorophyllabsorptionsbereich im Roten, wo die Steigung der Signaturkurve deutlich unterschiedlich ausfällt und als Hinweis auf Vitalitätsunterschiede gedeutet werden könnte. Das lokale Maximum im Rotbereich der Nadirmessung des Vormittagsmesszyklus ist als Messfehler zu deuten.

Betrachtet man nun eine weitere Zielsetzung dieser Arbeit, die Quantifizierung der Reflexionsunterschiede zwischen den Standorten hohen (HE) und niedrigen (NE) Ertrags, kann die deutlichste Darstellung über die Differenzbildung entsprechender Blickwinkel bei vergleichbarem Sonnenstand erreicht werden (s. Abbildung 41). Die Differenzbildung erfolgte nach Formel 18 (s. Kapitel 4.4.5.1). Vergleichbarer Sonnenstand wird über die in Kapitel 4.4.2 beschriebene Vorgehensweise erreicht.



\*UW: Unberücksichtigter Wellenlängenbereich (s. Kapitel 4.4.2)

**Abbildung 40.** Beispiel für die Änderung des HDRF (hemispherical directional reflection factor), gemessen in der Sonnenhauptebene mit wechselndem Beobachtungszenitwinkel ( $\theta_r^\circ$ ) bei zwei Sonnenständen, bei EC32 in der Vegetationsperiode 2000, am Standort niedrigen Ertrags.

Bei Interpretation der Signaturkurven der Differenzbeträge (Abbildung 41) fällt erst einmal das Rauschen im SWIR Bereich auf, das auf die geringe radiometrische Leistungsfähigkeit des SWIR 2 Detektors (2er PbS-Detektor, s. Kapitel 4.1.2) zurückzuführen ist. Auch wenn Tendenzen erkennbar sind, ist eine Interpretation im Bereich oberhalb 2.0 µm daher nicht mehr möglich. Bedauerlicher Weise gilt dieses generell für beide Vegetationsperioden, womit

für diesen Wellenlängenbereich lediglich qualitative aber keine quantitative Aussagen getroffen werden können. Für die anderen Bereiche gilt, dass bei der gewählten Berechnung negative Werte höhere HDRFs für den Standort NE repräsentieren. Des Weiteren fällt die Differenzkurve für den Blickwinkel  $-60^\circ$  des Vormittagsmesszyklus auf, die sowohl was die Kurvenform im VIS als auch die hohen positiven Werte im NIR und SWIR betrifft, aus dem Rahmen fällt. Da beim Nachmittagsmesszyklus keine vergleichbare Charakteristik beobachtet werden kann, muss diese Differenzkurve als Ausreißer betrachtet werden und fließt nicht in die allgemeine Diskussion ein.

Im VIS des Vormittagsmesszyklus pausen sich die Chlorophyllabsorptionsbereiche durch. Negative Differenzbetragswerte weisen eindeutig auf geringeren Chlorophyllgehalt des Standortes niedrigen Ertrags (NE) hin. Ein höherer Bodenanteil ist an der Kurvencharakteristik bei  $0^\circ$  und  $-15^\circ$  Beobachtungswinkel abzulesen, die nach einem Plateau im Grün- bis Orange Bereich einen deutlichen Chlorophyllabsorptionsbereich im Roten abbildet. Da diese Auffälligkeit mit negativen Differenzwerten einhergeht, kann geschlossen werden, dass am NE Standorte ein höherer Bodenanteil zum Signal beiträgt. Der Nachmittags-Messzyklus zeigt deutlich eine geringere Schwankungsbreite der Differenzbeträge. Im Nachmittagsmesszyklus ganz deutlich ablesbar ist die Tendenz, dass mit zunehmendem Blickwinkel der Differenzwert ins Positive wandert. Dieses deutet auf höhere HDRFs für Standorte höheren Ertrags (HE) hin.

Im NIR Bereich liegen die Differenzwerte generell im positiven Wertebereich. Bei angenommen höherer Biomasse des HE Standortes ist das plausibel. Je nach Tageszeitpunkt am Vormittag und Nachmittag ändert sich die Höhe der Differenzwerte der Blickrichtungen (kleiner oder größer) im Verhältnis zueinander.

Die Tendenz im SWIR 1 Bereich (1er PbS-Detektor, s. Kapitel 4.1.2) ist dahingehend, dass die Differenzwerte mit zunehmendem Blickwinkel aus dem negativen in den positiven Bereich wandern. Die Nadirmessung dagegen zeigt geringfügige Unterschiede zwischen den Standorten.

Obige Beispiele sollten einen kleinen Einblick bieten, welcher Aufwand bei der Beurteilung der Qualität der Datenbasis, bestehend aus den einzelnen Spektralkurven, über die Messzyklen zur Erfassung einer Hemisphäre, der Berechnung der BRDF für ein bestimmtes Entwicklungsstadium und einen Standort bis hin zur Interpretation der Daten unter Hinzuziehen der Begleitmessungen notwendig war. Erst anschließend konnte man sich der eigentlichen Aufgabe zuwenden, die darauf abzielte, die Konsequenzen gerichteter Messungen auf die Ableitung von Bestandesmerkmalen einzugrenzen und wenn möglich zu quantifizieren.

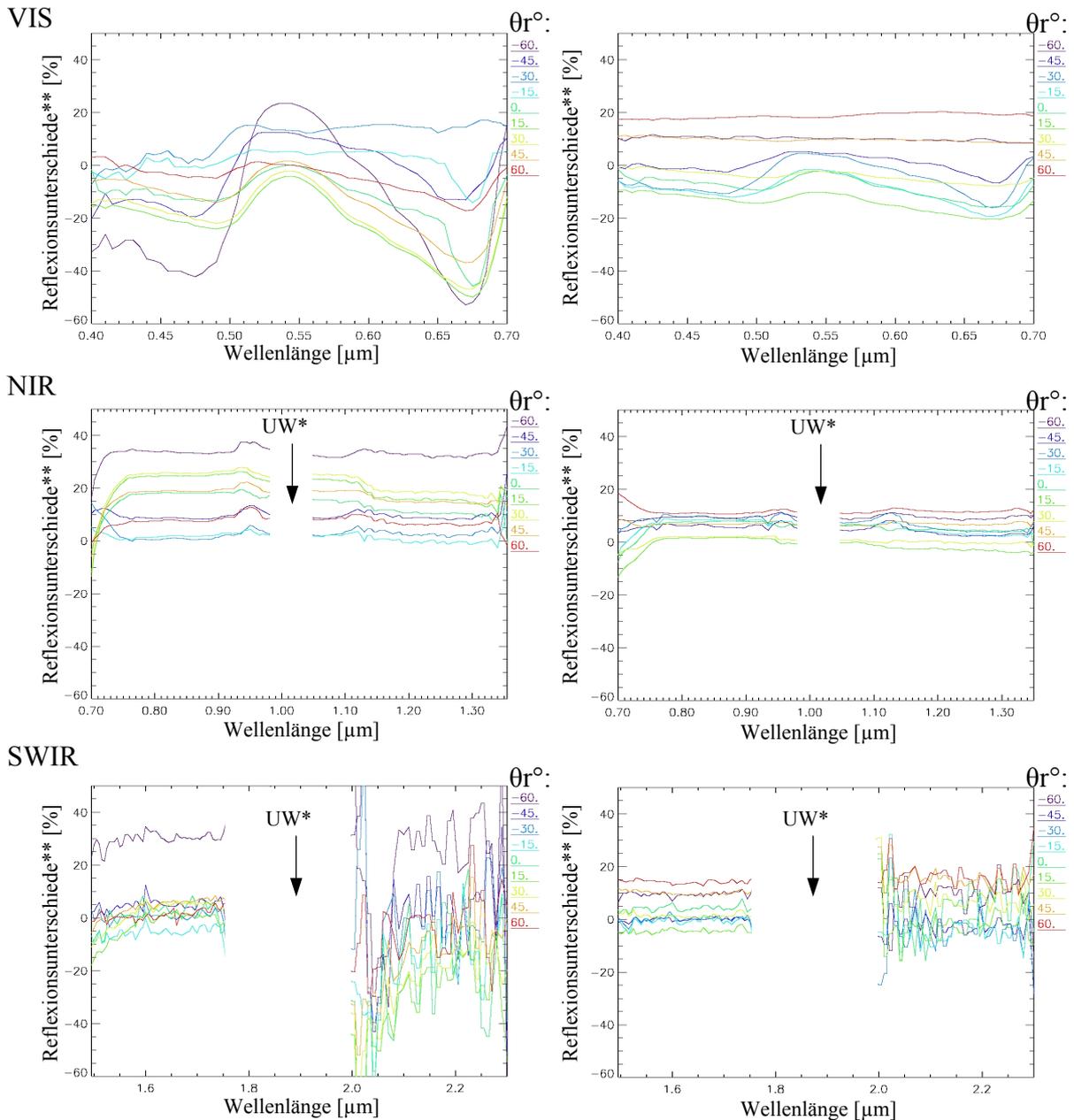
Ausgehend von solchen Beobachtungen und Analysen werden anschließend weiterführende Ergebnisse, erzielt mit der im Kapitel 4.4 & 4.5 beschriebenen Auswertemethodik, nach folgende Gliederung dargestellt:

Zusammenfassung der Ergebnisse über das richtungsabhängige Reflexionsverhalten von Winterweizenbeständen (s. Kapitel 5.1).

Auswirkung der Anisotropie auf die Berechnung von Vegetationsindizes (s. Kapitel 5.2).  
 Normalisierung der „Off Nadir“-Reflexion über BRDF-Modellen (s. Kapitel 5.3).  
 Berechnung der standortspezifischen Bestandesmerkmale mit Hilfe des PROSAIL-Modells (s. Kapitel 5.4).

Sonnenzenitwinkel: 35° am Vormittag

Sonnenzenitwinkel: 45° am Nachmittag



\*UW: Unberücksichtigter Wellenlängenbereich (s. Kapitel 4.4.2)

\*\*Reflexionsunterschiede nach Formel 18 (s. Kapitel 4.4.5.1)

**Abbildung 41.** Beispiel für die Auswirkung des Wechsels der Sonnen- und Beobachtungsposition auf die Reflexionsunterschiede zwischen den Standorten hohen (HE) und niedrigen (NE) Ertrags, dargestellt als Differenzbetrag korrespondierender Blickwinkel in der Sonnenhauptebene bei EC32 in der Vegetationsperiode 2000. (θ<sub>r</sub>°: Beobachtungszenitwinkel).

## **5.1 DAS RICHTUNGSABHÄNGIGE REFLEXIONSVERHALTEN VON WINTERWEIZENBESTÄNDEN**

Mit Hilfe der auf Plausibilität geprüften Messzyklen wurde mit der in Kapitel 4.4.5 beschriebenen Methode eine BRDF für das jeweilige Entwicklungsstadium approximiert. Damit stand eine Daten- und Methodenbank zur Verfügung, anhand derer nahezu beliebige Zeitpunkte im Tagesverlauf und über die Vegetationsentwicklung dargestellt werden konnten. Einschränkungen ergaben sich lediglich für tiefe Sonnenstände (Sonnenzenitwinkel größer als  $65^\circ$ ), da für diese keine Eingangsdaten zur Verfügung standen, sowie aufgrund von prinzipiellen Unschärfen wegen fehlender Messungen jeweils bei Sonnenhöchststand oder zu großen zeitlichen Abständen der Tagesgangmessungen, die auf das Wettergeschehen zurückzuführen waren, nicht zuletzt aber auch durch die jeweiligen Atmosphärenzustände. Die nachfolgend beschriebenen Ergebnisse beruhen dadurch auf Daten, die rechnerisch auf gleichen Sonnenstand normalisiert wurden. Insgesamt wurden

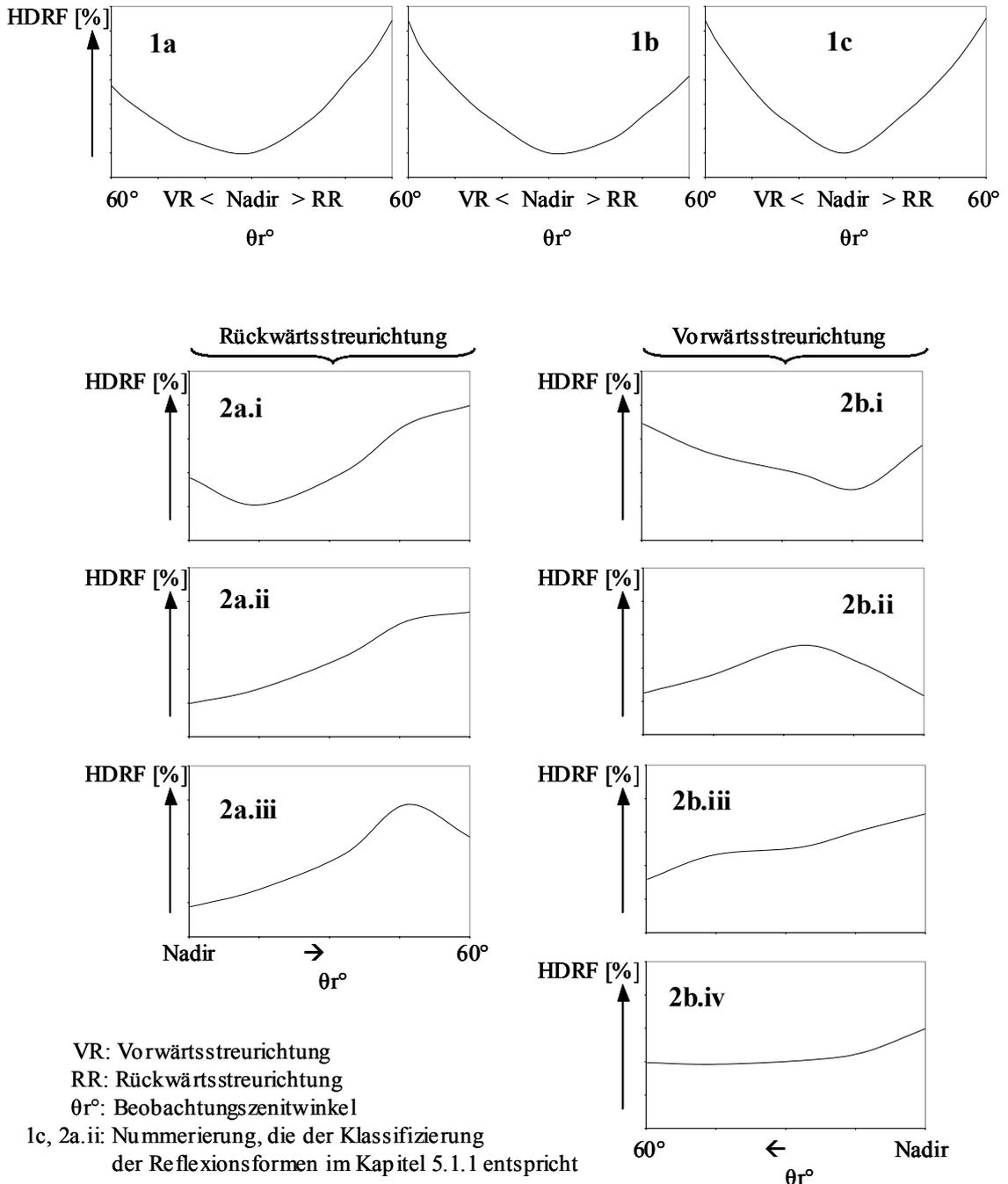
- Rückschlüsse über das richtungsabhängige Reflexionsverhalten gezogen,
- Informationen über die Einflussfaktoren abgeleitet, die das richtungsabhängige Reflexionsverhalten bestimmen und
- Schlussfolgerungen über die Größenordnung und Verteilung der Reflexionsunterschiede zweier Teilschläge auf Boden unterschiedlicher nutzbarer Feldkapazität im selben Winterweizenschlag ermittelt.

### **5.1.1 Reflexionsverteilungsformen**

Die Form der dreidimensionalen Reflexionsintensitäts-Verteilung ist abhängig vom Wellenlängenbereich, dem Entwicklungsstadium und den bio-physikalischen Bestandesmerkmalen. Zusammenfassend kann man folgende Verteilungsmuster erkennen (Abbildung 42):

- 1) Die Reflexion nimmt sowohl in der Rückwärts- als auch in der Vorwärtsstreurichtung mit dem Beobachtungszenitwinkel zu:
  - a) Reflexionswerte der Rückwärtsstreurichtung sind höher als diejenigen der entsprechenden Vorwärtsstreurichtung (Abbildung 42.1a).
  - b) Für alle Beobachtungszenitwinkel der Vorwärtsstreurichtung werden größere Reflexionswerte gemessen als für die entsprechenden Winkel der Rückwärtsstreurichtung (Abb. 45.1b).
  - c) Vorwärts- und Rückwärtsstreurichtung zeigen vergleichbare Reflexionswerte. In diesem Fall entsteht eine U- oder V-förmige Reflexionsform und der Tiefstpunkt wird durch den Reflexionswert der Nadir-Position markiert (Abb. 45.1c).
- 2) Bei detaillierter Betrachtung sind weitere Unterscheidungen möglich:
  - a) Rückwärtsstreurichtung:

- i) Die Reflexion sinkt bis zu einem Tiefstpunkt und steigt dann allmählich an (Abbildung 42.2a.i).
- ii) Die Reflexion steigt bis zu einem Reflexionsplateau, das bei ca. 55° erreicht wird (Abbildung 42.2a.ii).
- iii) die Reflexion steigt bis zu einem Maximum („hot spot“), um dann wieder abzufallen (Abb. 45.2a.iii).



**Abbildung 42.** Beobachtete Grundformen der Reflexionsverteilung.

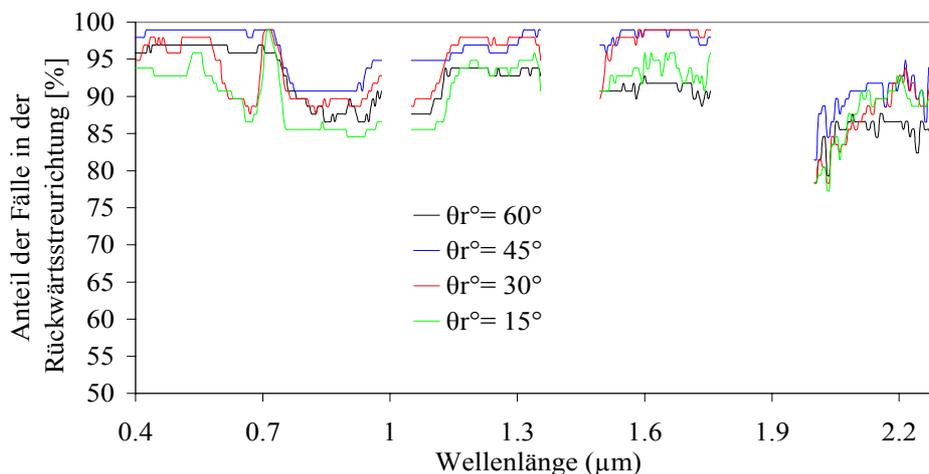
- b) Vorwärtsstreirichtung:
  - i) Die Reflexion sinkt bis zu einem Tiefstpunkt und steigt dann allmählich (Abbildung 42.2b.i).

- ii) Die Reflexion nimmt bis zu einem Höchstpunkt zu und dann allmählich ab (Abbildung 42.2b.ii).
- iii) Die Reflexion fällt durchgehend (Abbildung 42.2b.iii).
- iv) Die Reflexion sinkt leicht unter das Niveau der Reflexion über der Nadir-Position und bleibt dann fast unverändert bis zum Beobachtungszenitwinkel von  $60^\circ$  (Abbildung 42.2b.iv).

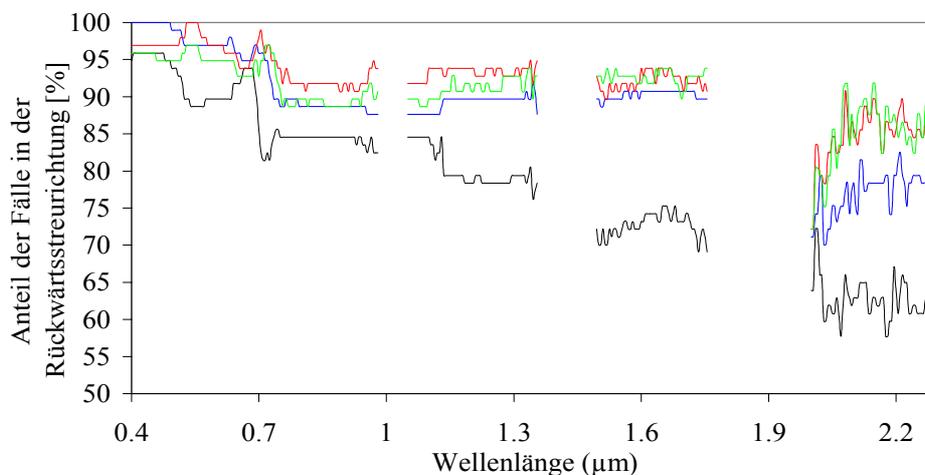
### 5.1.2 Abhängigkeit von der Beobachungsposition

Hinsichtlich der Abhängigkeit der richtungsabhängigen Reflexion der untersuchten Winterweizenbestände von der Beobachungsposition können folgende Ergebnisse festgehalten werden:

Beobachtungszazimut: Sonnenhauptebene ( $\varphi^\circ = 0^\circ / 180^\circ$ )



Beobachtungszazimut:  $45^\circ$  zur Sonnenhauptebene ( $\varphi^\circ = 45^\circ / 225^\circ$ )

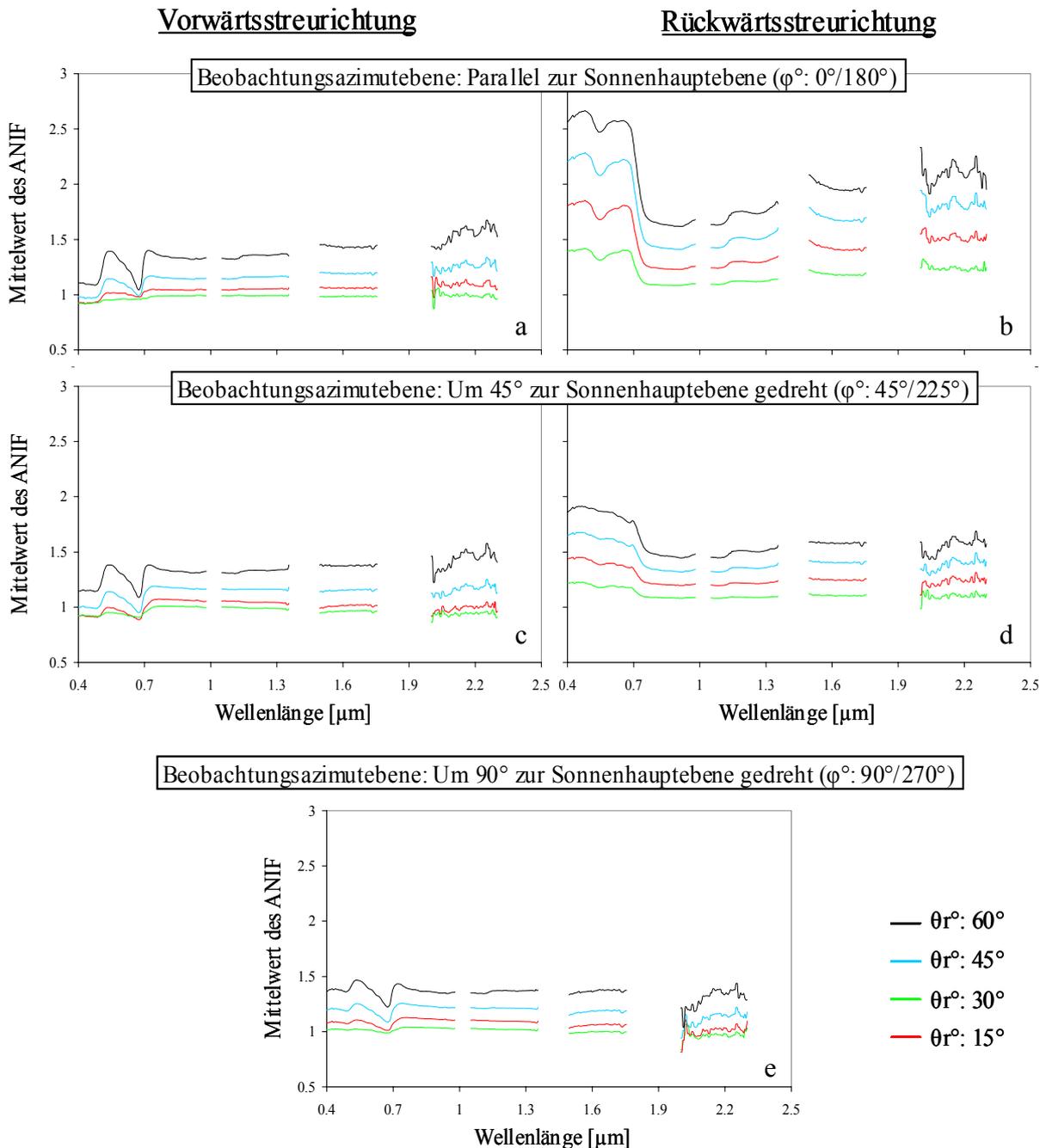


**Abbildung 43.** Anteil der Fälle, bei denen die bevorzugte Streurichtung der Reflexion die Rückwärtsstreureichtung ist, unter Berücksichtigung aller approximierten BRDFs in  $10^\circ$ -Schritten des Sonnenzenitwinkels über beide untersuchte Vegetationsperioden hinweg. ( $\theta_r$ : Beobachtungszenitwinkel).

Die untersuchten Winterweizenbestände reflektieren über die gesamte Vegetationsperiode hinweg *bevorzugt* in Sonneneinstrahlungsrichtung, d.h. mit Rückwärtscharakteristik (Abbildung 43).

In der Sonnenhauptebene wurden die meisten Fälle, bei welchen die Reflexion rückwärts gerichtet wurde, beim Beobachtungszenitwinkel von  $45^\circ$  registriert.

In der um  $45^\circ$  zur Sonnenhauptebene gedrehten Beobachtungszimutebene wurden die meisten Fälle, bei welchen die Reflexion rückwärts gerichtet wurde, beim Beobachtungszenitwinkel von  $30^\circ$  registriert.



**Abbildung 44.** Mittelwert des ANIF (s. Kapitel 4.4.5.1) aller approximierten BRDFs in  $10^\circ$ -Schritten des Sonnenzenitwinkels über beide untersuchte Vegetationsperioden hinweg, dargestellt in Abhängigkeit vom Beobachtungszenitwinkel ( $\theta_r^\circ$ ).

Vorwärtscharakteristik ist bei Winterweizenbeständen als Sonderfall zu deuten. Solche Fälle traten vorzugsweise auf:

in der Sonnenhauptebene beim Beobachtungszenitwinkel von  $15^\circ$  und

in der um  $45^\circ$  zur Sonnenhauptebene gedrehten Beobachtungszimutebene beim Beobachtungszenitwinkel von  $60^\circ$  (Abbildung 43).

Mit zunehmendem Beobachtungszenitwinkel verstärkt sich die Richtungsabhängigkeit der Reflexion sowohl in der Rückwärts- als auch in der Vorwärtsstreurichtung (Abbildung 44 a-e).

Parallel zur Sonnenhauptebene variiert die „Off Nadir“-Reflexion am stärksten, die Charakteristik ist aber in allen anderen Ebenen ähnlich. Typische Unterschiede gibt es zwischen Vorwärts- und Rückwärtsstreurichtung, jeweils im Bereich der Chlorophyllabsorptionsbanden. Im Mittelwert aller ANIFs, berechnet über zwei Vegetationsperioden, zeichnet sich folgendes Grundmuster ab (Abbildung 44 a-e):

In der Vorwärtsstreurichtung bilden sich die Chlorophyllabsorptionsbanden als deutliche Minima in der Anisotropiesignatur des ANIF ab. Die restlichen Wellenlängenbereiche zeigen ein indifferentes Verhalten, bei lediglich leichtem Anstieg im SWIR (Abbildung 44 a, c).

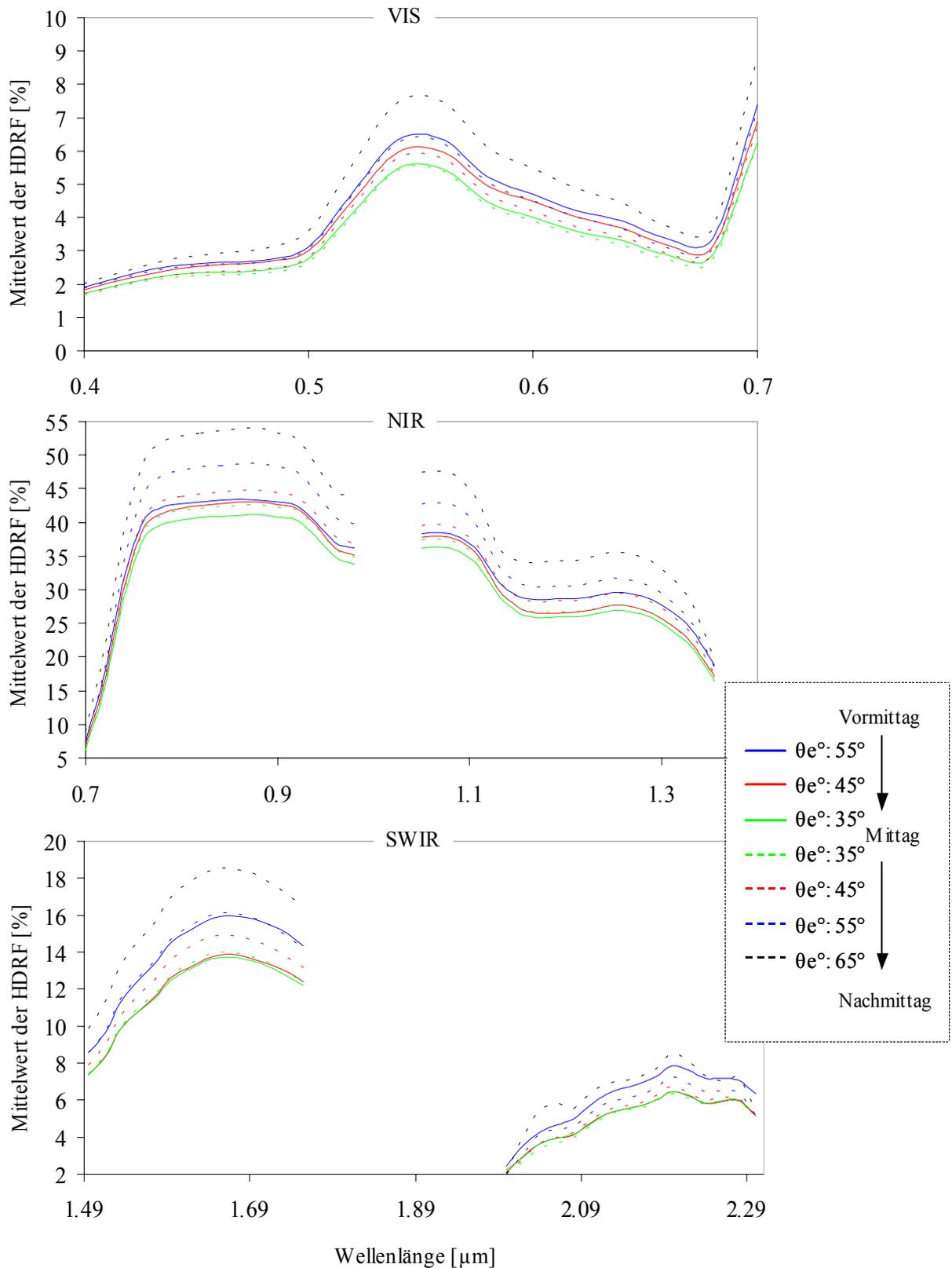
In der Rückwärtsstreurichtung ändert sich das Bild ins Gegenteil: die Anisotropiesignatur zeigt ein deutliches Minima im Grün-Bereich, bei breiteren Maxima im Wellenlängenbereich der Chlorophyllabsorption. Insgesamt ist das Signaturniveau der ANIF im VIS deutlich höher als im restlichen Wellenlängenbereich, der keine weiteren markanten Merkmale zeigt (Abbildung 44 b, d).

### 5.1.3 Abhängigkeit von der Sonnenposition

Bezüglich der Abhängigkeit der richtungsabhängigen Reflexion der untersuchten Winterweizenbestände vom Sonnenstand ergaben sich die in Abbildung 45 als Mittelwerte der Messungen über zwei Vegetationsperioden dargestellten Zusammenhänge:

- 1) Je tiefer die Sonne am Horizont steht (großer Sonnenzenitwinkel), desto größer wird die Reflexion.
- 2) Wenn man die Reflexion an einem bestimmten Sonnenzenitwinkel am Vormittag und Nachmittag vergleicht, stellt man fest, dass die Reflexion
  - a) am Vormittag im VIS geringfügig stärker zunimmt als am Nachmittag.
  - b) am Nachmittag im NIR und im SWIR von  $1.495\mu\text{m}$  bis  $1.755\mu\text{m}$  stärker als am Vormittag zunimmt. Die Unterschiede sind jedoch im SWIR von  $1.495\mu\text{m}$  bis  $1.755\mu\text{m}$  und bei Sonnenzenitwinkeln von  $35^\circ$  und  $55^\circ$  zwischen Vor- und Nachmittag minimal.
  - c) im SWIR von  $2\mu\text{m}$  bis  $2.3\mu\text{m}$ 
    - i) beim Sonnenzenitwinkel von  $55^\circ$  am Vormittag stärker zunimmt als am Nachmittag,

- ii) beim Sonnenzenitwinkel von 45° am Nachmittag stärker zunimmt als am Vormittag und
- iii) beim Sonnenzenitwinkel von 35° in beiden Tageshälften ähnlich zeichnet.

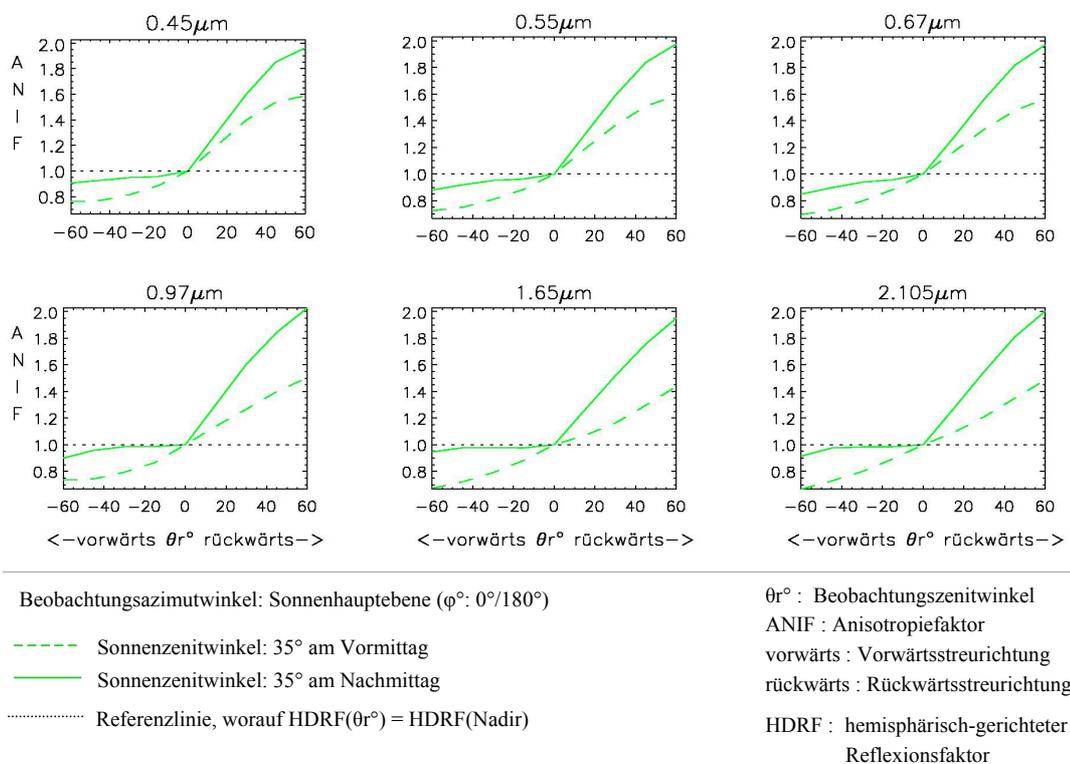


**Abbildung 45.** Mittelwert der HDRF je nach Sonnenzenitwinkel ( $\theta_e^\circ$ ) unter Berücksichtigung aller approximierten BRDFs in 10°-Schritten des Sonnenzenitwinkels über beide untersuchte Vegetationsperioden hinweg.

### 5.1.4 Auswirkung der Bestandesentwicklung

Zu Beginn der Vegetationsperiode beeinflusst der Boden das richtungsabhängige Reflexionsverhalten des Pflanzenbestandes. Je kleiner der Bodenanteil im Laufe der Vegetationsperiode wird, desto geringer wird dieser Einfluss:

- Böden reflektieren die einfallende Sonneneinstrahlung im gesamten untersuchten Spektrum bevorzugt in der Rückwärtsstreurichtung (Abbildung 46). Desweiteren zeigt Abbildung 46
  - eine durchgehende Zunahme der Reflexion vom Beobachtungszenitwinkel von  $60^\circ$  in der Vorwärtsstreurichtung bis zum Beobachtungszenitwinkel von  $60^\circ$  in der Rückwärtsstreurichtung und
  - eine Zunahme der Reflexion am Nachmittag.

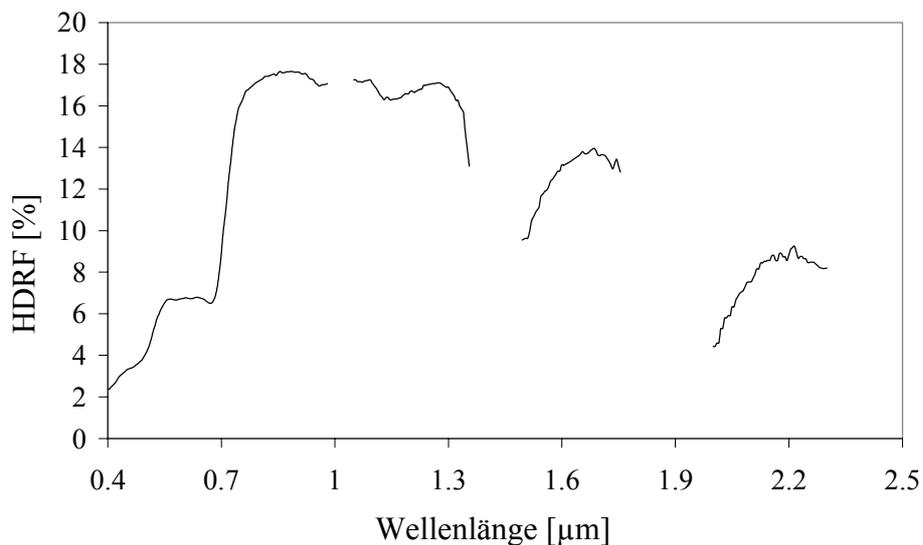


**Abbildung 46.** Reflexionsverteilung parallel zur Sonnenhauptebene über bearbeitetem nacktem Ackerboden der Versuchsflächen.

Trotz des überwiegenden Bodenanteils von  $63\%$  pro  $\text{m}^2$  (s. Kapitel 5, Tabelle 3) ist die charakteristische Signatur der Vegetation bereits bei EC21 deutlich zu erkennen (Abbildung 47). Der Pflanzenanteil wird im weiteren Verlauf der Vegetationsperiode größer und für die Reflexionsverteilung über dem Pflanzenbestand bestimmend. Die Entwicklung in der Phänologie und Physiologie der Pflanzen ruft Änderungen im dreidimensionalen Aufbau des Pflanzenbestandes hervor. Die Untersuchungen haben ein charakteristisches Muster bei der

Veränderung der Reflexionscharakteristik von Entwicklungsstadium zu Entwicklungsstadium aufgezeigt. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Standorte je nach Vegetationsperiode unter unterschiedlichen Umständen wuchsen, erkennt man, dass sich die Reflexionsintensität in der Streuhemisphäre von Entwicklungsstadium zu Entwicklungsstadium in beiden Vegetationsperioden grundsätzlich in vergleichbarer Weise ändert (s. Trendlinien und Korrelationskoeffizienten in der Abbildung 48). Insgesamt lässt sich über die durchschnittliche Reflexionsintensität in der räumlichen Reflexionsverteilung fest stellen, dass sie:

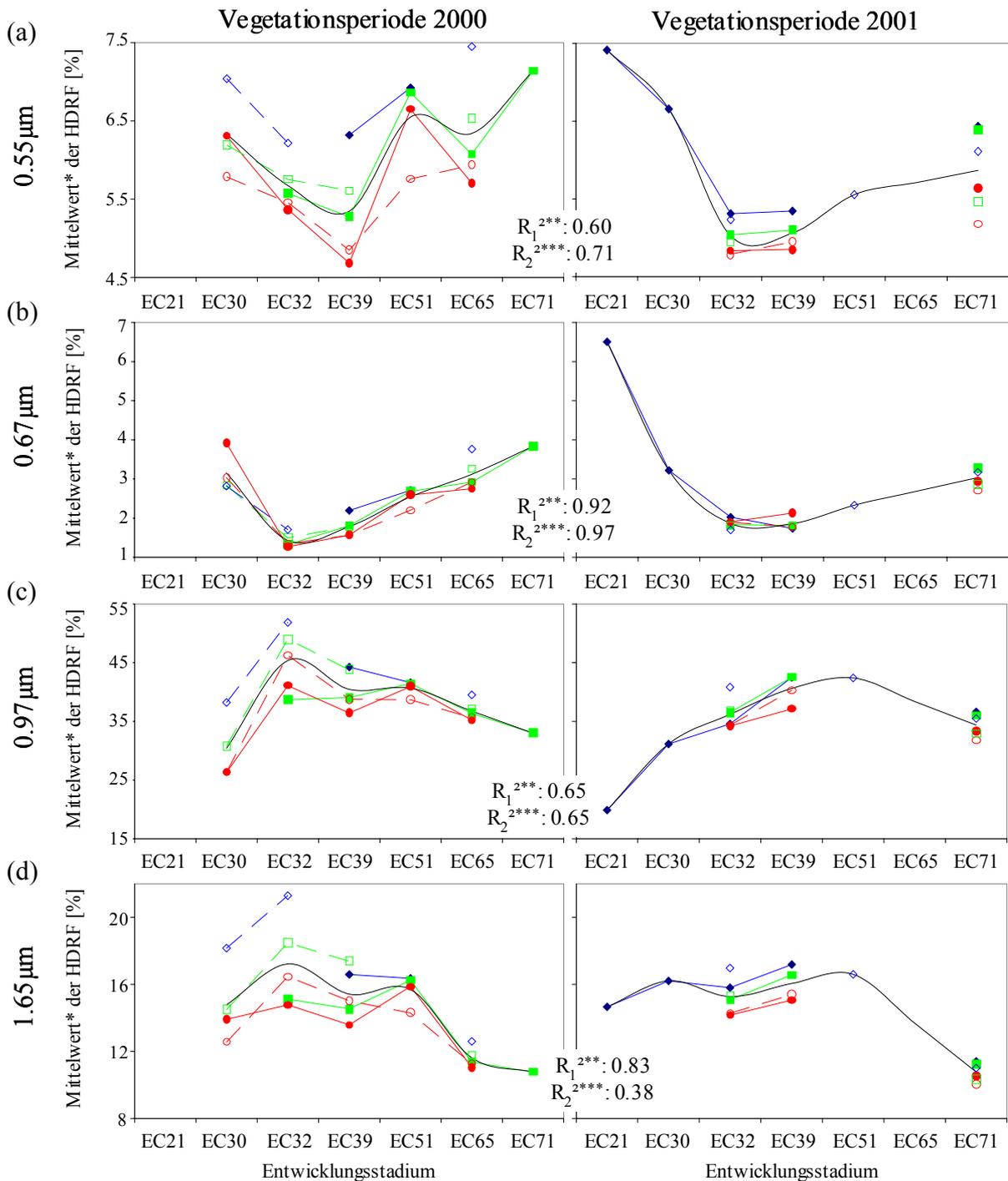
- a) im grünen und roten Spektralbereich
  - i) von EC21 bis EC32 - EC39 sinkt und
  - ii) dann bis zu EC71 wieder steigt (Abbildung 48 a, b).
- b) im NIR und im SWIR
  - i) von EC21 bis EC32 und von EC39 bis EC51 zunimmt und
  - ii) ab EC51 bis zu EC71 abnimmt (Abbildung 48 c, d).



**Abbildung 47.** Reflexionskurve beim Entwicklungsstadium EC21 in der Vegetationsperiode 2001, Sonnenzenitwinkel  $55^\circ$  und über der Nadir-Beobachtungsposition.

Unbeschadet des prinzipiell gleichartigen Verlaufs der Änderungen der Reflexionscharakteristik ergeben sich von Entwicklungsstadium zu Entwicklungsstadium auch Abweichungen: Die durchschnittliche gerichtete Reflexionsintensität

- a) nimmt in Abhängigkeit vom Sonnenzenitwinkel von Entwicklungsstadium zu Entwicklungsstadium unterschiedlich stark ab- oder zu und
- b) ändert sich gelegentlich sogar von Entwicklungsstadium zu Entwicklungsstadium in Abhängigkeit vom Sonnenzenitwinkel gegen den ab- oder zunehmenden Verlauf der Trendlinie (Abbildung 48).



- ◆ θe°: 55° am Vormittag
- θe°: 45° am Vormittag
- Trendlinie
- θe°: 35° am Vormittag
- ⊙ θe°: 35° am Nachmittag
- θe°: 45° am Nachmittag
- ◇ θe°: 55° am Nachmittag

\* Mittelwert je nach Sonnenzenitwinkel

\*\*  $R_1^2$  : Korrelationskoeffizient zwischen den Werten der Trendlinien der Vegetationsperioden

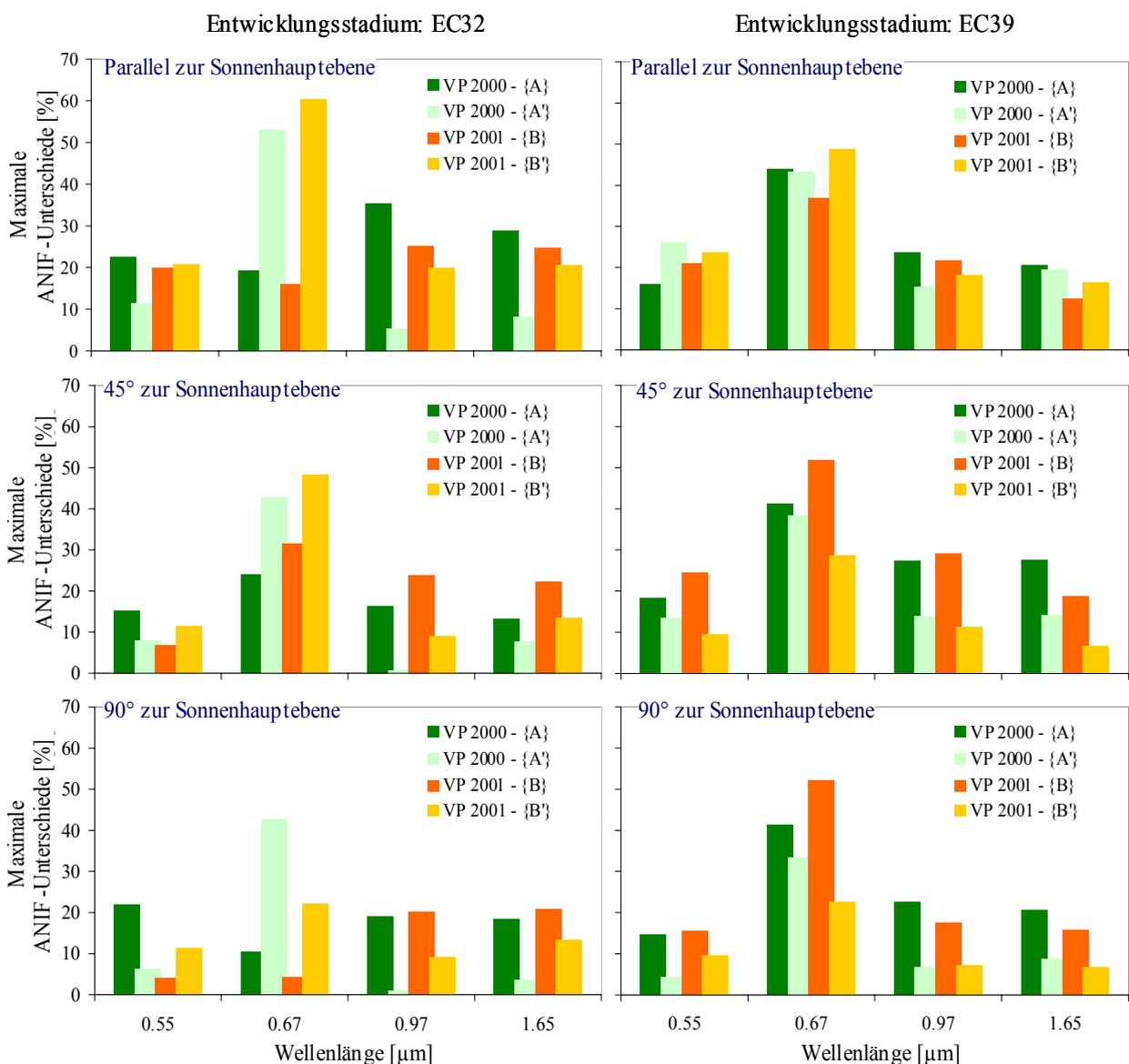
\*\*\*  $R_2^2$  : Korrelationskoeffizient zwischen den Inklinationen der Trendlinien der Vegetationsperioden von Entwicklungsstadium zu Entwicklungsstadium

**Abbildung 48.** Änderung der Reflexionsintensität in Abhängigkeit von Entwicklungsstadium und Sonnenzenitwinkel in den vier - im Kapitel 4.4.4 ausgewählten - repräsentativen Wellenlängen am Standort hohen Ertrags (HE). (Jeder Knoten entspricht einem tatsächlichen Messtag). (θe°: Sonnenzenitwinkel).

### 5.1.5 Standortspezifische Unterschiede der Reflexionsverteilung

Zwei Standorte unterschiedlicher nutzbarer Feldkapazität pro Schlag und Vegetationsperiode ermöglichten in dieser Arbeit, die Größenordnung und Verteilung der Reflexionsunterschiede in Abhängigkeit von Wellenlängenbereich, Beobachtungs-, Sonnenzenitwinkel und Entwicklungsstadium festzustellen. Als Vergleichsgröße wurde der ANIF gewählt. Die ANIF-Unterschiede wurden nach der Formel 18 (s. Kapitel 4.4.5.1) berechnet.

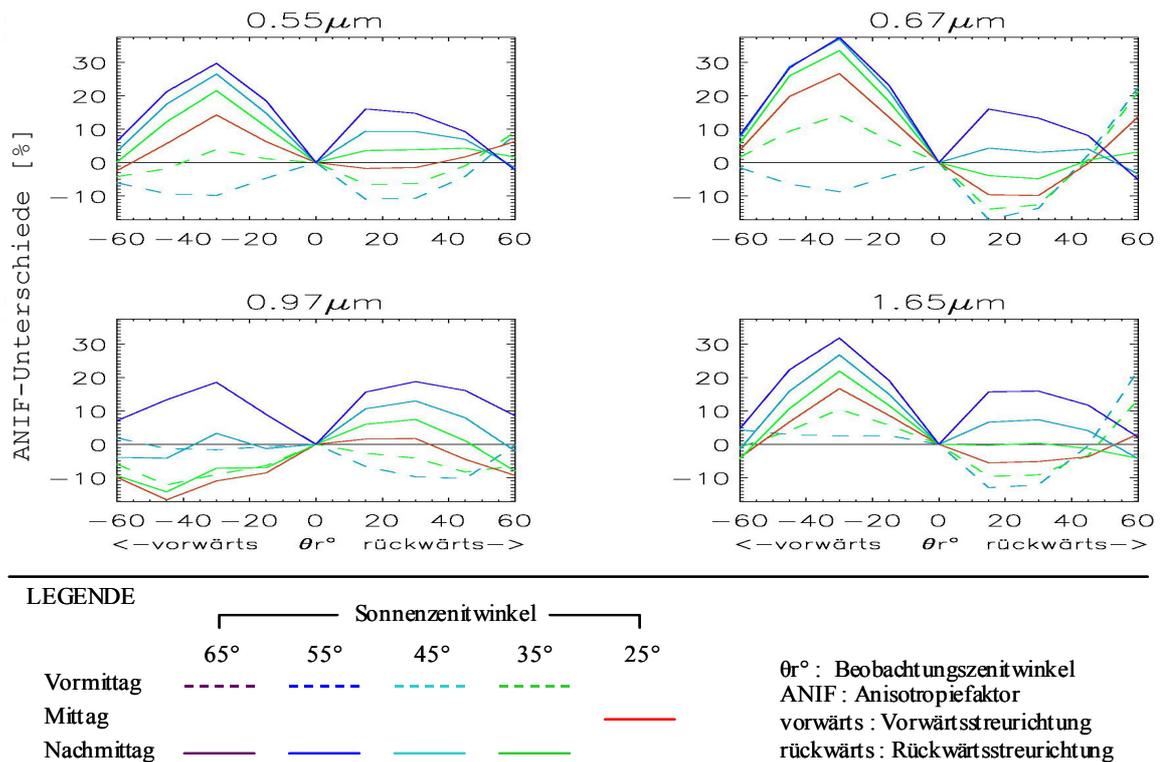
- 1) Die maximalen Unterschiede der „Off Nadir“-Reflexion zweier Teilschläge bei gleichem Entwicklungsstadium bewegen sich in der Regel zwischen 15% und 30%. Reflexionsunterschiede über 30% und sogar bis 60% sind jedoch nicht selten (Abbildung 49).



VP: Vegetationsperiode / A, B: ANIF ist größer am Standort hohen Ertrags / A', B': ANIF ist größer am Standort niedrigen Ertrags

**Abbildung 49.** Gegenüberstellung der ANIF-Unterschiede (berechnet nach Formel 18) zwischen dem Standort hohen und dem Standort niedrigen Ertrags für die Vegetationsperioden 2000 und 2001.

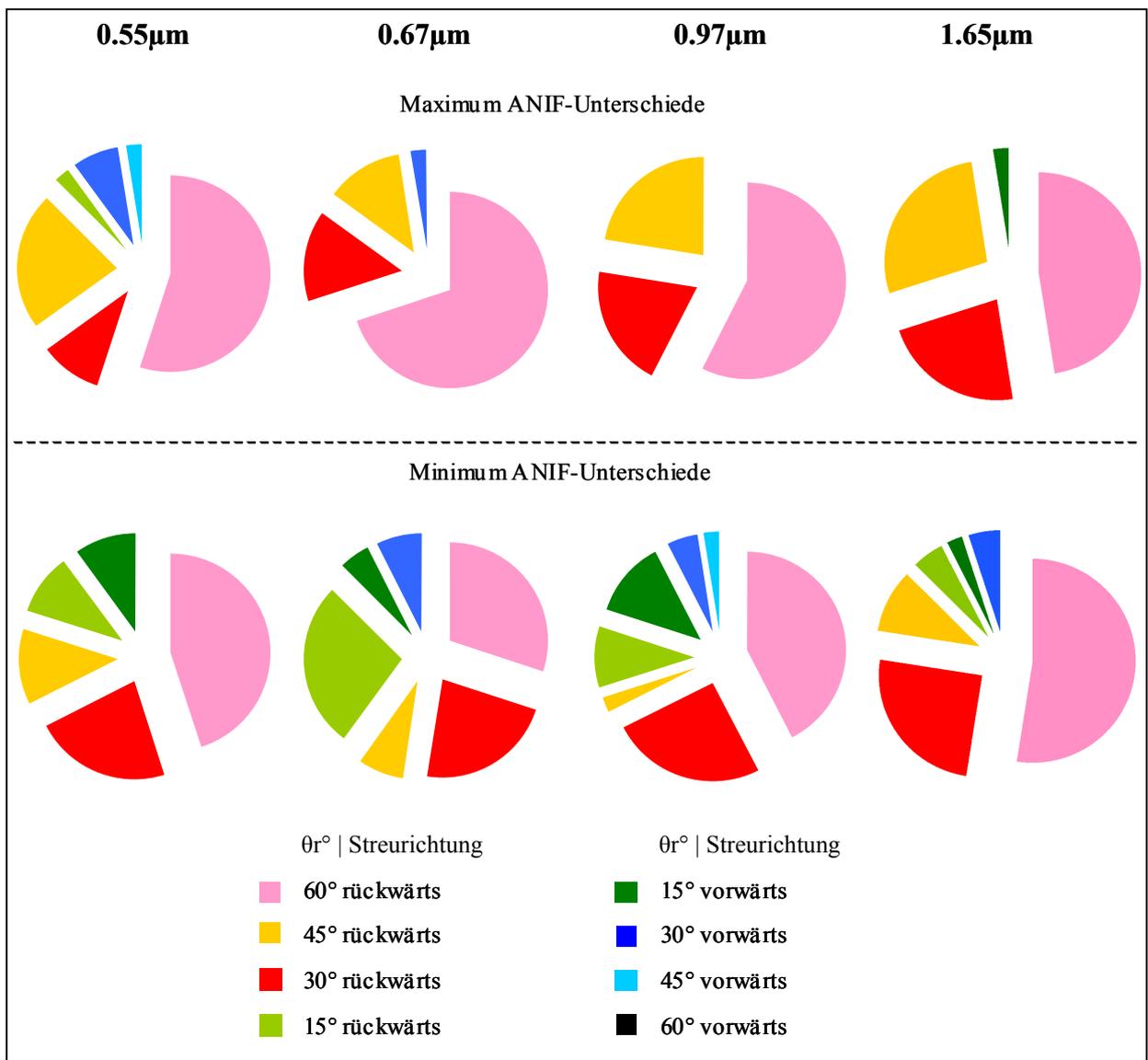
- 2) Die Spannweite der ANIF-Unterschiede zwischen den Standorten (Abbildung 49), lässt mit der Drehung der Beobachtungszimutebene bis zu  $90^\circ$  grundsätzlich nach. Die Intensität dieser Abnahme ist abhängig vom Wellenlängenbereich und vom Entwicklungsstadium.
- 3) Reflexionsintensität ist kein generelles Unterscheidungskriterium für die Standorte. Welcher Standort höher reflektiert, hängt vom Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel ab (Abbildung 50).



**Abbildung 50.** Verteilung der für die Sonnenhauptebene berechneten (nach Formel 18) ANIF-Unterschiede zwischen den Standorten hohen und niedrigen Ertrags bei Entwicklungsstadium EC71 in der Vegetationsperiode 2001. (Negative ANIF-Unterschiede sind kennzeichnend für Messgeometrien, für die der ANIF am Standort niedrigen Ertrags größer ist. Umgekehrt bezeichnen positive Werte, dass der ANIF am Standort hohen Ertrags größer ist).

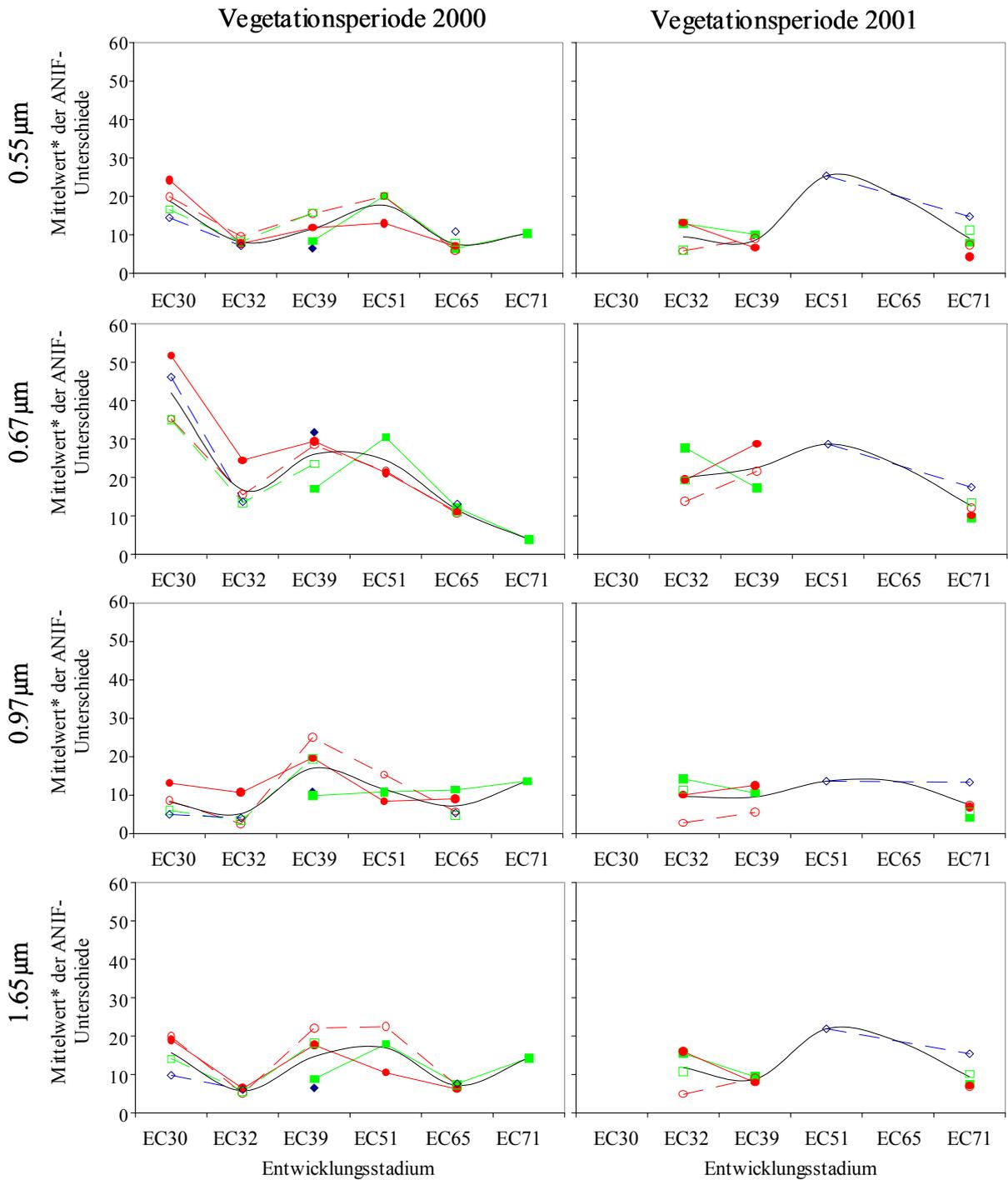
- 4) Die räumliche Verteilung der Reflexionsunterschiede zwischen den Standorten ist wellenlängenabhängig.
  - a) In den vier untersuchten Wellenlängenbereichen tauchen die größten Unterschiede der „Off Nadir“-Reflexion im roten Spektralbereich auf (Abbildung 49 & 50).
  - b) Die Unterschiede der „Off Nadir“-Reflexion sind im blauen Spektralbereich und im SWIR (von  $1.495\mu\text{m}$  bis  $1.755\mu\text{m}$ ) in ähnlicher Weise räumlich verteilt. Größere Differenzen zeigen sich beim Vergleich des Roten- und NIR Spektralbereichs (Abbildung 50).

- 5) Die größte Variabilität der räumlichen Verteilung der Reflexionsunterschiede ist in der Rückwärtsstreurichtung zu verzeichnen. In dieser Streurichtung zeigt die überwiegende Anzahl der Messzyklen maximale aber auch minimale ANIF-Unterschiede im Vergleich der untersuchten Standorte (Abbildung 51).



**Abbildung 51.** Darstellung der Verteilung maximaler und minimaler ANIF-Unterschiede (berechnet nach Formel 18) zwischen den Standorten hohen und niedrigen Ertrags in der Sonnenhauptebene in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel ( $\theta_r^\circ$ ), aufsummiert über beide untersuchte Vegetationsperioden.

- 6) In VIS und SWIR konnte für beide Vegetationsperioden beobachtet werden, dass die durchschnittlichen ANIF-Unterschiede zwischen den Standorten von EC39 bis EC51 zu- und von EC51 bis EC71 abnehmen (Abbildung 52).

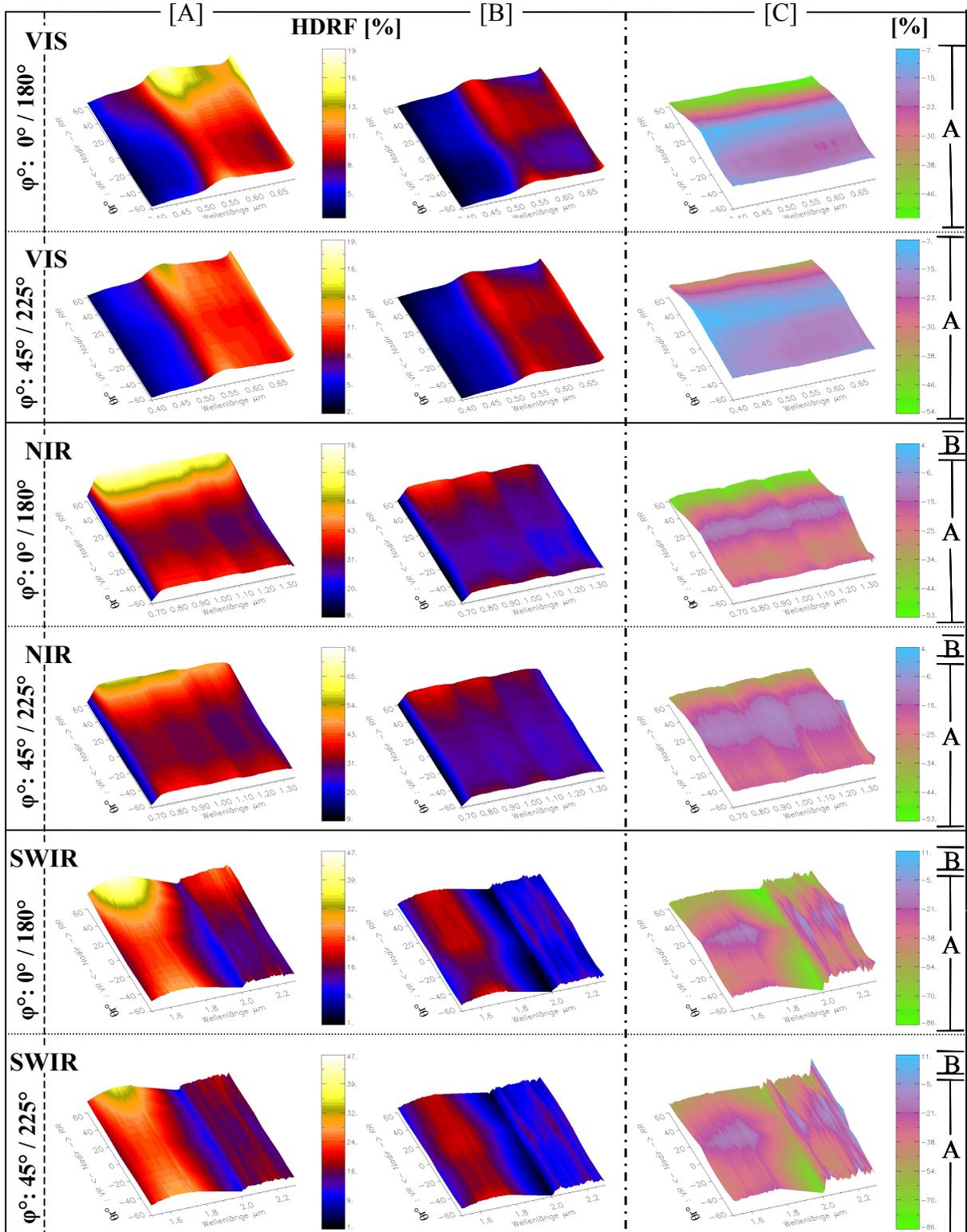


- ◆  $0e^\circ$ : 55° am Vormittag
- $0e^\circ$ : 35° am Vormittag
- $0e^\circ$ : 45° am Vormittag
- $0e^\circ$ : 45° am Nachmittag
- $0e^\circ$ : 35° am Nachmittag
- ◇  $0e^\circ$ : 55° am Nachmittag
- Trendlinie

\* Mittelwert je nach Sonnenzenitwinkel

**Abbildung 52.** Darstellung der durchschnittlichen für die Sonnenhauptebene berechneten (nach Formel 18) ANIF-Unterschiede zwischen den Standorten hohen und niedrigen Ertrags, dargestellt in Abhängigkeit von Sonnenzenitwinkel und Entwicklungsstadium für die Vegetationsperioden 2000 und 2001. (Jeder Knoten entspricht einem tatsächlichen Messtag). ( $0e^\circ$ : Sonnenzenitwinkel).

### 5.1.6 Auswirkung der Bewölkung: Ein Sonderfall



**Abbildung 53.** Reflexionsverteilung bei EC29 in der Vegetationsperiode 2000 bei klarem Himmel [A] und bei wolkenbedecktem Himmel [B] (Sonnensenzenwinkel:  $45^\circ$  am Nachmittag). In [C] befinden sich die Reflexionsunterschiede in [%] zwischen der Reflexionsverteilung bei wolkenbedecktem Himmel B und klarem Himmel A (berechnet nach der Formel 18, s. Kapitel 4.4.5.1). ( $\theta_r$ : Beobachtungszenitwinkel,  $\phi_r$ : Beobachtungsazimutwinkel, VR: Vorwärtsstreuerichtung, RR: Rückwärtsstreuerichtung).

Die prinzipiellen Auswirkungen der atmosphärischen Dichte und Zusammensetzung auf die richtungsabhängige Reflexion wurden in Kapitel 2.2.1 dargestellt. Anhand des hier vorgestellten Fallbeispiels, bei dem die Reflexionsverteilung bei klarem Himmel mit der Reflexionsverteilung bei bewölktem Himmel verglichen wird, sollte die Größenordnung dieser Beeinflussung bei den gegebenen Messbedingungen untersucht werden.

Die Messzyklen zur Erfassung der Reflexionsverteilungen wurden zeitlich direkt hinter einander durchgeführt (s. Kapitel 4.2.3). Aus diesem Grund kann angenommen werden, dass lediglich das Verhältnis direkter zu diffuser Einstrahlung als Einflussvariable in Frage kommt. Die Ergebnisse lassen folgende Rückschlüsse zu (Abbildung 53):

- 1) Bei bewölktem Himmel:
  - a) sinkt die Reflexionsintensität generell.
  - b) ist die Reflexionsverteilung gleichförmiger.
  - c) wird die Reflexion in der Rückwärtsstreurichtung überdurchschnittlich reduziert.
  - d) ist das Verteilungsmuster der Reflexion aufgrund der unregelmäßigen Abnahme der Reflexion (Abbildung 53 [C]) noch zu erkennen. Ausnahmen treten im blauen Spektralbereich und im SWIR von  $2\mu\text{m}$  bis  $2.3\mu\text{m}$  auf. In diesen Spektralbereichen wird im Prinzip die Reflexion bei bewölktem Himmel isotrop verteilt.
- 2) Die Reduktion der Reflexionsintensität wirkt sich bei den Beobachtungspositionen parallel zur Sonnenhauptebene am stärksten aus. Aus diesem Grund sind die Verteilungsunterschiede der Reflexion zwischen den zwei untersuchten (dargestellten) Beobachtungszimutebenen bei bewölktem Himmel minimiert.

## **5.2 AUSWIRKUNG DER ANISOTROPIE AUF DIE BERECHNUNG VON VEGETATIONSINDIZES**

Das richtungs- und wellenlängenabhängig unterschiedliche Reflexionsverhalten hat Auswirkungen auf die Indizeswerte und dem zur Folge auf die Aussage der Vegetationsindizes. Das quantitative Ausmaß der beobachteten Abweichungen für die ausgewählten Vegetationsindizes (s. Kapitel 4.4.3) kann über die in Tabelle 4 eingetragenen Wertebereiche abgeschätzt werden. Dargestellt sind die nach dem im Kapitel 4.4.3 beschriebenen Verfahren berechneten minimalen und maximalen Differenzbeträge ( $\Delta$ ) der Unterschiede der Indexwerte im Laufe eines Messtages. Da solche Indizes für die Abschätzung der Vitalität des Bestandes genutzt werden und somit direkt in die Entscheidungsfindungs-Prozesse bei der Ausbringung der Düngemenge oder bei der Bewässerung einfließen, werden die Spannweiten der Indexwerte über jeweils beide Messstellen pro Vegetationsperiode berechnet. Der Übersicht halber erfolgt die Auflistung in Abhängigkeit von:

- 1) wechselndem Sonnenstand und konstantem Beobachtungswinkel (Tabelle 4 [A]) und
- 2) konstantem Sonnenstand und wechselndem Beobachtungswinkel (Tabelle 4 [B]).

<b>[A]</b> $\Delta$ aufgrund des Wechsels der <u>Sonnenposition</u>								
Vegetationsindex $\downarrow$ (Einheit der $\Delta$ ) $\downarrow$		Vegetationsperiode 2000				Vegetationsperiode 2001		
		EC32	EC39	EC51	EC65	EC32	EC39	EC71
<b>HWP</b> ( $\Delta$ in nm)	min	1	1	0	1	2	1	1
	max	6	5	7	12	6	6	5
Quotient <b>0.551<math>\mu</math>m / 0.67<math>\mu</math>m</b> ( $\Delta$ in %)	min	24	8	7	8	4	8	3
	max	164	130	36	37	155	100	23
Quotient <b>0.796<math>\mu</math>m / 0.67<math>\mu</math>m</b> ( $\Delta$ in %)	min	17	22	4	19	21	15	14
	max	222	210	149	77	390	259	76
<b>NDVI</b> ( $\Delta$ in %)	min	1	1	0	2	1	1	2
	max	15	10	10	16	27	17	13
Quotient <b>1.082<math>\mu</math>m / 0.796<math>\mu</math>m</b> ( $\Delta$ in %)	min	1	2	3	2	3	2	2
	max	5	19	12	8	7	8	6
Quotient <b>0.901<math>\mu</math>m / 0.972<math>\mu</math>m</b> ( $\Delta$ in %)	min	2	2	2	2	2	2	2
	max	7	7	19	6	8	12	10
Quotient <b>1.648<math>\mu</math>m / 1.531<math>\mu</math>m</b> ( $\Delta$ in %)	min	1	2	2	1	5	3	3
	max	10	25	12	11	18	11	10
Quotient <b>0.796<math>\mu</math>m / 1.531<math>\mu</math>m</b> ( $\Delta$ in %)	min	13	15	14	10	10	6	7
	max	50	45	95	37	75	50	65
<b>[B]</b> $\Delta$ aufgrund des Wechsels der <u>Beobachtungsposition</u>								
<b>HWP</b> ( $\Delta$ in nm)	min	3	3	4	4	4	3	4
	max	7	7	10	15	6	8	9
Quotient <b>0.551<math>\mu</math>m / 0.67<math>\mu</math>m</b> ( $\Delta$ in %)	min	63	20	17	24	54	31	20
	max	223	159	45	40	288	156	44
Quotient <b>0.796<math>\mu</math>m / 0.67<math>\mu</math>m</b> ( $\Delta$ in %)	min	93	63	87	148	98	78	96
	max	449	248	221	276	656	383	272
<b>NDVI</b> ( $\Delta$ in %)	min	4	4	6	14	6	5	10
	max	18	14	14	28	30	21	25
Quotient <b>1.082<math>\mu</math>m / 0.796<math>\mu</math>m</b> ( $\Delta$ in %)	min	3	2	4	4	4	3	6
	max	6	20	12	8	9	8	9
Quotient <b>0.901<math>\mu</math>m / 0.972<math>\mu</math>m</b> ( $\Delta$ in %)	min	6	5	6	6	4	4	7
	max	8	10	19	12	10	11	12
Quotient <b>1.648<math>\mu</math>m / 1.531<math>\mu</math>m</b> ( $\Delta$ in %)	min	6	5	6	7	7	6	5
	max	15	22	10	12	21	15	16
Quotient <b>0.796<math>\mu</math>m / 1.531<math>\mu</math>m</b> ( $\Delta$ in %)	min	35	26	37	43	25	16	40
	max	72	73	103	85	77	71	107

**Tabelle 4.** Minimale und maximale Spannweiten ( $\Delta$ ) der Unterschiede der Indexwerte im Laufe eines Messtages aufgrund des Wechsels der Sonnen- [A] und der Beobachtungsposition [B] unter Berücksichtigung beider untersuchter Standorte.

Die Größenordnung der minimalen und maximalen Index-Unterschiede ( $\Delta$ ) ist für die einzelnen Indizes für beide Vegetationsperioden vergleichbar. Dies gilt sowohl für die Auswirkung des Wechsels der Sonnen- als auch der Beobachtungsposition. Allerdings ist der Einfluss einer Änderung der Beobachtungsposition auf die Vegetationsindizes stärker als der Einfluss einer Änderung der Sonnenposition (Tabelle 4).

Über die Bedeutung der dargestellten Ergebnisse bei der Aussagegenauigkeit über Bestandesmerkmale wird im Kapitel 6.3 diskutiert.

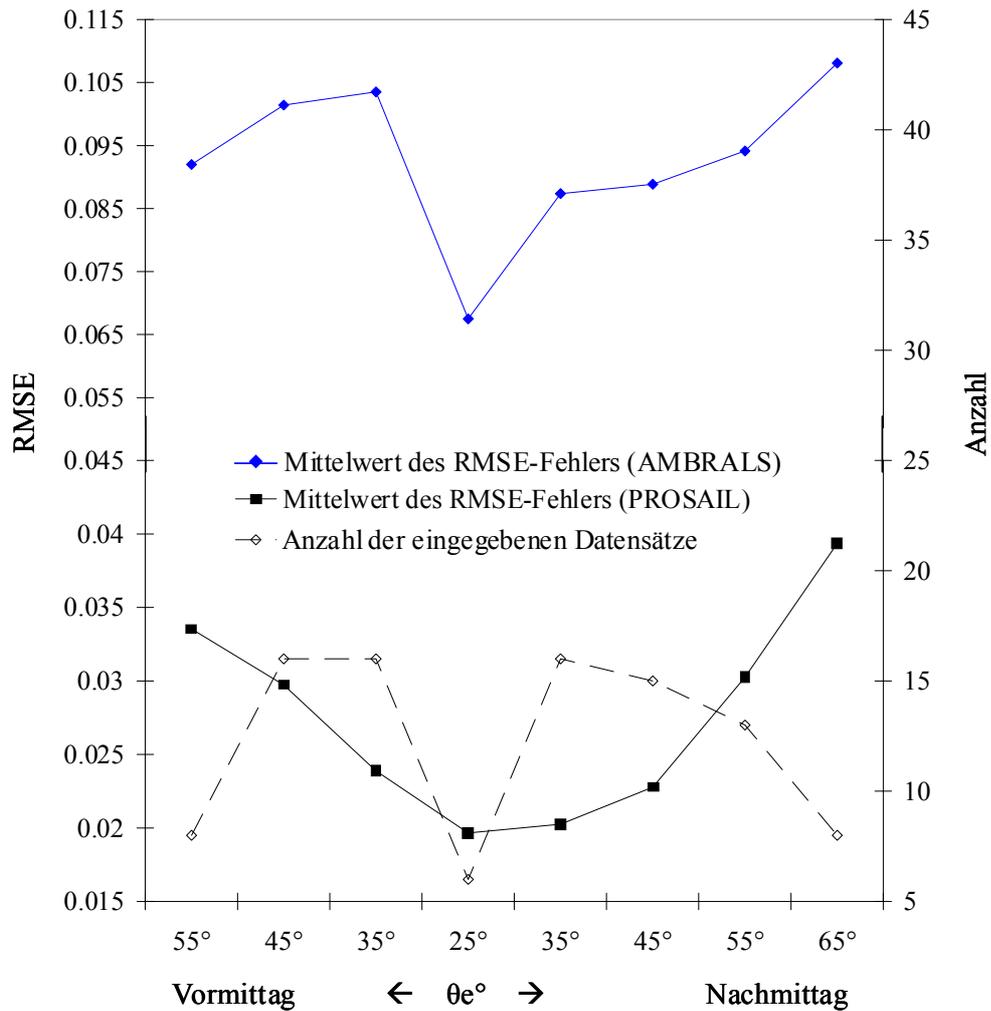
### **5.3 NORMALISIERUNG DER „OFF-NADIR“-REFLEXION ÜBER BRDF-MODELLEN**

Die im Feldexperiment erfassten Datensätze wurden zum Vergleich genutzt um festzustellen, in wie weit die beiden Modelle PROSAIL und AMBRALS in der Lage sind, die im Feld gemessenen Daten zu reproduzieren. Je näher die simulierten Reflexionswerte an die eingegebenen bzw. tatsächlich gemessenen Reflexionswerte herankommen, desto besser ist das Modell angepasst. Mit der „Güte“ der Anpassung gekoppelt ist der Erfolg der Normalisierung von „Off Nadir“-Reflexionsmessungen auf die Bezugsblickrichtung.

Die Anpassung der Modelle an die eingegebenen BRDF-Datensätze hat folgende Ergebnisse erbracht:

#### **PROSAIL**

- 1) Tagesgang (Abbildung 54):
  - a) Die besten Erfolgsquoten wurden bei BRDF-Datensätzen hoher Sonnenstände (kleiner Sonnenzenitwinkel) erzielt (RMSE-Fehler von lediglich 0,02).
  - b) Mit zunehmendem Sonnenzenitwinkel sank die Erfolgsquote, was sich in größeren RMSE-Werten niederschlug.
  - c) Die Anpassung an BRDF-Datensätze des Nachmittags war genauer als die an die entsprechenden Sonnenstände am Vormittag (vergleichsweise kleinere RMSE-Werte für die Nachmittags-Messzyklen).
  
- 2) Vegetationsperiode (Abbildung 55):
  - a) Über die Vegetationsperiode betrachtet steigt der Fehler der Anpassung (als RMSE dargestellt) von EC30 bis EC51, um dann bis EC71 wieder abzunehmen.
  - b) erreichte im besten Fall einen RMSE-Fehler von 0.012 (EC 32, 2001) und im schlimmsten Fall einen RMSE-Fehler von 0.059 (nicht dargestellt).



**Abbildung 54.** Simulationserfolg der eingegebenen BRDF-Datensätze unter Berücksichtigung aller approximierter BRDFs beider untersuchter Vegetationsperioden. ( $\theta_e^\circ$ : Sonnenzenitwinkel).

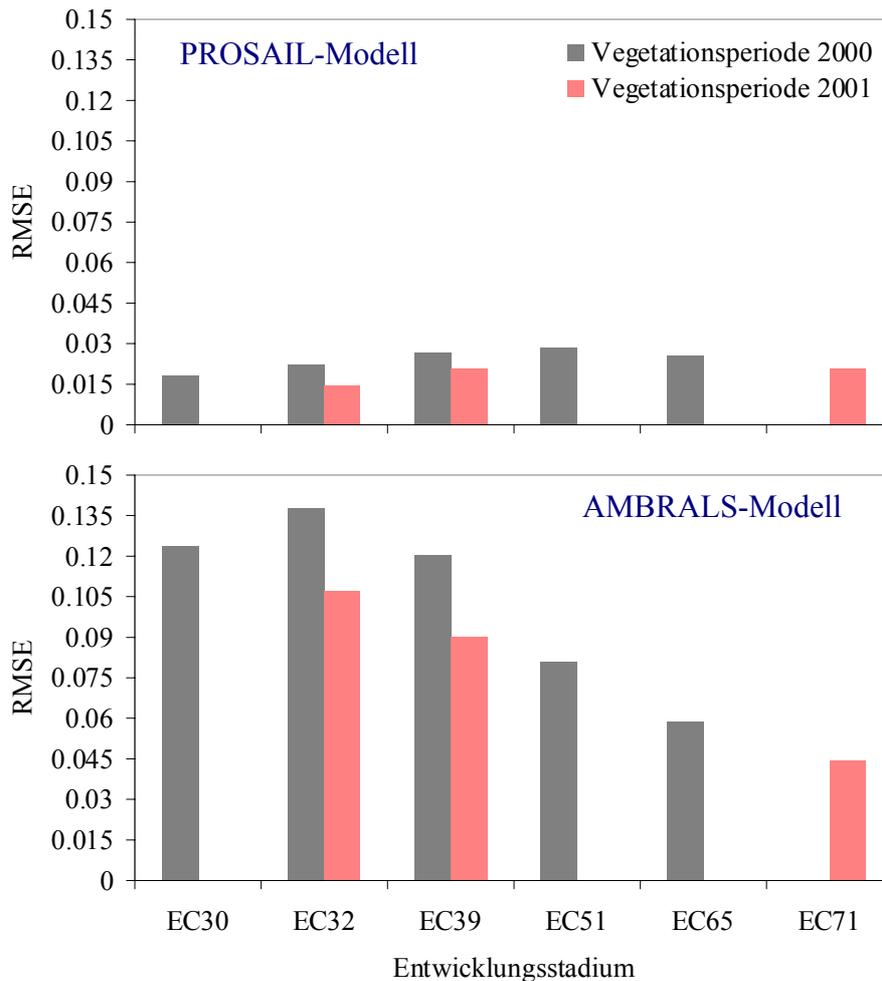
## AMBRALS

Die Simulation der eingegebenen approximierten BRDF-Datensätze durch das AMBRALS-Modell war nicht so erfolgreich wie diejenige durch das PROSAIL-Modell (Abbildung 54).

- 1) Tagesgang (Abbildung 54):
  - a) Die RMSE-Werte zeigen ca. dreifach höhere Werte wie im Falle der PROSAIL-Anpassung.
  - b) Die geringe Anzahl an Messdaten bei kleinem Sonnenzenitwinkel wirkt sich direkt fehler senkend aus, was eher als negativer Erfolgsbeweis gewertet werden muss.
  - c) Im Durchschnitt lag der RMSE-Fehler zwischen 0.067 und 0.108. Im Einzelnen betrug die maximale Fehlerquote bis zu 0.229 (nicht dargestellt).

2) Vegetationsperiode (Abbildung 55):

- a) AMBRALS erzielte nur bei weniger als 10% der untersuchten BRDF-Datensätze vergleichbare RMSE-Ergebnisse zu denjenigen des PROSAIL. Solche Fälle treten nur in späten Entwicklungsstadien (meistens bei EC71) auf.
- b) Bei EC71 und bei hohen Sonnenständen (kleinen Sonnenzenitwinkeln) ließ sich das AMBRALS-Modell am besten anpassen.
- c) Die ausgewählten / besten Kernelkombinationen waren je nach BRDF-Datensatz die Kombinationen des RossThin-Kernels mit einer der Varianten des LiSparse-Kernels.

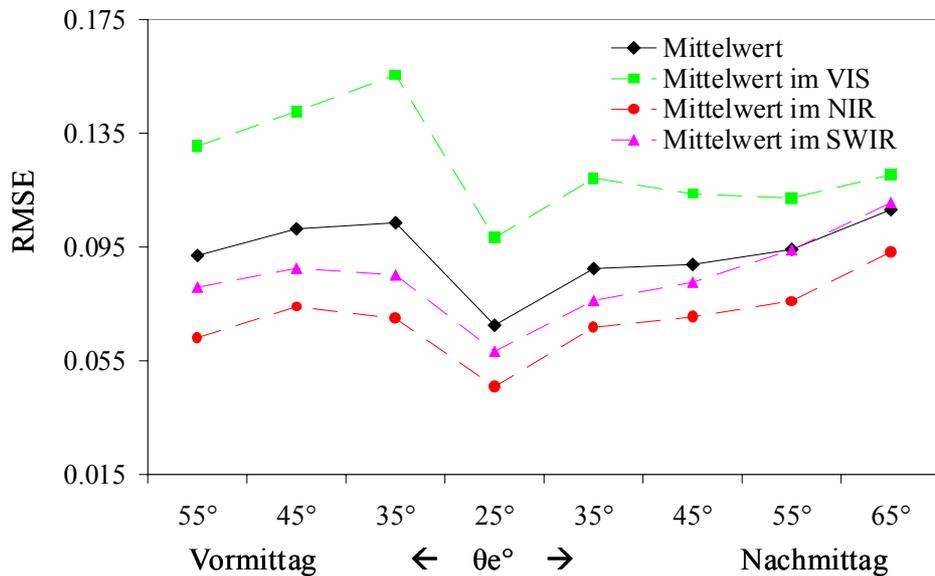


**Abbildung 55.** Mittelwert des RMSE-Fehlers zwischen Sonnenzenitwinkeln  $35^\circ$  am Vormittag und  $35^\circ$  am Nachmittag im Verlauf der untersuchten Vegetationsperioden.

3) Wellenlängenabhängigkeit (Abbildung 56):

Betrachtet man VIS, NIR und SWIR separat, erkennt man unterschiedlich gute Ergebnisse bei der Simulation der eingegebenen BRDFs. Für den VIS wurden die größten und für das NIR die kleinsten RMSE-Fehler berechnet. Dieser Befund bedeutet, dass die Berechnung - durch die von AMBRALS normalisierten Reflexionswerte - bestimmter Vegetationsindizes, die mit Hilfe von Wellenlängen in

unterschiedlichen Wellenlängenbereichen berechnet werden, wie z.B. der NDVI (VIS bzw. der Rote Spektralbereich und NIR werden mitberücksichtigt, s. Kapitel 4.4.3), dieser zusätzlicher Schwankungs- bzw. Fehlerquelle unterliegt.



**Abbildung 56.** Simulationserfolg in Abhängigkeit von Wellenlängen und Sonnenzenitwinkel bei der Anpassung des AMBRALS-Modells an die approximierten BRDFs beider untersuchter Vegetationsperioden. ( $\theta_e^\circ$ : Sonnenzenitwinkel).

Insgesamt lässt sich schließen, dass die

- Anpassung des PROSAIL-Modells an die eingegebenen BRDF-Datensätze mit Ausnahme der Datensätze tiefer Sonnenstände (Sonnenzenitwinkel größer als  $55^\circ$ ) erfolgreich war.
- Anpassung des AMBRALS-Modells an die eingegebenen BRDF-Datensätze eine zuverlässige Normalisierung der „Off Nadir“-Reflexion nicht gewährleisten kann und als nicht gelungen betrachtet werden muß.

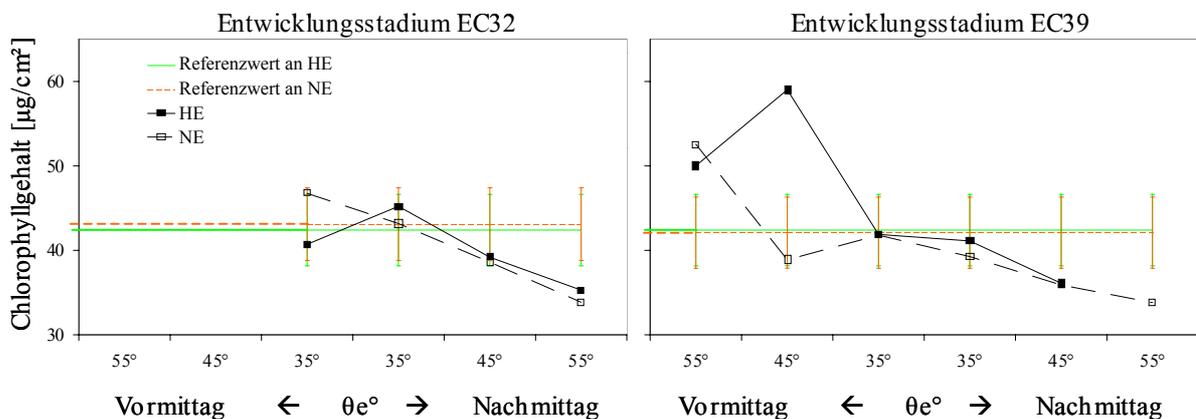
#### 5.4 BERECHNUNG DER STANDORTSPEZIFISCHEN BESTANDESMERKMALE MIT HILFE DES PROSAIL-MODELLS

Durch die Inversion des PROSAIL-Modells konnten für jedes Entwicklungsstadium die nachfolgend aufgelisteten Bestandesmerkmale berechnet werden (s. auch Kapitel 3.3.2.1):

- 1) der Chlorophyllgehalt ( $C_{ab}$ ),
- 2) die äquivalente Wasserdicke ( $C_w$ ),
- 3) der Gehalt an trockener Biomasse ( $C_m$ ),
- 4) der Blattflächenindex (BFI) und
- 5) der Blattneigungswinkel ( $\theta_l$ ).

Die berechneten (simulierten) Werte wurden mit „in situ“ Messungen verglichen, um die Aussagegenauigkeit des Modells unter realen Einsatzbedingungen zu überprüfen. In den Abbildungen sind die „in situ“ Messungen sowie ein +/- 10 % Vertrauensintervall als Vergleichsgrößen mit eingezeichnet. Folgende Ergebnisse können festgehalten werden:

- 1) Die Abschätzung des **Chlorophyllgehalts** war bei hohen Sonnenständen (kleinen Sonnenzenitwinkeln um 35°) erfolgreich, mit sinkendem Sonnenstand fällt die Übereinstimmung. Wie Abbildung 57 zeigt, sind die Abweichungen zwischen den simulierten und den gemessenen Werten beim Sonnenzenitwinkel von 35° gering, im günstigsten Fall weichen sie gerade mal 0.2% vom „Sollwert“ der Referenzmessungen ab, mit zunehmendem Sonnenzenitwinkel steigen die Fehler aber auf über 40%. Bei beiden EC-Stadien (EC 32 und EC 39) werden die Chlorophyllgehalte am Nachmittag unterschätzt. Bei den Vormittagsmessungen ist der Trend nicht eindeutig, weist aber auf eine Überschätzung hin.



HE: Standort hohen Ertrags, NE: Standort niedrigen Ertrags,  $\theta e^\circ$ : Sonnenzenitwinkel

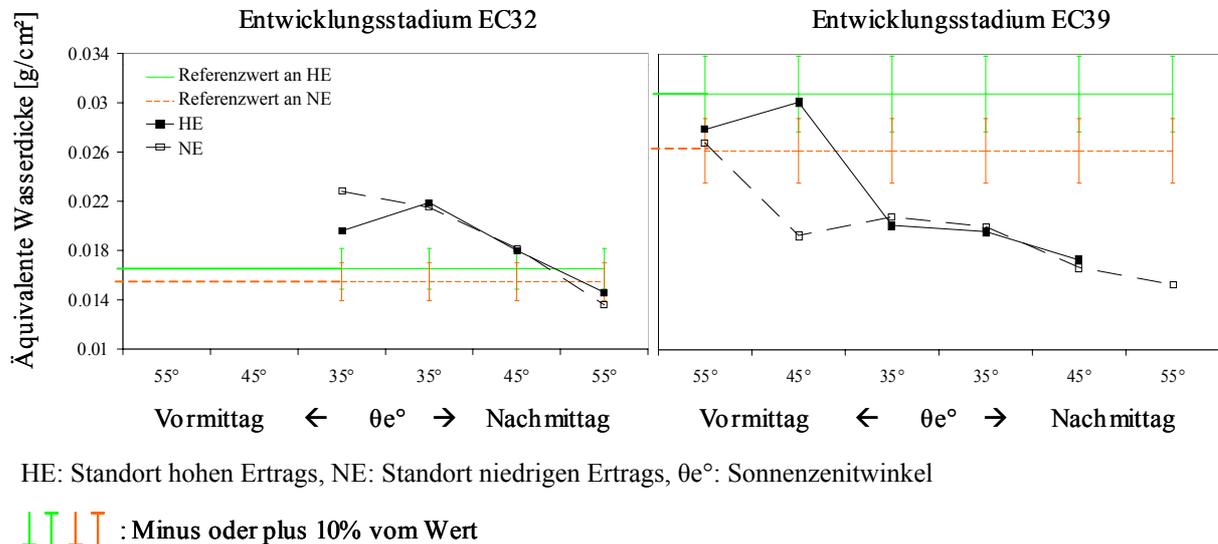
┆┆┆┆┆ : Minus oder plus 10% vom Wert

**Abbildung 57.** Leistung des PROSAIL-Modells bei der Abschätzung des Chlorophyllgehalts an den untersuchten Standorten der Vegetationsperiode 2000.

- 2) Die Simulation der **äquivalenten Wasserdicke** war mit Hilfe von BRDF-Datensätzen bei tiefen Sonnenständen (großen Sonnenzenitwinkeln über 45°) deutlich besser als diejenige bei hohen Sonnenständen. Trotzdem sind auch bei tiefen Sonnenständen große Abweichungen zwischen den simulierten und den Referenzwerten zu verzeichnen (Abbildung 58).

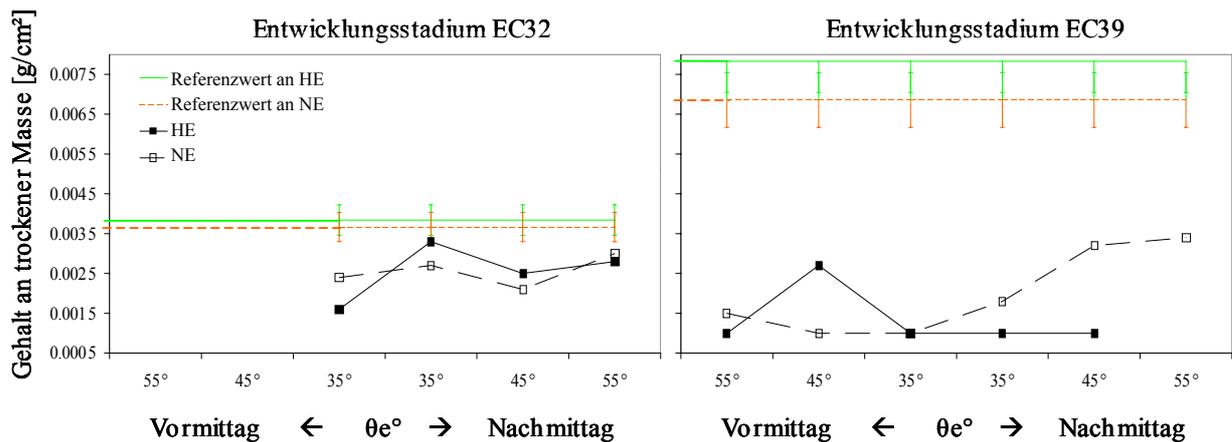
Die abgeschätzte äquivalente Wasserdicke nimmt im Laufe des Tages bis zum späten Nachmittag (Sonnenzenitwinkel um 55°) ab. Die Simulation bei EC32 zeigt im Schnitt leicht erhöhte Wassergehaltswerte an, bei EC39 liegt die Schätzung durch die Simulation ab der Mittagsmessung deutlich darunter. Bedauerlicher Weise war der Zeitpunkt der

Referenzwerterfassung im Gelände nicht mehr rekonstruierbar, so dass eine weitere Deutung dieser Ergebnisse, die im Trend das Verhalten im Tagesgang durchaus korrekt nachzeichnen, nicht möglich ist.



**Abbildung 58.** Leistung des PROSAIL-Modells bei der Abschätzung der äquivalenten Wasserdicke an den untersuchten Standorten der Vegetationsperiode 2000.

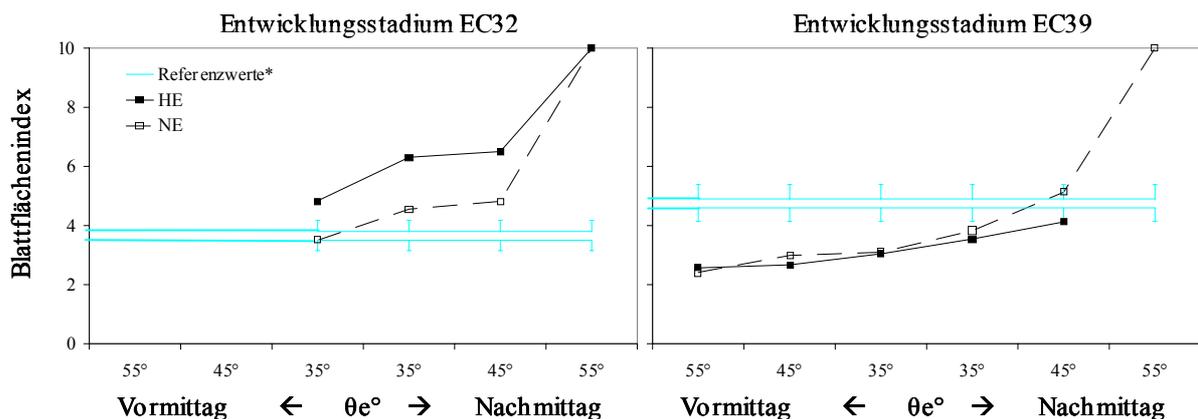
- 3) Die Bestimmung des Gehalts an **trockener Biomasse** scheiterte mit wenigen Ausnahmen. Wie aus Abbildung 59 hervorgeht, sind nicht nur die Unterschiede zwischen gemessenen und simulierten Werten sehr groß, sie schwanken auch beträchtlich was die Standortverhältnisse angeht. Man kann trotzdem ein relativ stabiles Verhalten des Modells über weite Sonnenzenitwinkelbereiche im Tagesverlauf erkennen (Abbildung 59). Dies lässt sich als Hinweis einer erforderlichen Eichung des Modells an die spezifischen Rahmenbedingungen der untersuchten Standorte deuten.
- 4) Die Referenzwerte für den **Blattflächenindex** (BFI, englisch LAI, leaf area index) wurden repräsentativ für den Gesamtschlag gemessen. Die Messstellen lagen nicht direkt an den Messflächen. Deswegen können die Werte für die Standorte hohen und niedrigen Ertrags nicht gesondert angegeben werden. Die Messungen zeigen eine Zunahme des LAI von EC32 zu EC39 um eine Stufe, von ca. LAI 4 auf ca. LAI 5 (Abbildung 60). Die PROSAIL-Simulationen können diese Werte kaum reproduzieren. Dies gelang lediglich bei Einzelfällen (z.B. EC32, Sonnenzenitwinkel von 35° am Vormittag, Standort niedrigen Ertrags). Für EC39 wurden sogar um bis zu 2 Stufen geringere LAI Werte berechnet. Die im Rahmen dieser Fehler „besten“ Ergebnisse sind zwischen Sonnenzenitwinkel 35° am Vormittag und 45° am Nachmittag zu verzeichnen. Der Trend zeigt eine Zunahme des simulierten LAI von Vormittags- zu Nachmittags-Messzyklen.



HE: Standort hohen Ertrags, NE: Standort niedrigen Ertrags,  $\theta e^\circ$ : Sonnenzenitwinkel

┆┆┆┆ : Minus oder plus 10% vom Wert

**Abbildung 59.** Leistung des PROSAIL-Modells bei der Abschätzung des Gehalts an trockener Biomasse an den untersuchten Standorten der Vegetationsperiode 2000.



HE: Standort hohen Ertrags, NE: Standort niedrigen Ertrags,  $\theta e^\circ$ : Sonnenzenitwinkel

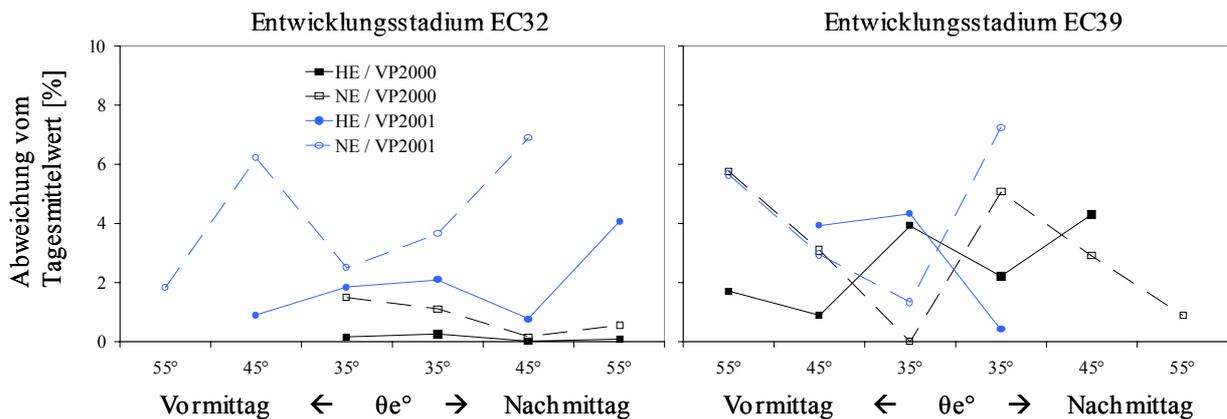
┆┆┆┆ : Minus oder plus 10% vom Wert

\*Referenzwerte: der Blattflächenindex wurde an naheliegenden Standorten im selben Schlag ermittelt und nicht direkt am Standort HE oder NE.

**Abbildung 60.** Leistung des PROSAIL-Modells bei der Abschätzung des Blattflächenindex an den untersuchten Standorten der Vegetationsperiode 2000.

- 5) Die messtechnische Erfassung des **Blattneigungswinkels** vor Ort ist praktisch nicht möglich ohne den Pflanzenbestand empfindlich zu stören. Diese Messgröße wird daher in der Regel lediglich qualitativ geschätzt. Ein photogrammetrisches Verfahren zur Ableitung des Blattneigungswinkels aus den Stereoaufnahmen der Messstellen ist noch nicht verfügbar (s. Kapitel 6.1.4).

Die Simulationsergebnisse wurden daher über den Tag gemittelt und der Simulationserfolg anhand der Abweichung der einzelnen Messzyklen vom Mittelwert abgeschätzt. Die simulierten Werte des Blattneigungswinkels bewegten sich innerhalb eines Tages unabhängig vom Sonnenzenitwinkel auf vergleichbarem Niveau bzw. um einen durchschnittlichen Wert (Abbildung 61). Aus Mangel an Referenzdaten ist schwer zu schließen, ob dies als gutes Simulationsergebnis zu werten oder auf geringe Sensibilität des Modells für diese Variable zurückzuführen ist.



HE: Standort hohen Ertrags, NE: Standort niedrigen Ertrags, VP: Vegetationsperiode,  $\theta_e^\circ$ : Sonnenzenitwinkel

**Abbildung 61.** Leistung des PROSAIL-Modells bei der Abschätzung des Blattneigungswinkels an den untersuchten Standorten im Vergleich zum Mittelwert der abgeschätzten Werte im Tagesverlauf, die bei EC32 um 76° (HE/ VP2000), 74° (NE/ VP2000), 72° (HE/ VP2001), 67° (NE/ VP2001) und bei EC 39 um 65° (HE/ VP2000), 70° (NE/ VP2000), 64° (HE/ VP2001), 63° (NE/ VP2001) lagen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass das PROSAIL-Modell je nach Sonnenzenitwinkel des eingegebenen BRDF-Datensatzes unterschiedliche Werte desselben Bestandesmerkmals berechnet. Diese Unterschiede variieren von statistisch bedeutungslos bis zu signifikant für die Zuverlässigkeit und Aussagegenauigkeit des Modells. Größte Unterschiede des Simulationsprozesses wurden zwischen den simulierten Werten eines Bestandesmerkmals am Mittag (Sonnenzenitwinkel um 35°) und am frühen Vormittag oder späten Nachmittag (Sonnenzenitwinkel um 55°) festgestellt. Dies stimmt mit den Ergebnissen der Anpassungsfähigkeit des Modells an die BRDF der untersuchten Standorte überein (s. Kapitel 5.3, Abbildung 54).

Wegen der Abhängigkeit der Leistung des Modells vom Sonnenstand und der nicht gelungenen Berechnung bestimmter Merkmale (z.B. des Gehalts an trockener Biomasse) sollte von einem möglichen Einsatz des Modells in „Precision Agriculture“ abgeraten werden. Die gelungene Berechnung bestimmter Merkmale (z.B. des Chlorophyllgehalts) und das relativ stabile Verhalten des Modells über weite Sonnenzenitwinkelbereiche im Tagesverlauf in bestimmten Fällen deuten jedoch auf eine bestehende Optimierungsmöglichkeit des Modells hin. Über die Leistung des Modells und den Forschungsbedarf wird in den Kapiteln 6.5 und 7.4 weiterhin diskutiert.

## 6 DISKUSSION

Der in dieser Arbeit vorgestellte Arbeitsablauf zur Entscheidungsfindung in der Teilschlagbewirtschaftung im Ackerbau (s. Kapitel 1.1, Abbildung 1) gründet sich auf die Informationsableitung aus Fernerkundungsdaten zur Ermittlung des aktuellen Wachstumszustands. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Optimierung dieser Informationsableitung, wobei vor allem die **Normalisierung** des vom Fernerkundungs-Sensor erfassten relativen Signals auf einen für das Entwicklungsstadium typischen **physikalischen Messwert** im Brennpunkt der Untersuchungen stand.

Die Untersuchungen fokussierten auf die richtungsabhängige Reflexionsverteilung. Der Hintergrund war, dass in der Praxis die Auswertung von „Off Nadir“-Reflexionswerten die Regel und nicht die Ausnahme ist und dass die richtungsabhängigen Reflexionsunterschiede signifikant sind und daher bei der Interpretation berücksichtigt werden müssen. Diese Einschätzung betrifft beide in der Teilschlagbewirtschaftung eingesetzten Fernerkundungs-Ansätze:

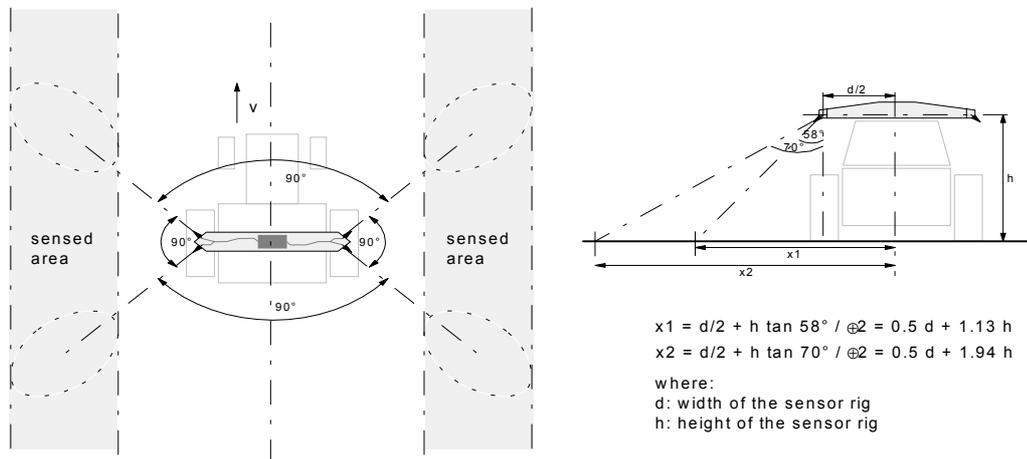
- Die Reflexion aus satelliten- oder flugzeuggestützten Sensoren wird quer zur Scan-Richtung und in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel des Sensors und Aufnahmehöhe unter unterschiedlichen Blickwinkeln erfasst (s. Kapitel 3.2). Davon sind insbesondere Flugzeugaufnahmen betroffen, bei denen Randaufhellungen oder -verdunkelungen quer zum Aufnahmestreifen auftreten.
- In der landwirtschaftlichen Praxis muss beim Einsatz von „Real Time“-Sensoren die Reflexion des Feldsegments direkt vor der Streueinheit erfasst und ausgewertet werden. Im Zusammenhang mit der Breite der Streueinheit (z.B. 15m) und einer Höhenbeschränkung im Geräteaufbau (z.B. 3.5m) durch die Infrastruktur, etwa Brücken oder Stromleitungen, muss die Reflexion mit schrägem Blickwinkel und damit einer „Off Nadir“-Position aufgenommen werden.

Um aus den „Off Nadir“-Reflexionswerten die Reflexion über der „Nadir“-Position ableiten zu können („Normierung“) sind Referenzdaten erforderlich. Im vorgeschlagenen Teilschlag-Konzept werden diese entweder zeitgleich aufgenommen (1) oder aus Datenbanken für die entsprechende Frucht und den benötigten Vegetationszeitpunkt berechnet (2):

- 1) Im ersten Fall unterscheidet man zwei methodische Ansätze:
  - a) Der erste betrifft die Kalibrierung von flugzeug- oder satellitengestützten Reflexionsaufnahmen: Anhand von zeitgleich „in situ“ feldspektrometrisch erfassten Reflexionsdaten, die alle Aufnahmegeometrien des Fernerkundungs-Systems berücksichtigen, werden die Daten des Fernerkundungs-Systems an die vor Ort erfassten Daten angepasst, „normalisiert“. Dieses, als „vicarious calibration method“ bekannte Verfahren gilt als das mit dem geringsten Fehler, da über eine simple Regression die radiometrischen Beeinflussungen durch Topographie, Atmosphäre und Beleuchtungs-/Beobachtungsgeometrie rechnerisch beseitigt werden.

Zu Forschungszwecken ist diese Methode anwendbar und wird dort auch bevorzugt eingesetzt. Auf der anderen Seite wäre sie für die landwirtschaftliche Praxis untauglich. Eine Flugzeug- oder Satellitenaufnahme deckt große Gebiete und viele Fruchtarten gleichzeitig ab, die sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befinden. Der Einsatz eines bodengestützten Sensors, um die „Off Nadir“-Reflexion für alle von der Aufnahme betroffenen landwirtschaftlichen Flächen zu kalibrieren, wäre unrealistisch teuer und würde die Flugzeug- oder Satellitenaufnahmen selbst überflüssig machen.

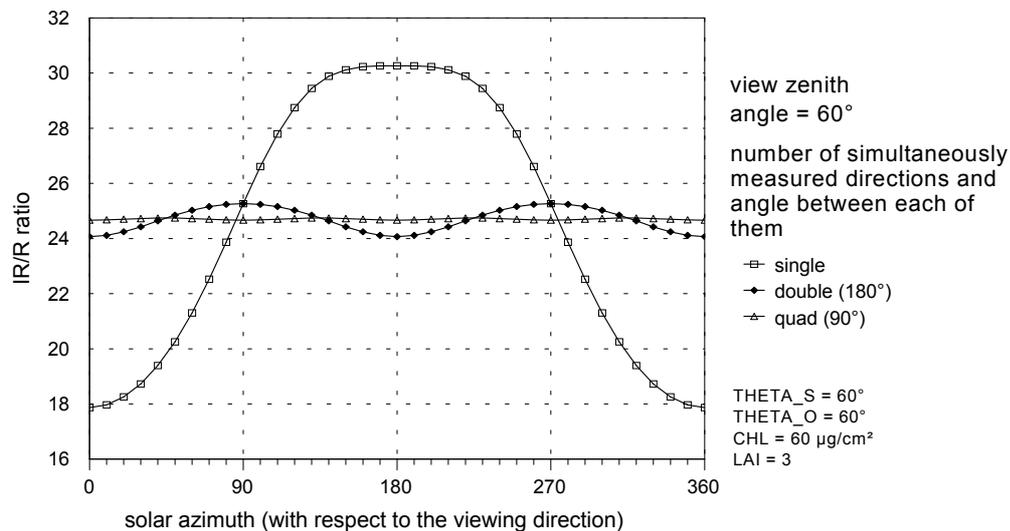
- b) Der zweite Ansatz betrifft die Normierung der Reflexionsaufnahmen von „Real Time“-Sensoren: Es wird gleichzeitig die Reflexion aus mehreren Richtungen aufgenommen und gemittelt. Diese Technik wird seit einigen Jahren vom „Hydro N“-Sensor der Firma Hydro Agri in Deutschland in der Landwirtschaft eingesetzt (Abbildung 62). Auf diese Weise wird nach Reusch (2001) die Auswirkung der richtungsabhängigen Effekte auf die Berechnung von Vegetationsindizes wie den Quotienten zwischen NIR und rotem Spektralbereich minimiert (Abbildung 63).



**Abbildung 62.** Aufnahmegeometrie des „Hydro N“-Sensors (aus Reusch, 2001). Durch Auswertung des Mittelwerts der vier um jeweils 90° versetzt erfassten Messungen, wird ein quasi richtungsabhängiges Signal generiert.

Schwachstellen dieser Mess-Technik sind u.a.:

- i) die Vergleichbarkeit des Signals im Tagesverlauf: Die gemittelte Reflexion ist je nach Sonnenstand unterschiedlich hoch (s. Kapitel 5.1.3, 5.1.4 {Abbildung 48}) wobei die Variationen der Intensität außerdem noch wellenlängenabhängig sind. Das heißt, dass bei unterschiedlichen Tageszeiten unterschiedliche Werte des verwendeten Vegetationsindex berechnet werden, was zu unterschiedlichen Informationen über den Bestandeszustand führt (s. Kapitel 5.2, Tabelle 4 [A]).
- ii) die Feststellung der standortspezifischen Reflexionsunterschiede. Auch sie schwanken mit dem Wechsel des Sonnenstands und sind wellenlängenabhängig (s. Kapitel 5.1.5).



**Abbildung 63.** Auswirkung des Sonnenazimutwinkels auf den Quotienten zwischen NIR und rotem Spektralbereich bei Berücksichtigung unterschiedlicher Anzahl von Aufnahmerichtungen (simuliert vom PROSPECT/SAIL-Modell) (aus Reusch, 2001). Es wird deutlich, wie mit der Zunahme der Messungen mit unterschiedlichem Azimut die Richtungsabhängigkeit zurückgeht. (IR: NIR, R: Roter Spektralbereich, THETA\_S: Sonnenzenitwinkel, THETA\_O: Beobachtungszenitwinkel, CHL: Chlorophyllgehalt, LAI: Blattflächenindex)

iii) der Verzicht auf die Information, die Strukturmerkmale zusätzlich über den Bestandeszustand anbieten (s. Kapitel 3.1.3).

iv) die Heterogenität der erfassten Teilfläche:

Wenn man den „Hydro N“-Sensor als Beispiel nimmt (Abbildung 62), dann beträgt die als homogen betrachtete Fläche ca. 95 m<sup>2</sup> bei einer Einsatzhöhe von 2.5 m und ca. 185 m<sup>2</sup> bei einer Einsatzhöhe von 3.5 m (ohne den Fahrweg des Traktors zu berücksichtigen). Der Einfluss der Boden- und Reliefheterogenität auf das Pflanzenwachstum und den Pflanzenzustand sowie die Auswirkungen von Bewirtschaftungsmaßnahmen, Witterung, Dichte der Unkrautbestockung, wie dies in Abbildung 64 dargestellt ist, oder von Krankheiten, bezogen auf den Anteil jeder Bestandeskomponente pro Quadratmeter, beeinträchtigen die Homogenität der erfassten Teilfläche.

v) die Breite der Streueinheit:

es wird erwartet, dass in Zukunft landwirtschaftliche Betriebe, die mit dem „Precision Agriculture“-Konzept operieren, aus wirtschaftlichen Gründen (u.a. wegen Kürzung der Agrarsubventionen) zunehmend größere Schläge bei zunehmenden Arbeitsbreiten (nach Ehlert (1996) bis zu 40 m) bewirtschaften werden. Die Anforderung, die verwendete Größe der Teilschlageinheit, die der Landwirt betriebsüblich als Einheit bewirtschaftet (225 m<sup>2</sup>) und für die Zuordnung von Ernteerträgen im landwirtschaftlichen Betrieb heute genutzt wird, bzw. der Streueinheit zur Düngung nicht weiter zu vergrößern, führt die Technik der Normierung der „Off Nadir“-Reflexion mit Hilfe der aus mehreren Blickwinkeln gemittelten Reflexion an ihre Grenzen:

### Management-Spuren im Winterweizenfeld

Erhöhung des Bodenanteils im Blickfeld  
in frühen Entwicklungsstadien



Erhöhung des Schattenanteils im Blickfeld  
in späten Entwicklungsstadien



### Änderung der Reihenausrichtung im Maisfeld

Unterschiedliche Pflanzdichte pro m<sup>2</sup>



Unterschiedlicher Schattenwurf



### Witterungseffekte im Wintergerste- und Rapsfeld

Windauswirkung auf die Blatt- und  
Grannenausrichtung der Wintergerste



Niedergelegte Rapspflanzen aufgrund  
der Witterungsverhältnisse



Feldgrenze zwischen Raps (links)-  
und Winterweizenfeld (rechts)



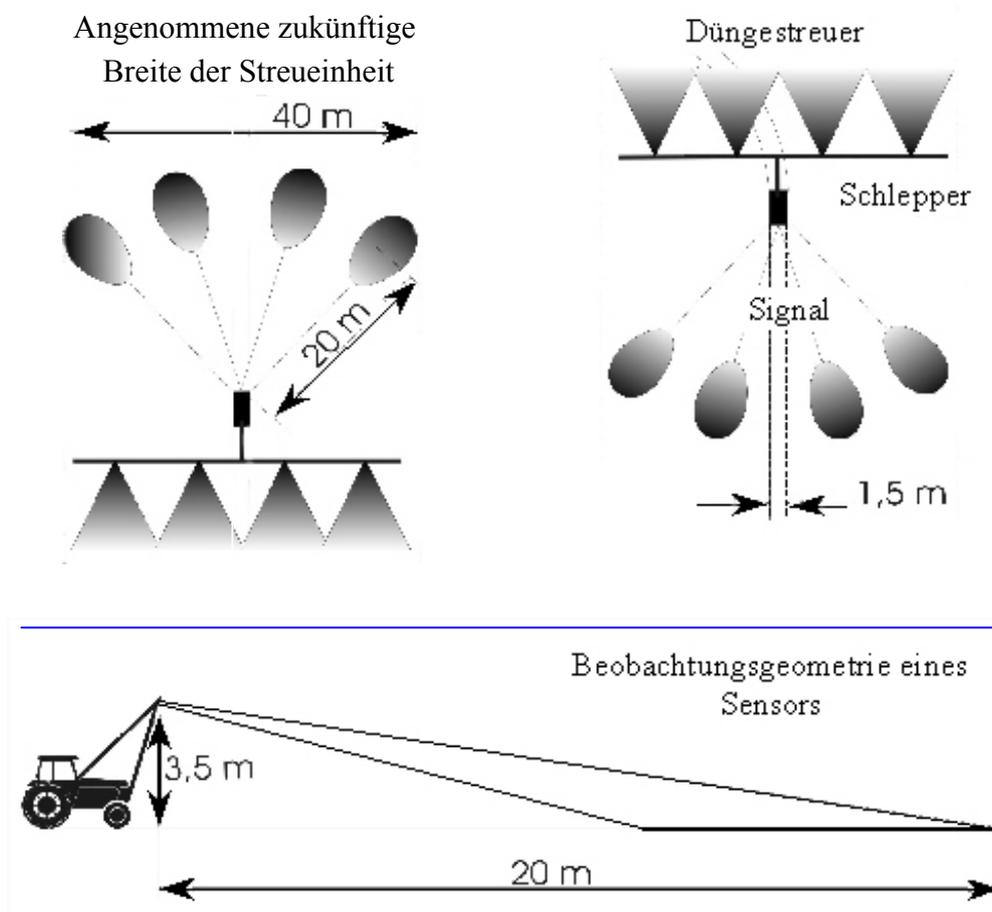
Unkrautwachstum im Wintergerstefeld  
(unterschiedliche Dichte der Unkräuter)



**Abbildung 64.** Beispiele von Faktoren, welche die Homogenität eines Vegetationsbestands innerhalb weniger Quadratmeter beeinflussen können.

Bei einer Einsatzhöhe des Sensors (z.B. des „Hydro N“-Sensors) von 3.5 m (Höhenbeschränkung durch die Infrastruktur) und einem Beobachtungszenitwinkel von  $70^\circ$  liegt die entfernteste erfassbare Stelle (auch in der Richtung zur Streueinheit) in einer Distanz von 6.8 m. Dadurch ist neben der fehlenden Aufnahmebreite bei einer gleichzeitigen Reflexionsaufnahme und Düngung die Gefahr groß, dass die beiden rückblickenden Sensoren die Reflexion hinter dem Düngestreuer aufnehmen.

Um die Reflexion des gesamten Arbeitsbereichs aufzunehmen, müssten demnach mehrere unabhängige, schräg blickende Sensoren eingesetzt werden, die jeweils Teilbereiche abdecken, wie das in Abbildung 65 skizziert ist. Die Normierung der „Off Nadir“-Reflexion jeder dieser Sensoren ist nur über den Vergleich mit Kalibrierungsdatenbanken oder über die Anwendung angepasster Reflexionsmodelle möglich.



**Abbildung 65.** Skizze eines künftigen Aufnahmekonzeptes von "Real Time"-Information bei zunehmenden Arbeitsbreiten der Streueinheit.

- 2) Im zweiten Fall handelt es sich um Referenzdaten, die in einer „Kalibrierungsdatenbank“ gespeichert sind. Die Referenzdaten liegen in Form von fertigen „look-up“ Tabellen vor und wurden anhand von Reflexionsmodellen erstellt, welche die Reflexionsverteilung spezifischer Fruchtarten und die Zusammenhänge mit ihren bio-chemo-physikalischen

Merkmale je nach Bodenhintergrund, Bewirtschaftung und Witterung im Verlauf einer Vegetationsperiode simulieren. Um die Bedürfnisse des „Precision Agriculture“-Verfahrens zu befriedigen, müssen Kalibrierungsdatensätze für alle Entwicklungsstadien (mindestens aber für die zur Bewirtschaftung signifikanten Entwicklungsstadien), alle Sonneneinstrahlungs- und Beobachtungswinkel sowie alle möglichen Einstrahlungsverhältnisse verfügbar sein.

In der internationalen Literatur findet man sowohl einzelne, für die Bedürfnisse eines bestimmten Experimentes erstellte, als auch systematisch aufgebaute BRDF-Datenbanken, die im Rahmen eines großen Projektes eingerichtet wurden (Kriebel, 1977; Walthall et al., 1993; Boucher, 1999; PARABOLA Home Page, 1999). Sie basieren jedoch auf unterschiedlichen Zielvorstellungen bzw. auf verschiedenen Messstrategien (z.B. Sonnenwinkeln, Beobachtungswinkeln, Wellenlängenbereichen, Kalibriermethoden, Begleitmessungen). Eine systematisch aufgebaute BRDF-Datenbank für die Anwendung in der Landwirtschaft und insbesondere für „Precision Agriculture“ fehlt bisher. Die Ergebnisse dieser Arbeit können mit der Erforschung der Reflexionsverteilung und der Entschlüsselung des richtungsabhängigen Reflexionsverhaltens von Winterweizenbeständen im Verlauf des Tages und über die Vegetationsperiode zum Aufbau einer solchen Datenbank beitragen.

In den folgenden Kapiteln soll der Beitrag dieser Arbeit zur Entstehung von Referenzdatensätzen unter folgenden Gesichtspunkten diskutiert werden:

- Das Messkonzept „in situ“ (s. Kapitel 6.1).
- Die Auswirkung der Witterungsverhältnisse auf die durchgeführte Messkampagne und die Entscheidungsunterstützung mit Hilfe von Fernerkundungsdaten (s. Kapitel 6.2).
- Das Ausmaß der Fehlbestimmung von Bestandesmerkmalen durch Vegetationsindizes, die mit Hilfe von „Off Nadir“-Reflexionsdaten berechnet wurden (s. Kapitel 6.3).
- Die Erkenntnisse über das richtungsabhängige Reflexionsverhalten der untersuchten Winterweizenbestände im Vergleich zu internationalen Studien (s. Kapitel 6.4).
- Die Aussagegenauigkeit der verwendeten BRDF-Modelle und ihre Schwachstellen beim Einsatz unter realen Bedingungen (s. Kapitel 6.5).

## **6.1 KONZEPT DER DATENAUFNAHME „IN SITU“**

### **6.1.1 Gültigkeit der Annahmen**

Die verfolgte Messstrategie basierte auf drei Annahmen (s. Kapitel 4.2.1):

- Die erste Annahme bezieht sich auf die Gültigkeit des Helmholtz'schen Reziprozitäts-Theorems (Helmholtz, 1883). Dieses Theorem versagt in der Regel nur bei der Fluoreszenz und bei der Polarisationssebene des Lichts unter dem Einfluss eines Magnetfelds. Kriebel (1996a) und Girolamo et al. (1998) überprüften die Gültigkeit des

Theorems. Es wurden dabei zwar Schwachpunkte und Abweichungen festgestellt, generell aber hat das Theorem nach Völlger (1993) Gültigkeit und Girolamo et al. (1998) stellen fest, dass es für Maßstäbe von einigen Metern bis zu Kilometern für vegetationsbedeckte Oberflächen und Wasseroberflächen grundsätzlich gültig sei.

- Die zweite Annahme setzt die Reflexionsverteilung auf beiden Seiten der Sonnenhauptebene als symmetrisch voraus und stützt sich dabei auf Arbeitsergebnisse von Shibayama et al. (1985), Martonchik (1994) und Kriebel (1996a). Die Annahme muss allerdings nach Befunden im Rahmen dieser Arbeit zumindest bei Heterogenitäten im Bestand angezweifelt werden (s. Kapitel 6 und Abbildung 64). Dabei gilt: Je kleiner die Fläche einer Messhemisphäre ist, desto geringer wird der Einfluss möglicher Heterogenitäten auf die Gültigkeit dieser Symmetrie.
- Die dritte Annahme setzt die Homogenität einer ca. 300 m<sup>2</sup> großen Teilfläche voraus (Fläche eines Messzyklus im Winterweizenfeld). Unabhängig von den bereits angesprochenen generellen Unsicherheiten einer derartigen Annahme kann bei sorgfältiger Auswahl der Testflächen eine recht gute Annäherung erreicht werden, die für eine Übertragung in die Praxis ausreichend erscheint, denn:
  - a) die Fläche der in der Praxis als Beurteilungszelle genutzte Teilschlageinheit von derzeit 15 x 15 m (225m<sup>2</sup>, s. Kapitel 6) weicht lediglich um ca. 25% von der Teilfläche ab, die von der Messstrategie als homogen angenommen wird.
  - b) die übliche Pixelgröße von Satellitenaufnahmen der LANDSAT TM Generation (im Durchschnitt ca. 300 - 900 m<sup>2</sup>), die für landwirtschaftliche Anwendungen eingesetzt werden und kalibriert werden müssen, liegt im gleichen Bereich oder ist sogar größer als die als homogen angenommene Teilfläche.

### **6.1.2 Variabilität der Größe der erfassten Messfläche je nach Beobachtungswinkel**

Da die Aufnahmehöhe bei den Untersuchungen zu Grunde liegenden Messaufbau konstant bleibt, nimmt die real erfasste Fläche mit zunehmendem Aufnahmezenitwinkel zu: von ca. 1 m<sup>2</sup> in Nadir-Position bis ca. 16.5 m<sup>2</sup> bei einem Beobachtungszenitwinkel von 60° (Fläche der Ellipse innerhalb der tropfenähnlichen Form der Aufnahmenfläche {s. Kapitel 4.2.2, Abbildung 34}).

Eine 1 m<sup>2</sup> große Messfläche erwies sich für Winterweizenbestände als repräsentativ. Innerhalb der Fläche von 1 m<sup>2</sup> befanden sich 455 bis 540 Ähren in Abhängigkeit vom Standort und von der Vegetationsperiode. Shibayama et al. (1985) erfassen mit 1.27 m<sup>2</sup> eine vergleichbare Messfläche, Kimes et al. (1985b), Baret et al. (1987) und Serrano et al. (2000) begnügen sich mit Messflächen zwischen 0.14 m<sup>2</sup> und 0.22 m<sup>2</sup> für ihre spektrometrischen Untersuchungen über Weizenbeständen.

Die Zunahme der integral erfassten Fläche bei zunehmendem Beobachtungszenitwinkel ist eine Schwachstelle der Messstrategien mobiler Einheiten zur Erfassung der Reflexionsverteilung (s. Kapitel 3.4.2). Sie erschwert den Vergleich zwischen dem

aufgenommenen Signal an verschiedenen Beobachtungspositionen und verhindert die Erfassung der Reflexionsverteilung über Parzellenversuchen.

Eine Möglichkeit zur Beseitigung, bzw. Einschränkung dieser Schwachpunkte besteht in der Anwendung des Prinzips bekannter Goniometer, wie z.B. FIGOS (s. Kapitel 3.4.2). Dabei wird die Messstelle nicht geändert, der Messausschnitt variiert aber. Der Nachteil liegt in der eingeschränkten Mobilität der Goniometer und darin, dass bei den geringen Messhöhen der kleinste erfasste Messausschnittes (im Nadirblick) an der absoluten Untergrenze liegt und damit nur bedingt repräsentativ ist.

Theoretisch Abhilfe schaffen könnte die Aufnahme aus variierender Höhe mit je nach Beobachtungswinkel variierendem Öffnungswinkel. Da bei einer solchen Lösung aber mit Intensitätsunterschieden zu rechnen ist, da ja durch einen kleineren Öffnungswinkel auch die Strahlungsmenge reduziert wird, die den Detektor erreicht, ist auch diese Lösung nur als Kompromiss zu verstehen. Speziell zur Erfassung der Reflexionsverteilung über Parzellenversuchen wäre eine derartige goniometerähnliche Messplattform allerdings wünschenswert und sollte weiterentwickelt werden.

### **6.1.3 Räumliche Verteilung der Aufnahmewinkel**

Die verwendete Winkelauflösung von  $45^\circ$  im Beobachtungssazimutbereich und  $15^\circ$  im Beobachtungszenitbereich (s. Kapitel 4.2.2), welche auf Versuche von Kimes (1983), Shibayama et al. (1985), Kimes et al. (1985b), Kimes et al. (1986), Ranson et al. (1991), Sandmeier (2000) und Beisl (2001) zurückgeht, erwies sich zur Approximation der BRDF von Winterweizenbeständen als ausreichend. Für die Planung neuer Untersuchungen sollen jedoch die Vorschläge von Sandmeier et al. (1998a & b), Verstraete et al. (1999), Sandmeier (2000), Vogt et al. (2000) und Bacour et al. (2001a) mitberücksichtigt werden. Sie berechneten anhand von Messserien des EGO und BRDF-Simulationen, wie viele und welche Messpositionen für die Approximation der BRDF mindestens notwendig sind. Kernpunkt der Aussage ihrer Arbeit ist, dass die Messungen im „hotspot“-Bereich verdichtet werden sollten, während die Messungen quer zur Sonneneinstrahlungsrichtung reduziert werden können:

- 1) Die Anforderung zur Verdichtung der Aufnahmen im „hotspot“-Bereich (s. Kapitel 2.3.3, Abbildung 16 und Kapitel 5.1.1, Abbildung 42, Fall 2a.iii) stimmt mit den Ergebnissen dieser Arbeit überein: In den im Rahmen dieser Arbeit aufgenommenen Reflexionsverteilungen ist die Abbildung des „hotspot“-Effekts nicht immer zu erkennen. Gründe dafür sind, dass
  - a) die Auflösung der Aufnahme in der Zenitrichtung mit  $15^\circ$  Schritten nicht fein genug ist, um den „hotspot“-Effekt zu erfassen, denn die durchschnittliche Breite des „hotspot“-Effekts in Zenitgrad ist  $\pm 5^\circ$  und kann bis zu  $\pm 2^\circ$  eng sein (Qin et al., 1995) (s. auch Kapitel 2.3.3, Abbildung 16).
  - b) die aufgenommenen Beobachtungszenitwinkel bis zu  $60^\circ$  nicht ausreichen um „hot spot“ Positionen bei tiefer stehender Sonne überhaupt abzubilden.

Im Umkehrschluss bedeutet das, dass ein bei Beobachtungszenitwinkeln von 30°, von 45° oder von 60° in den Graphen abgebildete Reflexionsmaximum nicht zwingend die „hot-spot“-Position darstellen muss: Diese kann sich zwischen, kurz vor oder kurz nach diesen Beobachtungszenitwinkeln befinden.

- 2) Die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen belegen auch - in Übereinstimmung mit Sandmeier et al. (1998b) und Schneider et al. (1999a, b & c) - die Zulässigkeit der Reduktion der Messungen quer zur Sonneneinstrahlrichtung, weil die größte Schwankungsbreite der Reflexion in der Sonnenhauptebene und die geringste Schwankungsbreite senkrecht zur Sonnenhauptebene gegeben ist (s. Kapitel 5.1.2).

#### **6.1.4 Registrierung von Bestandesmerkmalen**

Bei der Durchführung der Begleitmessungen zu den Bestandesmerkmalen sind folgende Schwierigkeiten deutlich geworden:

- 1) „In situ“-Messungen der Bestandesmerkmale sind zeitaufwändig und nicht wiederholbar.
- 2) Strukturvariablen sind, wenn überhaupt, die am schwierigsten unter realen Bedingungen repräsentativ aufzunehmenden Bestandesmerkmale. Aus diesem Grund sind Vereinfachungen und Annahmen zu ihrer Bestimmung notwendig. Bis heute wird z.B. der Blattneigungswinkel lediglich über groben Klassen, wie erectophil oder planophil, berücksichtigt.
- 3) Ergebnisse der ersten Projektphase des IKB-Dürnast-Projektes (Auernhammer et al., 1999) zeigen, dass die destruktiven Begleitmessungen zur Bestimmung von Bestandsvariablen in der Regel ein unzuverlässigeres Ergebnis, das heißt eine größere Schwankungsbreite der Messwerte lieferten, als die Ableitung derselben Variablen über die aufgenommenen Reflexionsmessungen (Liebler, 2001). Bei Gesprächen am Rande des IWSAPF Workshops in Freising (2001), sowie mit Kollegen der DLR und der Remote Sensing Laboratories (RSL) der Universität Zürich verdichtete sich dieser Verdacht. Ursachen liegen in Fehlern bei der Probennahme (z.B. Flächenbezug nicht absolut zuverlässig oder Verluste beim Schnitt) oder durch Veränderungen der Probe durch den Transport ins Labor bzw. durch die Zeitverzögerung bis zur Analyse (z.B. Wasserverlust, Gewichtsverlust oder chemische Umwandlungen in den Pigmenten)

Aufgrund dieser Schwierigkeiten müssen Verfahren entwickelt werden, welche die für die Bewirtschaftung notwendigen Informationen möglichst objektiv, kosten- und zeitsparend zur Verfügung stellen. Im Rahmen dieser Arbeit sind folgende in diese Richtung gehende Techniken eingesetzt worden:

- 1) Es wurden Stereo-Photos der Messstellen aufgenommen. Sie dienen der semi-automatisierten Ermittlung der Bestandekomponenten mit Hilfe der „Maximum Likelihood“-Klassifikationsmethode (s. Kapitel 4.2.4).
- 2) Anlass zur Aufnahme der Stereo-Photos war die Diskussion über die Entwicklungen von Bildauswertungsmethoden zur Ermittlung von Strukturmerkmalen, die auf der digitalen

Nahbereichs-Photogrammetrie und „Stereovision“ basieren (Barnsley, 1994; Lewis et al., 1997; Chapron et al., 1999). Dabei ist bisher ungelöst, wie die üblichen Algorithmen zur automatisierten Punktzuordnung bei der Erstellung von digitalen Geländemodellen (DGM) verändert bzw. angepasst werden müssen. Die Schwierigkeit bei der Lösung des Problems liegt in der Mehrschichtigkeit des Bestandes. Der Matching-Algorithmus kann nicht wissen, in welcher Ebene er sich befindet. Mit Hilfe einer Kombination photogrammetrischer und objektorientierter Bildanalysemethoden könnte eventuell eine Lösung gefunden werden.

- 3) Die aufgenommenen Reflexionsdaten wurden zur Ermittlung von Bestandesmerkmalen durch die Inversion des PROSAIL-Modells verwendet (s. Kapitel 5.4).

## **6.2 AUSWIRKUNG DER WITTERUNGSVERHÄLTNISSE**

In der Region des Untersuchungsgebiets beeinträchtigen im Frühling und besonders Sommer hohe Niederschlagsmengen (s. Kapitel 1.3.2, Abbildung 4) die Möglichkeit für Reflexionsaufnahmen unmittelbar, da hohe Niederschlagsmengen in der Regel eine hohe Bewölkungsfrequenz bedeuten, aber auch indirekt, da bei nassem Boden das Befahren des Schlages nicht möglich ist. Generell wurde festgestellt, dass ein wolkenloser Himmel von April bis Juni eher die Ausnahme ist. In diese Zeitspanne fällt aber das vegetative Stadium der Kulturentwicklung und somit die wichtigste Periode für die Düngemittelausgabe. Erschwerend kommt für die Erfassung der benötigten Messzyklen hinzu, dass ein wolkenloser Himmel am Morgen nicht garantiert, dass die wolkenfreien Bedingungen am früheren oder späteren Nachmittag noch gegeben sein werden.

Diese typische Problematik behinderte die präzise Ausführung des experimentellen Messplans während der Messkampagne in den Vegetationsperioden 2000 und 2001 und ist darüber hinaus eine Schwachstelle für die Erfassung von Flugzeug- und Satellitendaten in dieser für den Ertrag so wichtigen Vegetationszeitspanne in einem operationellen Einsatzszenario in Regionen mit ähnlichen Klimaverhältnissen (z.B. Regionen in Mitteleuropa). Dieses gilt insbesondere, wenn man sich auf Aufnahmen herkömmlicher Satellitensysteme verlässt, die über eine Wiederholrate zwischen 16 und 24 Tagen verfügen.

Der Einsatz von aktiven statt der angewendeten passiven Fernerkundungsverfahren, etwa RADAR- oder LASER-Fluoreszenz Systeme, wäre aufgrund ihrer theoretischen Unabhängigkeit von Witterungsverhältnissen prinzipiell eine Lösung. Erfassung und Interpretation solcher Referenzdaten sind jedoch derzeit noch nicht so weit ausgereift, um die Einführung in die landwirtschaftliche Praxis zu erlauben (Dendron Resource Surveys et al. (1997); Grenzdörffer, 1998; Steingießer et al., 1999; IWSAPF, 2001; Sticksel et al., 2001).

Um die Entscheidungsunterstützung mit Hilfe von Fernerkundungsdaten auch bei ungünstigen Witterungsverhältnissen möglich zu machen, wird die Einführung kulturspezifischer Wachstumsmodelle, die den Zustand hinsichtlich des phänologischen Stadiums und physiologischen Status nach dem Managementplan für jeden Zeitpunkt der Bestandsentwicklung simulieren können, in die Entscheidungsketten vorgeschlagen.

Die Kalibrierung und Aktualisierung der Modelle erfolgt über Abgleich mit den Witterungsdaten sowie über die Bestandsmerkmale, die über Reflexionsaufnahmen von flugzeug- oder satelliten-gestützten bzw. „Real-Time“ Systemen im Laufe der Vegetationsperiode an beliebigen Zeitpunkten ermittelt werden (vgl. auch Kapitel 1.1, Abbildung 2). Auf diese Weise kann die Bestandesentwicklung ab dem Zeitpunkt der jüngsten Aktualisierung immer wieder erneut simuliert werden. Die Entscheidungsunterstützung wird somit trotz ungünstiger Witterungsverhältnisse ermöglicht. Bevorzugt sind die Reflexionsaufnahmen zu verwenden, die von Zeitpunkten möglichst kurzfristig vor wichtigen Bewirtschaftungsentscheidungen stammen.

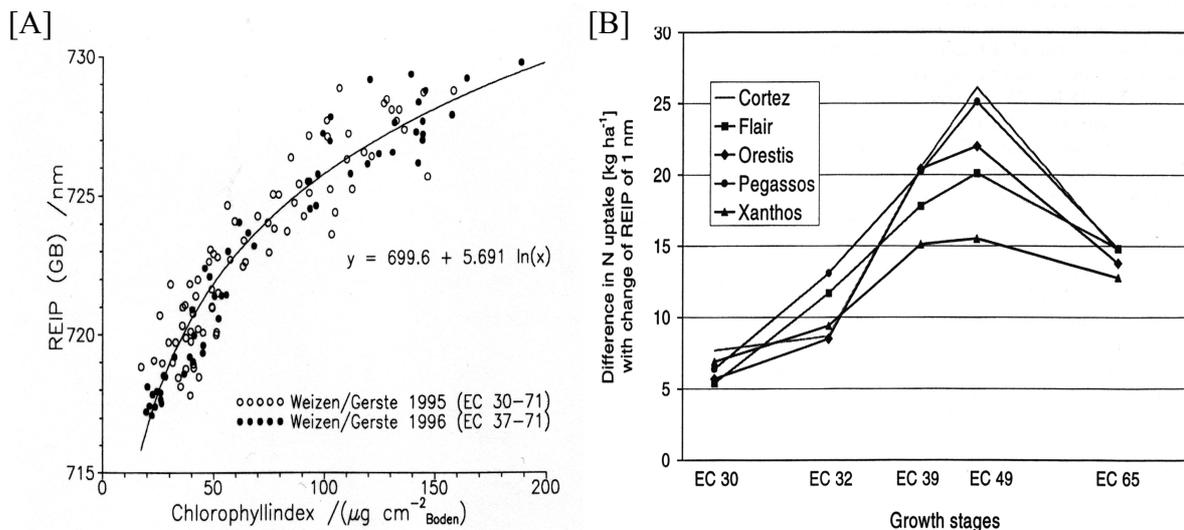
### **6.3 FEHLBESTIMMUNG VON BESTANDESMERKMALEN DURCH VEGETATIONSINDIZES**

Vegetationsindizes werden von der Richtungsabhängigkeit der „Off Nadir“-Reflexion im unterschiedlichen Ausmaß beeinflusst (s. Kapitel 5.2) (Wardley, 1984). Die Bedeutung der Größe der Unterschiede bei der Berechnung von Vegetationsindizes mit Hilfe der „Off Nadir“-Reflexion (s. Kapitel 5.2, Tabelle 4) hängt für die Anwendung in der Praxis eng mit den korrelierten Bestandsmerkmalen zusammen. Bisherige Forschungsergebnisse haben aufgezeigt, dass bereits kleinere Unterschiede der Vegetationsindexwerte zu erheblichen Fehlbeurteilungen der Bestandsmerkmale führen können. Im Konzept der Teilschlagbewirtschaftung führt aber jede Fehlbestimmung zu Fehlentscheidungen bei der Bewirtschaftung. Die zu klärende Frage ist, wie groß eine Fehlbestimmung dieser Bestandsmerkmale wird, wenn man keine Rücksicht auf die Richtungsabhängigkeit der Reflexion während der Berechnung der Vegetationsindizes nimmt. Die folgenden Beispiele sollen dieses verdeutlichen:

- 1) Eine Verschiebung bei der Berechnung des HWP um 1nm verursacht eine Fehlbestimmung
  - a) des Chlorophyllgehalts um  $20\mu\text{g}/\text{cm}^2$  (Reusch, 1997) (Abbildung 66 [A]),
  - b) der Stickstoffgabe um ca.  $15\text{kg}/\text{ha}$  (Reusch, 1999; Heege, 2001) bzw.
  - c) des Stickstoffentzugs zwischen  $5\text{kg}/\text{ha}$  und über  $25\text{kg}/\text{ha}$  je nach Entwicklungsstadium und Weizensorte (Liebler et al., 2001) (Abbildung 66 [B]).
- 2) 10% Unterschied bei der Berechnung des NDVI rufen
  - a) am Anfang der Vegetationsperiode (Entwicklung von 1-3 Blattschichten) eine Fehlbestimmung des Blattflächenindex (BFI) von mindestens 0.6 (Serrano et al., 2000) (s. Kapitel 3.1.2, Abbildung 18) und
  - b) einen Unterschied von  $13.1\text{ dt}/\text{ha}$  bei der Bestimmung des Ertragspotenzials hervor (Wood et al., 1999).
- 3) 5% Unterschied bei der Berechnung des  $0.901\mu\text{m}/0.972\mu\text{m}$  Quotienten verursachen eine Abweichung von 34% bei der Bestimmung des Wassergehalts in der Vegetationsdecke (Penuelas et al., 1997).

Aus diesen Beispielen und im Zusammenhang mit den im Kapitel 5.2 (Tabelle 4) dargestellten Unterschieden wird deutlich, dass die verursachten Fehlbestimmungen der Bestandesmerkmale für die von der praxisorientierten Landwirtschaft bzw. vom „Precision Agriculture“-Konzept geforderte Aussagegenauigkeit zu groß sind.

Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Lösung sieht daher als vorgeschalteten Schritt bei jeder Indexberechnung eine Normalisierung der „Off Nadir“ Reflexionswerte auf eine Referenzblickrichtung und einen Referenzszenenstand vor. Aus praktischen Gründen wird der Nadirblickwinkel bei Sonnenhöchststand des fraglichen Tages empfohlen.



**Abbildung 66.**

[A] Zusammenhang zwischen Chlorophyllindex und der Position des Hauptwendepunkts (HWP oder REIP) (aus Reusch, 1997).

[B] Unterschiede bei der Stickstoffaufnahme in Abhängigkeit von Weizensorte und Entwicklungsstadium bei Verschiebung des Hauptwendepunktes (REIP) um 1nm (aus Liebler et al., 2001).

#### 6.4 REFLEXIONSVERTEILUNGSMERKMALE VON WEIZENBESTÄNDEN IM VERGLEICH

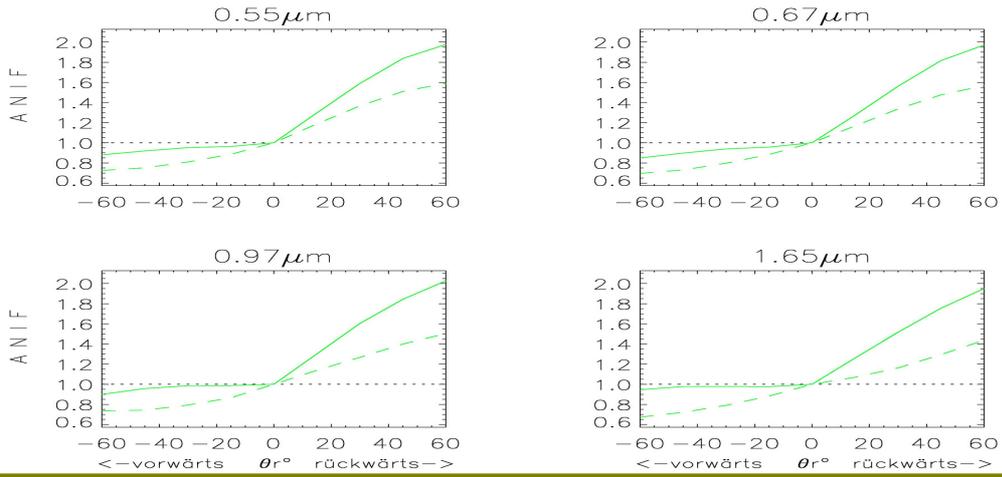
In der internationalen Literatur sind Studien über die Reflexionsverteilung von Weizenbeständen und insbesondere solche von Winterweizen selten. Die wenigen Arbeiten verwendeten unterschiedliche Aufnahmestrategien, untersuchten verschiedene Weizensorten und sind unter schwer vergleichbaren Rahmenbedingungen durchgeführt worden. Aus diesen Gründen sind die im Rahmen dieser Arbeit gefundenen Merkmale der räumlichen Reflexionsverteilung von Winterweizenbeständen nicht direkt mit einer anderen Studie vergleichbar. Trotzdem gibt es Übereinstimmungen der Ergebnisse mit der einen oder anderen Studie (s. im Vergleich zum Kapitel 5.1 und Abbildungen 67, 68 & 69). Diese beziehen sich auf folgende Aspekte:

- Weizenbestände zeigen bevorzugt Rückwärtsstreucharakteristik (Shibayama et al., 1985; Kimes et al., 1985b; Ammer et al., 1991; Schneider et al., 1999c).
- Der Phasenwinkel zwischen Beobachtungsazimut und Sonnenstand kontrolliert die Zu- oder Abnahme des Quotienten von „Off Nadir“- und „Nadir“-Reflexion (ANIF) bei Zunahme des Beobachtungszenitwinkels (Shibayama et al., 1985; Kimes et al., 1985b).
- Mit zunehmendem Sonnenzenitwinkel nimmt auch ANIF zu (Shibayama et al., 1985).

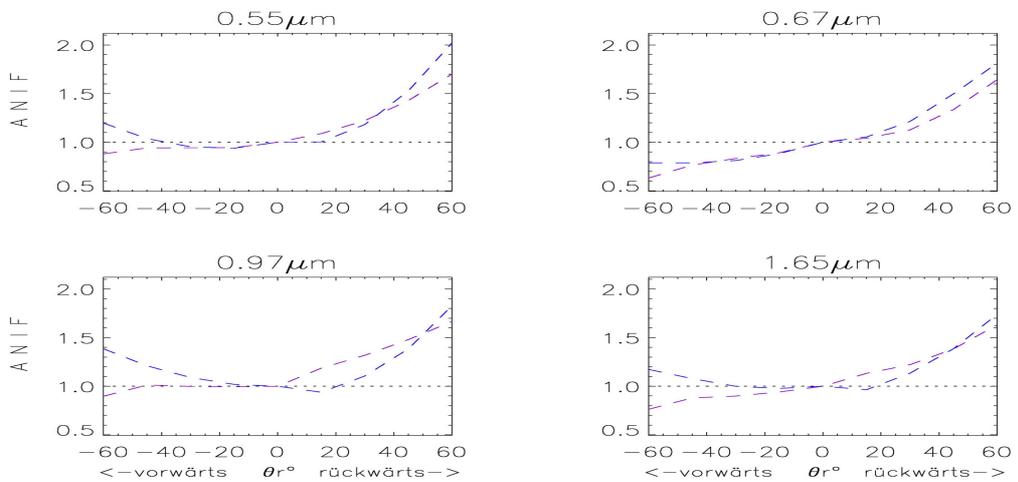
In den Arbeiten von Kimes (1983) und Sandmeier et al. (1998a) findet man Verhaltensweisen der richtungsabhängigen Reflexion, die allgemein auf Vegetationsbestände zutreffen. Diese Verhaltensweisen konnten auch für die untersuchten Winterweizenbestände nachgewiesen werden (Kapitel 5.1 und Abbildungen 67, 68 & 69. Im Einzelnen sind das:

- Die Reflexion erreicht in der Rückwärtsstreurichtung ein Maximum („hot-spot“-Effekt im Fall der Sonnenhauptebene).
- In der Vorwärtsstreurichtung nimmt die Reflexion bei großen Beobachtungszenitwinkeln (z.B.  $60^\circ$ ) und tiefen Sonnenständen zu. Dies bezieht sich insbesondere auf die untersuchte Fruchtsorte „Pegassos“, welche die Blätter bevorzugt eher waagrecht orientiert („planophile“-Bestand): Bei großen Beobachtungszenitwinkeln und tiefen Sonnenständen werden hauptsächlich die waagrecht orientierten Blätter der oberen Schichte eingestrahlt und beobachtet, auf denen wiederum die spiegelnde Reflexion zunimmt.
- Der Tiefpunkt der Reflexionsverteilung liegt zwischen der „Nadir“-Position und dem Beobachtungszenitwinkel von  $30^\circ$  in der Vorwärtsstreurichtung. Je größer der Bodenanteil im Blickfeld des Sensors ist bzw. je früher die Reflexionsverteilung in der Vegetationsperiode aufgenommen wurde, desto mehr wird dieser Tiefpunkt hin zu größeren Beobachtungswinkeln in der Vorwärtsstreurichtung (sogar größer als  $30^\circ$ ) verschoben. Dies geschieht aufgrund der Auswirkungen des Anteils der miterfassten, tiefer gelegenen Schichten („gap“-Effekt) und des Schattenwurfs.
- Der gleichzeitige Einfluss des „gap“-Effekts und des Schattenwurfs verursacht verschiedene unsymmetrische, becherähnliche (bowl shape) Reflexionsverteilungsformen um den Tiefpunkt. Zweidimensionale Querschnitte parallel zur Sonnenhauptebene sind in den Abbildungen 67, 68 & 69 dargestellt.
- Je größer die Reflexionsintensität über der „Nadir“-Position wird, desto schwächer tritt die Richtungsabhängigkeit der Reflexion auf bzw. umso gleichmäßiger wird die Reflexion im Raum verteilt. Grund dafür ist der zunehmend größere Anteil der Mehrfachstreuung im Bestand wegen geringerer Absorption (größerer Reflexion und Transmission) (Sandmeier et al., 1998a). Dem zu Folge ist z.B. die Reflexionsverteilung im NIR oder im grünen Spektralbereich gleichmäßiger als diejenige im roten oder im blauen Spektralbereich. Nach Sandmeier et al. (1998a) deutet dies darauf hin, dass die optischen Merkmale des Reflexionskörpers (hier Winterweizenbestand) sich auf die Richtungsverteilung der Reflexion auswirken. Die Aussage beruht auf Untersuchungen des Anisotropieindex (ANIX), aus Reflexionsdatensätzen von Grass und Kresse.

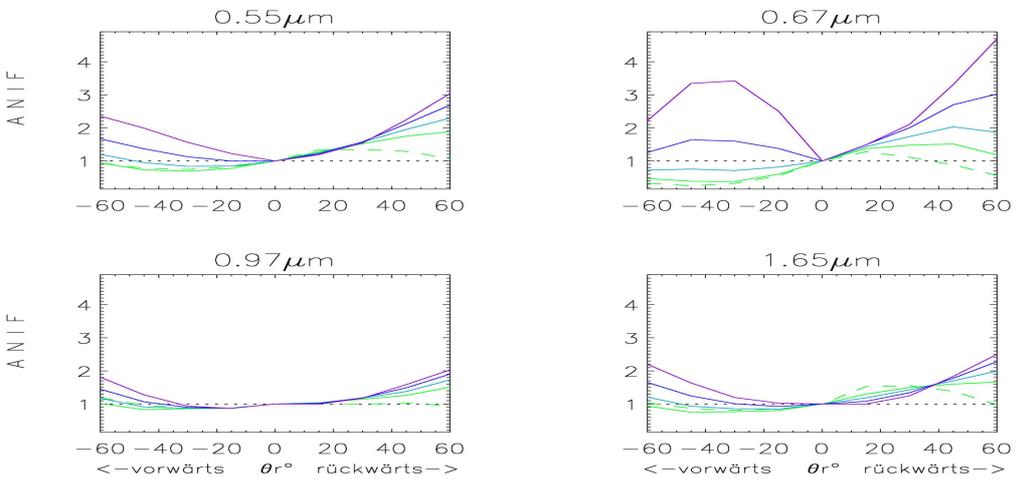
Boden



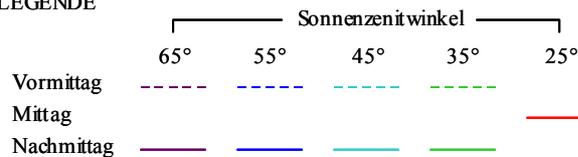
EC21  
VP2001



EC30  
VP2000



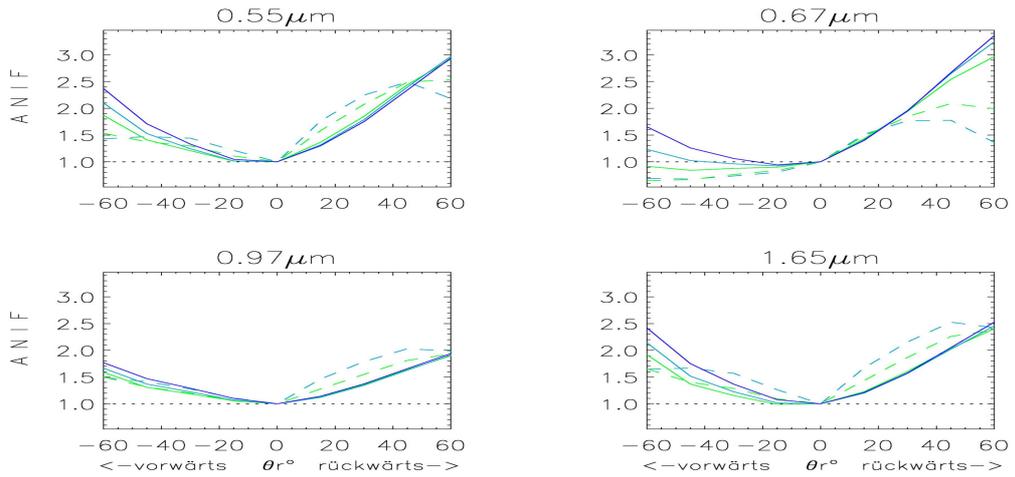
LEGENDE



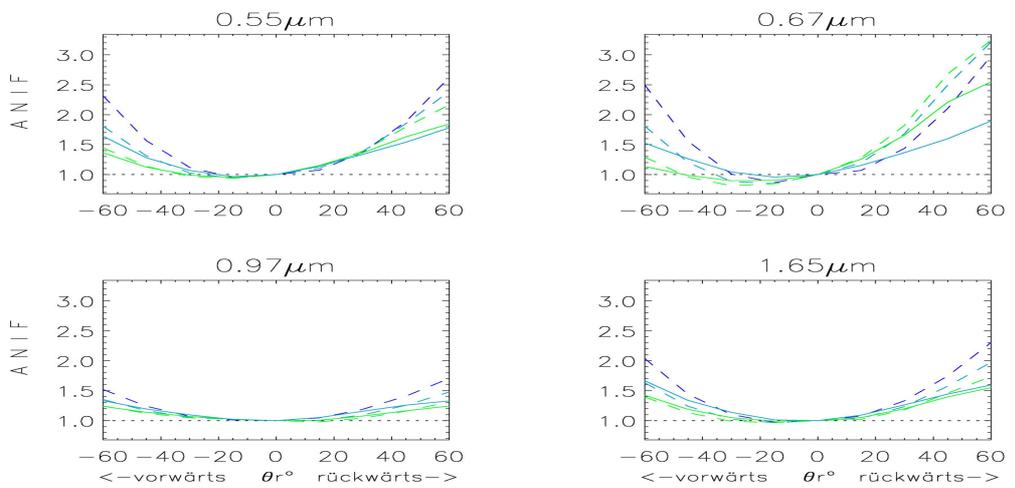
$\theta_r^\circ$  : Beobachtungszentwinkel  
 ANIF : Anisotropiefaktor  
 vorwärts : Vorwärtsstreirichtung  
 rückwärts : Rückwärtsstreirichtung  
 - - - - : Referenzlinie, worauf  
 $HDRF(\theta_r^\circ) = HDRF(\text{Nadir})$   
 HDRF : hemisphärisch-gerichteter  
 Reflexionsfaktor

Abbildung 67. Typische Reflexionsverteilung im Tagesverlauf in der Sonnenhauptebene bei nacktem Boden, bzw. bei den Entwicklungsstadien EC21 & EC30 des Winterweizenbestandes. (VP: Vegetationsperiode).

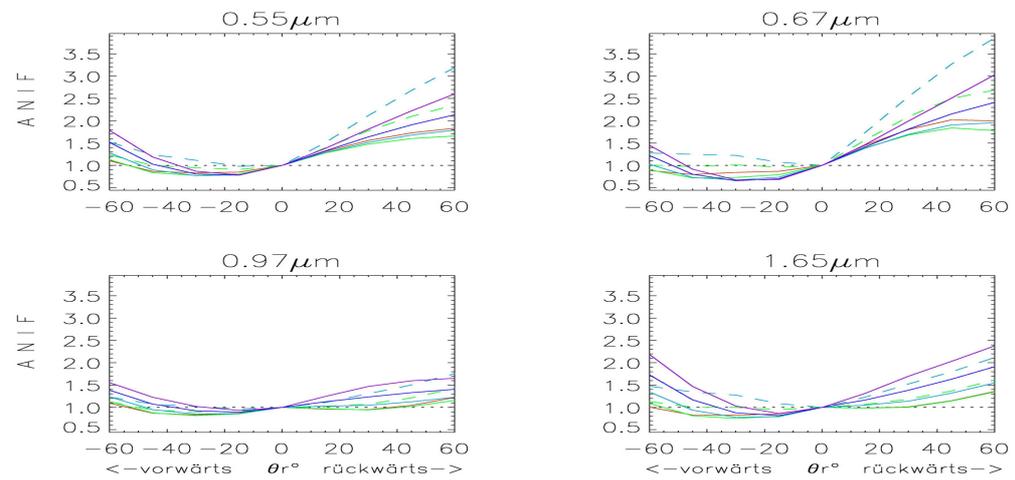
EC32  
VP2000



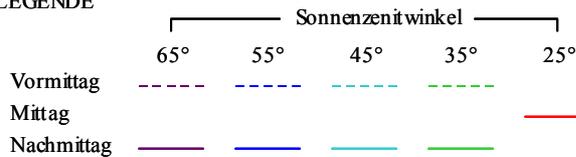
EC39  
VP2000



EC51  
VP2000



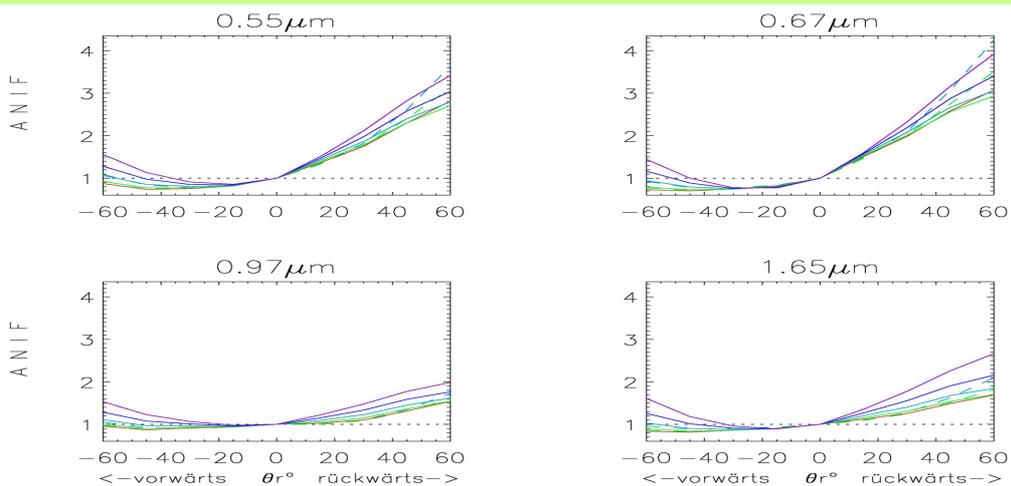
LEGENDE



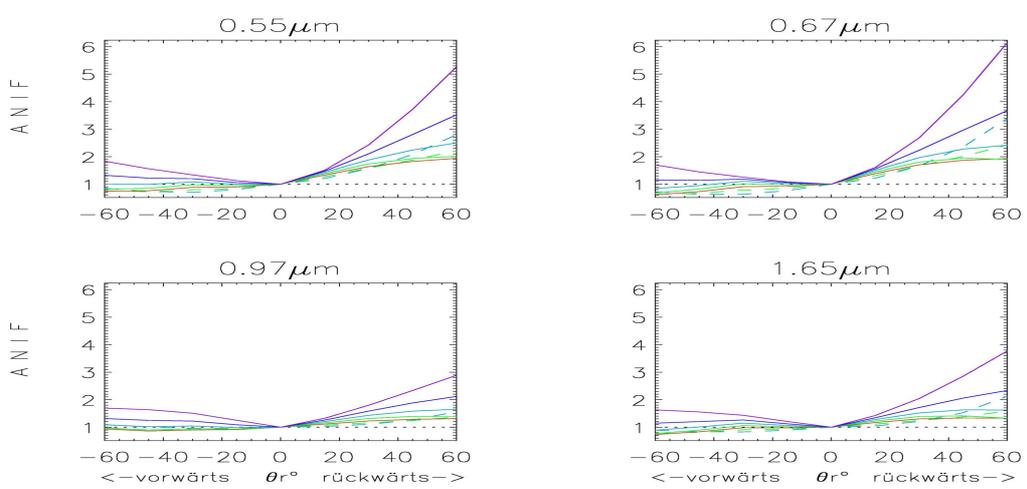
$\theta_r^\circ$  : Beobachtungszentwinkel  
 ANIF : Anisotropiefaktor  
 vorwärts : Vorwärtsstreirichtung  
 rückwärts : Rückwärtsstreirichtung  
 - - - - - : Referenzlinie, worauf  
 $\text{HDRF}(\theta_r^\circ) = \text{HDRF}(\text{Nadir})$   
 HDRF : hemisphärisch-gerichteter  
 Reflexionsfaktor

Abbildung 68. Typische Reflexionsverteilung des Winterweizenbestandes im Tagesverlauf in der Sonnenhauptebene bei verschiedenen Entwicklungsstadien (EC32, EC39 & EC51). (VP: Vegetationsperiode).

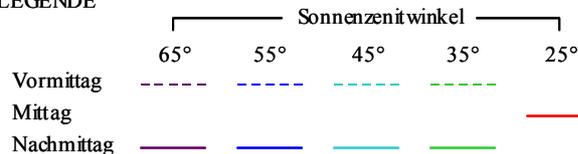
EC65  
VP2000



EC71  
VP2001



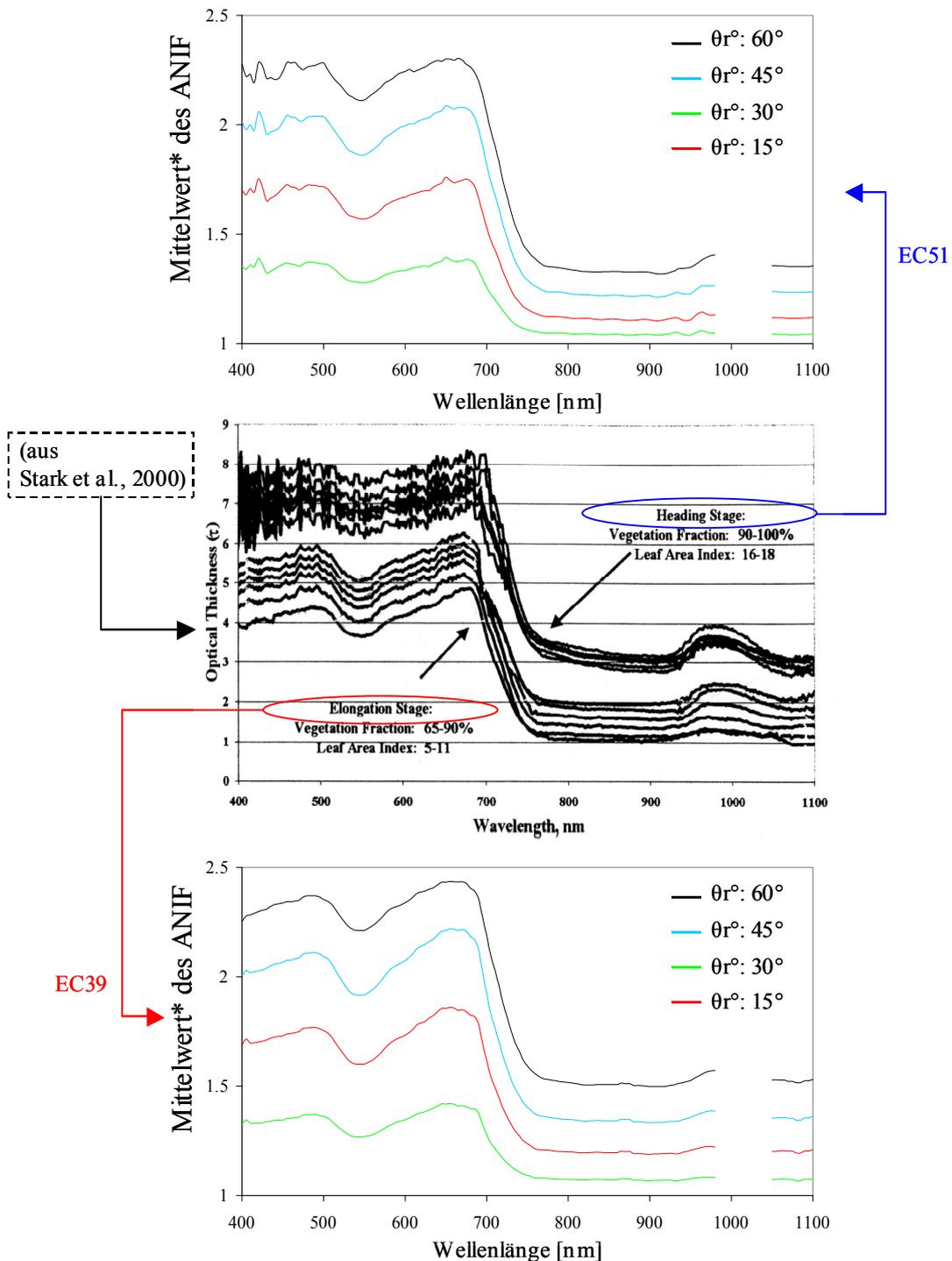
LEGENDE



$\theta_r^\circ$  : Beobachtungswinkel  
 ANIF : Anisotropiefaktor  
 vorwärts : Vorwärtsstreue  
 rückwärts : Rückwärtsstreue  
 - - - - : Referenzlinie, worauf  
 $HDRF(\theta_r^\circ) = HDRF(\text{Nadir})$   
 HDRF : hemisphärisch-gerichteter  
 Reflexionsfaktor

**Abbildung 69.** Typische Reflexionsverteilung der Winterweizenbestände im Tagesverlauf in der Sonnenhauptebene bei den Entwicklungsstadien EC65, EC71. (VP: Vegetationsperiode).

Übereinstimmung mit den Befunden im Rahmen dieser Arbeit zeigt auch eine Abbildung aus Stark et al. (2000) (Abbildung 70) über die Abhängigkeit der optischen Dichte ( $\tau$ ) bewässerter Weizenbestände von der Wellenlänge. Vergleichbar der Richtungsabhängigkeit in der ANIF-Darstellung der Winterweizenbestände von Dürnast der Vegetationsperioden 2000 und 2001 zeigen sich auch in der Signaturkurve der optischen Dichte ( $\tau$ ) Maxima im Bereich der Chlorophyllabsorptionsbande. Ein ähnlicher Verlauf ist bei der Richtungsabhängigkeit der Reflexion von Grass und Kresse in einer ANIX-Darstellung von Sandmeier et al. (1998a) beschrieben worden.



\*Mittelwert des ANIF in der Rückwärtsstreirichtung in beiden Vegetationsperioden je nach Entwicklungsstadium (einmal bei EC39 - Ende des Schossens-Makrostadiums / „elongation stage“ - und einmal bei EC51 – Anfang des Ährenschiebens-Makrostadiums / „heading stage“).

**Abbildung 70.** In Abhängigkeit von der Wellenlänge zeigen die optische Dichte ( $\tau$ ) bewässerter Weizenbestände (aus Stark et al., 2000) und der Verlauf der Richtungsabhängigkeit in der ANIF-Darstellung der Winterweizenbestände von Dürnast der Vegetationsperioden 2000 und 2001 sehr ähnliche Charakteristik: Maxima im Bereich der Chlorophyllabsorptionsbande. ( $\theta_r^\circ$ : Beobachtungszenitwinkel).

## 6.5 EINSATZ VON BRDF-MODELLEN

Aus den Ergebnissen des Einsatzes des PROSAIL- und AMBRALS-Modells zur Simulation der Reflexionsverteilung von Winterweizenbeständen und Berechnung von Bestandesmerkmalen (s. Kapitel 5.3 & 5.4) lässt sich auf die Notwendigkeit zur Optimierung dieser Modelle für ihre Umsetzung in der landwirtschaftlichen Praxis schließen. Nach Ergebnissen im Rahmen dieser Arbeit und im Kontext mit der Literatur ergibt sich folgende Einschätzung:

### SIMULATION DER REFLEXIONSVERTEILUNG

- 1) Die Anpassung des PROSAIL-Modells war bei hohen Sonnenständen (z.B. am Mittag) erfolgreich und wurde unpräziser bei tiefen / niedrigen Sonnenständen (z.B. am frühen Vormittag oder späten Nachmittag) (s. Kapitel 5.3). Dieser Befund kann wie folgt begründet werden:
  - Bei tiefen Sonnenständen ist der atmosphärische Einfluss stärker (s. Kapitel 2.2.1) und kann nicht so erfolgreich korrigiert werden (Bacour, 2002).
  - Das Reflexionsverhalten der „Spectralon“-Referenzscheibe ändert sich im Laufe des Tages: Rollin et al. (2000) behaupten, dass der wechselnde Sonnenstand eine Abweichung der „Spectralon“-Reflexion um maximal 2% von der angenommenen 100%-igen Reflexion für Sonnenzenitwinkel zwischen 0° (Nadir-Position) und 60° verursacht. Ihre Ergebnisse zeigen eine allmähliche Abnahme des „Spectralon“-Reflexionsfaktors ab Sonnenzenitwinkel von 0° (Nadir-Position) bis Sonnenzenitwinkel von 60°.
  
- 2) Der RMSE-Fehler der Anpassungsfähigkeit des AMBRALS-Modells betrug selten weniger als 0.037 und steht damit im Gegensatz zu Ergebnissen von Hu et al. (1997) und Wanner et al. (1997) (s. Kapitel 3.3.2.2 und 5.3). Für die deutlich schlechtere Erfolgsquote bei der Anpassung des AMBRALS-Modells können folgende Gründe angeführt werden:
  - Nach Jakubauskas (1996) und Kimes et al. (1998) sind lineare Modelle nicht besonders erfolgreich, weil das Verhältnis der gestreuten elektromagnetischen Strahlung zum Vegetationsbestand nicht linear ist.
  - Der unterschiedliche Beitrag jedes Spektralbereichs zum gesamten RMSE-Fehler (s. Kapitel 5.3) wird bei der Auswahl der Kernel nicht separat behandelt (Hu et al., 1997).
  - Nach Strahler et al. (1995), Sandmeier et al. (1998c) und Beisl (2001) ist eine hohe Winkelauflösung im Zenitbereich erforderlich, um eine akkurate Wiederherstellung der BRDF mit Hilfe von Kernel-getriebenen Modellen zu ermöglichen.
  - Chopping (2000) fordert ein dichteres Aufnahmenetz nah zur Sonnenhauptebene als Voraussetzung für eine erfolgreiche Anpassung des Modells.

- Zusätzlich kritisiert Chopping (2000) das Fehlen von Parametern in den AMBRALS-Gleichungen, die das Reflexionsverhalten bei der „hotspot“-Position oder spezielle Streuungseffekte (z.B. spiegelnde Streuungseffekte) berücksichtigen.

## BERECHNUNG VON BESTANDESMERKMALEN

Das PROSAIL-Modell erzielte bei der Berechnung von Bestandesmerkmalen / -variablen unterschiedliche Aussagegenauigkeiten (s. Kapitel 5.4). Die Sensibilität des Modells für die einzelnen Variablen war unterschiedlich hoch. Dies war zu erwarten, denn je nach Wellenlängen- und Winkelbereich wirken sich die simulierten Bestandesvariablen auf die Reflexion ungleich stark aus (Bacour et al., 2002a).

Nach Bacour et al. (2002a) sind jedoch nicht nur die beteiligten Variablen bei der Inversion von Bedeutung, sondern auch die Wechselwirkungen zwischen diesen Variablen (z.B. des Blattflächenindex mit dem Blattneigungswinkel), die sich manchmal stärker auf die simulierte Reflexion auswirken als eine Variable allein. Diese Interdependenz der beteiligten Variablen während des Inversionsprozesses ist sehr wichtig, weil

- zwei unterschiedliche Kombinationen der beteiligten Variablen zu selben Reflexionswerten führen können und weil
- die Geschwindigkeit der Inversion sowie die Präzision der Simulation beeinträchtigt werden können.

Studien über die Aussagegenauigkeit des PROSAIL-Modells - verglichen mit „in situ“ registrierten Datensätzen - insbesondere von Weizenbeständen sind relativ selten, wie rezente Untersuchungen von Bacour et al. (2002b) belegen:

- In Übereinstimmung mit den Ergebnissen dieser Arbeit berichten sie über Abweichungen bei der Bestimmung des Chlorophyllgehalts und des Blattneigungswinkels von weniger als 15%.
- Eine Unterschätzung des Blattflächenindex für Werte höher als 2.3 wurde beobachtet. Auch dies stimmt mit Ergebnissen dieser Arbeit überein: wie im Kapitel 5.4 dargestellt, wurde der Blattflächenindex bei EC32 über- und bei EC39 unterschätzt.
- Die von Bacour et al. (2002b) festgestellten Abweichungen bei der Bestimmung des Blattflächenindex von grundsätzlich weniger als 15% konnten von unseren Ergebnissen nicht bestätigt werden.

Schließlich wird nach Bacour et al. (2002b) die Aussagegenauigkeit der Simulationen zusätzlich beeinträchtigt durch :

- Annahmen, wie z.B. einer uniformen Blattausrichtung, welche im Simulationsprozess berücksichtigt werden, oder
- Größenunterschiede des Messausschnittes.

## **7 BILANZ GEGENÜBER DER ZIELSETZUNG**

Aus der Gegenüberstellung von Zielsetzung (s. Kapitel 1.2) und Ergebnissen dieser Arbeit kann nachfolgende Bilanz gezogen werden.

### **7.1 MESSTECHNISCHES ZIEL**

Im Hinblick auf das im Kapitel 1.2 gesetzte messtechnische Ziel ist in dieser Arbeit folgendes erreicht worden:

- 1) Systematische Reflexionsmessungen über den Messtag und die Vegetationsperiode hinweg sind im Rahmen einer angepassten Messstrategie in zwei Vegetationsperioden durchgeführt worden. Sie erfassten die räumliche Reflexionsverteilung von Winterweizen-, Wintergerste- und Maisbeständen.
- 2) Eine Methodik ist entwickelt worden, welche die „in situ“ registrierten „Off Nadir“-Reflexionsdatensätze zur Approximation der BRDF je nach Entwicklungsstadium aufbereitet.
- 3) Die BRDF ist über zwei Vegetationsperioden an jeweils zwei unterschiedlichen Standorten auf zwei Winterweizenschlägen approximiert worden.

Die entwickelte Methodik zeigt einen Weg auf, um anhand von „in situ“ Messungen und daraus approximierten BRDFs und Reflexionsmodellen die Korrektur von richtungsabhängigen Reflexionsschwankungen in Fernerkundungsdaten zu ermöglichen. Die Methodik ist auf boden-, flugzeug- und satellitengestützte Sensoren anwendbar.

### **7.2 ANALYTISCHES ZIEL**

Die „Normierung“ von Reflexionsdaten mit beliebigen Beobachtungsgeometrien auf die Nadirblickrichtung erfolgt anhand von BRDF-Modellen. Zwei bekannte BRDF-Modelle unterschiedlichen Ansatzes, nämlich das PROSAIL- und das AMBRALS-Modell, wurden anhand der erfassten Messdaten angepasst bzw. „geeicht“. Im Hinblick auf das im Kapitel 1.2 gesetzte analytische Ziel dieser Arbeit konnte damit Folgendes erreicht werden:

- 1) Durch die geschaffene BRDF-Datenbank konnte die „Normierung“ der bei beliebigem Beobachtungswinkel erfassten Reflexionswerte auf die Nadirblickrichtung durchgeführt werden. Dieses ist die Grundvoraussetzung für die standardisierte und damit vergleichbare Ableitung von Bestandesparametern aus Reflexionsdaten und bildet die Basis für die Überprüfung der Qualität bei der Inversion der Reflexionsmodelle.

- 2) Die Anpassung des AMBRALS-Modells misslang für die meisten Entwicklungsstadien.
- 3) Die Anpassung des PROSAIL-Modells war in soweit erfolgreich, als es zur Abschätzung standortspezifischer Bestandesmerkmale invertiert werden konnte.
- 4) Die Ergebnisse der Inversion des PROSAIL-Modells hinsichtlich der Abschätzung von Bestandesmerkmalen im Vergleich mit „in situ“-Messungen ergeben folgende Einschätzung: die vom PROSAIL-Modell gestützte Verknüpfung von „Off Nadir“-Reflexion und Bestandesmerkmalen zur Ableitung von Informationen über den standortspezifischen Bestandeszustand je nach Entwicklungsstadium liefert nur für bestimmte Bestandesmerkmale / -variablen akzeptable Resultate.

### 7.3 HYPOTHESEN

Über die Zielsetzung hinaus wurden zwei Hypothesen überprüft. Eine im Rahmen des messtechnischen Ziels und eine im Rahmen des analytischen Ziels (s. Kapitel 1.2). Beide wurden von den Ergebnissen bestätigt:

- 1) Zur Unterstützung der ersten Hypothese, nämlich, dass Unterschiede bestehen in der Reflexionsverteilung während eines Tagesgangs und im Verlauf einer Vegetationsperiode sowie zwischen Bereichen in einem Schlag, die einen unterschiedlichen Ertrag erzielen bzw. eine unterschiedliche nutzbare Feldkapazität (nFk) aufweisen, wurden im Einzelnen
  - a) die Abhängigkeiten der richtungsabhängigen Reflexionsverteilung von der Wellenlänge, der Beobachtungsposition, der Sonnenposition und der Bewölkung dargestellt.
  - b) die Abbildung der Entwicklung des Vegetationsbestandes im Verlauf der Vegetationsperiode über die BRDF dokumentiert.
  - c) die Auswirkung von standortspezifischen bio-physikalischen Bestandeseigenschaften auf die Reflexionsverteilung mit Hilfe von zwei Standorten, einem mit hohem und einem mit niedrigem Ertragspotential, für zwei Vegetationsperioden räumlich und quantitativ festgestellt.
- 2) Die zweite Grundlage dieser Arbeit war, dass der einfache Einsatz von herkömmlichen Vegetationsindizes, die mit Hilfe von „Off Nadir“-Reflexionsdaten allein berechnet werden ohne die Richtungsabhängigkeit der Reflexion zu berücksichtigen, zur Informationsableitung über den Bestandeszustand für „Precision Agriculture“ ungeeignet ist. Dies wurde mit Hilfe der quantitativen Berechnung des Ausmaßes der dadurch verursachten Fehlbestimmungen der Bestandesmerkmale bewiesen.  
 Darüber hinaus wurden in den für die Bildung der ausgewählten Vegetationsindizes beteiligten Wellenlängenbereichen relevante Wellenlängen ausgewählt, anhand derer sich die richtungsabhängige Reflexionsverteilung in diesen Wellenlängenbereichen repräsentieren lässt. Auf diese Wellenlängen fokussierten detaillierte Aussagen über die Richtungsabhängigkeit der Reflexion.

## 7.4 FORSCHUNGSBEDARF

Die Bilanz der Ergebnisse zeigt auf, in welchen Bereichen der Argumentationskette noch Forschungsbedarf besteht. So konnte nicht abschließend geklärt werden:

- die Größenordnung der Variation des richtungsabhängigen Reflexionsverhaltens bei unterschiedlichen atmosphärischen Verhältnissen (z.B. Bewölkung, Nebel).
- die quantitative Verknüpfung zwischen Änderungen in der Sorte, N-Düngung, Saatstärke und Wasserversorgung mit Änderungen in der räumlichen Reflexionsverteilung. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die Aussageschärfe der BRDF Modelle auch davon bestimmt war, dass nicht auf Parzellen gemessen werden konnte, auf denen diese Versuchs-Varianten angelegt waren.
- die Qualität der Ableitung von Strukturmerkmalen mit Hilfe von „Off Nadir“-Reflexionsmessungen, da keine „in situ“-Registrierung solcher Merkmale verfügbar war.

Um diese Arbeitsziele zu erforschen,

- sind die Erkenntnisse dieser Arbeit hinsichtlich des Potentials und der Mängel des Messkonzeptes zu berücksichtigen, nötige Weiterentwicklungen in der Technik voranzutreiben und diese in das Messkonzept zu integrieren.
- ist die Weiterführung der intensiven Aufnahme und Erforschung der Reflexionsverteilung von Winterweizenbeständen im Verlauf des Tages und der Vegetationsperiode erforderlich.
- sind die Ergebnisse dieser Arbeit im Auswertungsprozess zukünftiger Untersuchungen zu berücksichtigen.

Schließlich ist auf eine wichtige Erfahrung hinzuweisen: Der Aufwand zur Begründung einer systematischen BRDF-Kalibrierungsdatenbank ist für einzelne unabhängige Forschergruppen groß. Zusammenarbeit ist angesagt. In diesem Zusammenhang fehlt es an einer Standardisierung der BRDF-Datenaufnahme und -dokumentation auf der Basis eines international anerkannten Messprotokolls, um den Vergleich und den Austausch von Datensätzen zu gewährleisten (Sandmeier et al., 1998c).

## 8 AUSBLICK

Das „Precision Agriculture“-Konzept mit dem dargestellten kombinierten Ansatz („Real Time mit Map Overlay“-Ansatz) (s. Kapitel 1.1) bedeutet für die Landwirtschaft eine Neuerung, die erhebliche technische und logistische Investitionen nach sich ziehen wird. So werden unter anderem zu beachten sein:

- Im Bezug auf die teilflächenspezifisch bewirtschafteten Schläge wird eine umfangreiche Datenbank benötigt, die ständig aktualisiert werden muss. Eine derartige Datenbank muss unter anderem Informationen über die topographischen Parameter Inklination und Exposition, über Bodenparameter, Ertrag der letzten Jahre, Kalamitäten, Management-Geschichte und Mikroklima-Parameter beinhalten.
- Wachstumsmodelle und physikalische invertierbare Reflexionsmodelle müssen entwickelt und angepasst werden.
- Fernerkundlich erfasste Daten sind regelmäßig auszuwerten und zu integrieren.
- Die technische Ausrüstung der Landbautechnik muss an die Anforderungen des „Precision Agriculture“-Konzeptes angepasst werden.
- Die Managementpläne müssen sorgfältig vorbereitet sein und mit präziser räumlicher Ortung ausgeführt werden. Mit dem künftigen europäischen Galileo-Konzept (ab 2008) werden die technischen Rahmenbedingungen dafür verfügbar sein.

Das System des „Precision Agriculture“ wird damit für die Landwirtschaft zunächst einmal Kosten verursachen, die sie aufzuwenden nur bereit ist, wenn daraus wenigstens mittelfristig betriebswirtschaftliche Vorteile (Einsparung von Dünger und/oder Giften oder Ausgaben für die Bewässerung) zu erwarten sind.

Andererseits kann sich die Landwirtschaft gesellschaftspolitischen Forderungen auf Dauer nicht verschließen und muss Sorge dafür tragen, dass weltweit wichtige Ressourcen wie Wasser und Boden nicht übermäßig belastet werden. Für die Phase der Einführung bestehen natürlich auch Risiken, die in der Qualität des Konzepts bzw. seiner sensiblen Teile (wie z.B. Interpretation der Reflexionswerte, Präzision der Wachstumsmodelle oder spezifische Reaktion verschiedener Getreidesorten) liegen.

Zu diesen Risiken lässt sich daher sagen:

- In Zukunft ist denkbar, dass ausschließlich zugelassenes Saatgut von regionalen Saatgut-Zentren (in Bayern zum Beispiel die BayWa oder Raiffeisen-Gesellschaften) aufgrund von Wachstumsregionen, die vom Bodenstatus, Mikroklima und topographischen Eigenschaften bestimmt sind, vorgehalten werden. Die Sortenvielfalt für die Markt-Produktion wird auf einige wenige für jeden Kulturtyp und jede Wachstumsregion beschränkt. Die spezifischen Eigenschaften dieser Sorten sind gut bekannt und werden Unterschiede und Interpretationsschwierigkeiten bei den Reflexionsmodellen minimieren helfen.

- Das „Precision Agriculture“-Konzept wird derzeit von wenigen Innovatoren angewendet und überprüft (z.B. IKB-Dürnast Projekt, Auernhammer et al., 1999). Tendenziell zeichnen sich neben den umweltschonenden Vorteilen auch potenzielle ökonomische Vorteile ab, die allerdings gegenwärtig noch nicht als gesichert angesehen werden können (Jürgens, 2000; Augsburg, 2002).
- Insgesamt wird erwartet, dass sich die Chance auf einen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber der traditionellen Bewirtschaftungsweise erhöht, je größer die kleinräumig vorhandene Standortvariabilität ist (Jürgens, 2000).
- Wenn die praktische Nutzbarkeit des Konzeptes bestätigt wird und die Rahmenvoraussetzungen für eine allgemeine Einführung des „Precision-Agriculture“-Konzeptes in die herkömmliche Landwirtschaft gewährleistet werden, könnte die Aufgabe der Einrichtung von Kalibrierungsdatensätzen direkt von den regionalen Saatgut-Zentren übernommen werden.

Das ganze Konzept wird allerdings nur dann akzeptiert und eingesetzt, wenn es zu einer Steigerung der Einkommen der Landwirte führt oder zumindest das Risiko von Einkommensausfällen verringert. In Verbindung mit den schon angesprochenen Entlastungen der Umwelt sollten deshalb die Anstrengungen der Forschung für eine Optimierung der teilflächenspezifischen Strategien in der Landwirtschaft engagiert fortgesetzt werden.

## ZUSAMMENFASSUNG (ABSTRACT)

### IN DEUTSCH

Fachlich/thematischer Hintergrund zur Durchführung dieser Arbeit waren die Feststellungen 1) der FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), dass Wasserqualität und Wasserversorgung noch vor der Nahrungsmittelknappheit zu den gravierendsten Problemen dieses Jahrhunderts heranwachsen werden und 2) dass die herkömmliche Landwirtschaft eine der Haupt-Quellen der Oberflächen- und Grundwasserverunreinigung ist. Unsere Wasserressourcen werden sowohl durch den übermäßigen Gebrauch von Düngemitteln, als auch durch ineffizientes Bewässerungsmanagement gefährdet. Ökonomische Rahmenbedingungen (EU und Weltmarkt) drängen auch auf eine sparsame und nachhaltige Bewirtschaftung der verfügbaren Ressourcen. Für den landwirtschaftlichen Bereich gibt es zwei Alternativen: 1) kompletten Umschwung in Richtung ökologische Landwirtschaft, mit der Gefahr, dass die Nahrungsmittelversorgung nicht gewährleistet werden kann, oder 2) eine mit Nachdruck in Richtung Nachhaltigkeit optimierte konventionelle Landwirtschaft. Die vorgelegte Arbeit soll bei der Umsetzung der zweiten Alternative helfen und unterstützt das Konzept der „Precision Agriculture“. Allgemeines Ziel ist es, über die Anwendung von „Real Time“ erfassten Reflexionsdaten die optimale, kleinräumig differenzierte Düngemenge auf der Basis von Boden-, nFk-, Ertrags- und Topographiekarten, Reflexions- und Wachstumsmodellen und Witterungsdaten zu bestimmen. Reflexionsdaten werden zur Ermittlung des aktuellen Wachstumszustands benötigt.

Als Ausgangspunkt der Untersuchungen stand fest, dass 1) in der Praxis die Auswertung von „Off Nadir“-Reflexionswerten die Regel und nicht die Ausnahme sein wird und 2) die richtungsabhängigen Reflexionsunterschiede signifikant sind und daher bei der Interpretation berücksichtigt werden müssen. Die daraus zu ziehenden Schlussfolgerungen sind: 1) Vegetationsindizes berechnet aus „Off Nadir“-Reflexionsdaten müssen zu Fehlinterpretationen führen. 2) „Off Nadir“-Reflexionsdaten müssen daher normalisiert werden, bevor sie als Informationsquelle für die Ableitung des Bestandeszustands genutzt werden können. Aus der Auswertung der internationalen Literatur ergab, dass systematisch aufgebaute Kalibrierungsdatensätze für die Anwendung in „Precision Agriculture“ bisher fehlen.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden eine spezielle Messkonstruktion und –strategie für die Aufnahme der räumlichen Reflexionsverteilung entwickelt und „in situ“ im Tagesverlauf über zwei Vegetationsperioden und mehreren Feldfruchtarten jeweils auf Stellen hoher und niedriger natürlicher Feldkapazität (nFk) eingesetzt. Daraus wurde die Reflexionsverteilungsfunktion (Bidirectional Reflection Distribution Function – BRDF) für Winterweizen approximiert. Es wurden 1) Rückschlüsse über das richtungsabhängige

Reflexionsverhalten gezogen, 2) Informationen über die Einflussfaktoren abgeleitet, die das richtungsabhängige Reflexionsverhalten bestimmen und 3) Schlussfolgerungen über die Größenordnung und Verteilung der Reflexionsunterschiede zweier Teilschläge auf Böden unterschiedlicher nutzbarer Feldkapazität im selben Winterweizenschlag ermittelt.

Im Brennpunkt der Untersuchungen stand die **Normalisierung** des vom Fernerkundungs-Sensor erfassten relativen Signals auf einen für das Entwicklungsstadium typischen **physikalischen Messwert**. Dies wurde verwirklicht durch 1) die geschaffene BRDF-Datenbank, welche die „Normierung“ der bei beliebigem Beobachtungswinkel erfassten Reflexionswerte auf die Nadirblickrichtung ermöglichte und 2) die Anpassung des PROSAIL-Modells, das zur Abschätzung standortspezifischer Bestandesmerkmale invertiert werden konnte. Die Aussagegenauigkeit des Modells lieferte für bestimmte Bestandesmerkmale (z.B.  $C_{ab}$ ) akzeptable Resultate.

Die Bilanz der Ergebnisse zeigt auf, dass Hauptpunkte weiterführender Untersuchungen betreffen: 1) die Größenordnung der Variation des richtungsabhängigen Reflexionsverhaltens bei unterschiedlichen atmosphärischen Verhältnissen, 2) die quantitative Verknüpfung zwischen Änderungen in der Sorte, N-Düngung, Saatstärke und Wasserversorgung mit Änderungen in der räumlichen Reflexionsverteilung und 3) die Qualität der Ableitung von Strukturmerkmalen mit Hilfe von „Off Nadir“-Reflexionsmessungen.

Die Integration von „Real Time“-Fernerkundungsdaten zur Aktualisierung der Applikationskarten gemäß des teilflächenspezifischen Wachstumsverlaufs im „Precision Agriculture“-Konzept wird für die Landwirtschaft zunächst einmal Kosten verursachen. Andererseits kann sich die Landwirtschaft gesellschaftspolitischen Forderungen auf Dauer nicht verschließen und muss dafür Sorge tragen, dass weltweit wichtige Ressourcen wie Wasser und Boden nicht übermäßig belastet werden. Das ganze Konzept wird allerdings nur dann akzeptiert und eingesetzt, wenn 1) seine praktische Nutzbarkeit bestätigt wird, 2) die Rahmenvoraussetzungen gewährleistet sind und 3) es zu einer Steigerung der Einkommen der Landwirte führt oder zumindest das Risiko von Einkommensausfällen verringert.

## IN ENGLISCH

Title in English: Information extraction from “off nadir” reflection acquisition for decision support in “precision agriculture”.

The background subject matter of this dissertation were the ascertainments that 1) water quality and water supply will become even before food shortage one of the gravest increasing problems of this century (Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO) and 2) conventional agriculture is one of the main causes of the surface and underground water pollution. Our water resources are endangered both through the overuse of fertilizers and through inefficient irrigation management. The existing economical market frames (EU and world market) are also forcing for an efficient and sustainable management of the

available resources. There are two alternatives for the agricultural sector: 1) a complete shift towards ecological agriculture under the risk of insufficient food supply or 2) an optimised viable conventional agriculture. This dissertation's purpose is to lead towards the realization of the second alternative and supports the concept of "precision agriculture". The general objective is to specify through the use of real time acquired reflection data the optimal, site specific differentiated fertilizer quantity on the basis of soil maps, maps of useful field capacity, yield and topography maps, as well as growth models and weather data. The reflection data are needed for the estimation of the present growth status.

At the starting point of the research it was certain that 1) in practise the evaluation of "off nadir" reflection data is the norm and not the exception and 2) the directional reflection differences are significant and therefore they should be taken into consideration for the interpretation. The subsequent conclusions are: 1) Vegetation indices, calculated from "off nadir" reflection data, must lead to false interpretations and 2) "off nadir" reflection data must therefore be normalised before they could be used as an information source for the estimation of the canopy status. The research in the international bibliography has shown that systematically built calibration databases for the application in "precision agriculture" are presently missing.

This research focused on the registration of the directional reflection distribution in space. A special measurement construction and measurement strategy were developed and applied for the registration of the reflection distribution "in situ" during the day, during two vegetation periods and a few field cultivations at positions of low and high useful field capacity. Within the frame of the presented dissertation, the Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF) was approximated for winter wheat. BRDF-data analysis results concerned 1) the directional reflection behaviour, 2) the factors influencing the directional reflection behaviour and 3) the extent and distribution of the reflection differences between plot sections on soils with different useful field capacity in the same winter wheat plot.

In the core of the research was the **normalization** of the relative signal registered with the remote sensing sensor in a typical **physical measurement value** for the growth stage. This was accomplished through 1) the created BRDF-database, which made feasible the standardization of the registered reflection values under casual observation angles in reflection values over nadir, and 2) the adjustment of the PROSAIL-model, which was inverted for the estimation of site specific canopy characteristics. The accuracy of the modelled values yielded acceptable results for specific canopy characteristics (i.e.  $C_{ab}$ ).

The balance of the results indicates that main points for future research are summarized in: 1) the extent of the variation of the directional reflectance behaviour under different atmospherical conditions, 2) the quantitative relation between alterations in the sort, N-fertilization, sowing density and water supply with alterations in spatial reflection distribution and 3) the quality of estimation of structural characteristics with the use of "off nadir" reflection measurements.

The integration of "real time" remote sensing data for the updating of the application maps according to the site specific growth development in "precision agriculture" concept brings about costs for the agriculture. On the other hand, agriculture should not overlook in the long-

term, the socio-political demands and should see that worldwide important resources such as water and soil must not be excessively aggravated. The whole concept may however be accepted and applied, when 1) its practical usefulness is verified, 2) the frame conditions are guaranteed and 3) it leads to an increase of the farmers income or at least it minimizes the risk of reduced income.

## LITERATURVERZEICHNIS

- Abuelgasim, A.A., Gopal, S., Irons, J.R. & A.H. Strahler, 1996.  
Classification of ASAS multiangle and multispectral measurements using artificial neural networks. *Remote Sensing of Environment*, 57, 79-87.
- Al-Abbas, A.H., Swain, P.H. & M.F. Baumgardner, 1972.  
Relating organic matter and clay content to the multispectral radiance of soils. *Soil Science*, 114, 477-485.
- Albertz, J., 1991.  
Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern - Eine Einführung in die Fernerkundung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, ISBN: 3-534-07838-1.
- Allen, W.A., Gausman, H.W., Richardson, A.J. & J.R. Thomas, 1969.  
Interaction of isotropic light with a compact plant leaf. *Journal of Optical Society of America*, 59(10), 1376-1379.
- Allen, W.A., Gausman, H.W. & A.J. Richardson, 1970.  
Mean effective optical constants of cotton leaves. *Journal of Optical Society of America*, 60(4), 542-547.
- Ammer, U., Berhe, D., Koch, B., Schneider, T. & H. Wittmeier, 1991.  
Feldspektromettermessungen über Laboroberflächentypen der Hildesheimer Börde - Ergebnisse aus den Feldmesskampagnen HIBE'88 und HIBE'89. *Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover*, B2, 185-201.
- Asrar, G., Myneni, R.B., Li, Y. & E.T. Kanemasu, 1989.  
Measuring and modelling spectral characteristics of a tallgrass prairie. *Remote Sensing of Environment*, 27, 143-155.
- Astaras, T., 1995.  
*Remote Sensing in Geosciences (Notes) / Φωτοερμηνεία (Τηλεπισκόπηση) στις γεωεπιστήμες (σημειώσεις)*. Aristotle University of Thessaloniki, Publications Department, Thessaloniki. (auf griechisch).
- Auernhammer, H., Demmel, M., Maidl, F.-X., Schmidhalter, U., Schneider, T. & P. Wagner, 1999.  
An On-Farm Communication System for Precision Farming with Nitrogen Real-Time Application. ASEA, St. Joseph, MI, USA, Paper No. 99 11 50.
- Augsburger, C., 2002.  
Konzeption und Implementierung eines Leistungs- Kostenrechnungsmodells zur Auswertung kleinräumiger Daten. Dissertation, Agrarwirtschaft-Sonderheft (im Druck).
- Bacour, C., Jacquemoud, S., Vogt, P., Hosgood, B., Andreoli, G. & J.P. Frangi, 2001a.  
Optimal sampling configurations for the estimation of canopy properties from BRDF data acquired with the EGO/JRC. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing*, Aussois, France, CNES, 481-486.
- Bacour, C. & S. Jacquemoud, 2001b.  
Coupling spectral and bidirectional information to estimate canopy biophysical

- parameters by model inversion. Proceedings of the International Workshop on Spectroscopy Application in Precision Farming (IWSAPF), Weihestein, Freising, 74-77.
- Bacour, C., 2002.  
Schriftliche Mitteilung. Doktor, Laboratoire Environnement et Developpement, Universite Paris.
- Bacour, C., Jacquemoud, S., Tourbier, Y., Dechambre, M. & J.-P. Frangi, 2002a.  
Design and analysis of numerical experiments to compare four canopy reflectance models. *Remote Sensing of Environment*, 79, 72-83.
- Bacour, C., Jacquemoud, S., Leroy, M., Hautecoeur, O., Weiss, M., Prevot, L., Bruguier, N. & H. Chauki, 2002b.  
Investigation of the estimation reliability of vegetation characteristics by inversion of three canopy reflectance models on airborne POLDER data. Submitted to *Agronomie: Agriculture and Environment*.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. & A.R. Huete, 1995.  
A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, Harwood Academic Publishers, 13, 95-120.
- Baret, F., Champion, I., Guyot, G. & A. Podaire, 1987.  
Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer. *Remote Sensing of Environment*, 22, 367-378.
- Baret, F., 1995.  
Use of spectral reflectance variation to retrieve canopy biophysical characteristics. *Advances in Environmental Remote Sensing* (ed. Danson F.M. & S.E. Plummer), John Wiley & Sons Ltd., 33-51.
- Baret, F. & T. Fourty, 1995.  
Study on plant canopy biochemistry for a high spectral resolution land surface processes mission. Final Report, ESA contract 3-7919/93/NL/SF.
- Baret, F., Weiss, M., Leroy, M., Hautecoeur, O., Santer R. & A. Begue, 1997.  
Impact of surface anisotropies on the observation of optical imaging sensors. Final Report, ESA Contract, 11341/95/NL/CN.
- Barnsley, M.J., 1994.  
Environmental monitoring using multiple-view-angle (MVA) remotely-sensed data. *Environmental Remote Sensing from Regional to Global Scale* (ed. Foody, G.M. & P.J. Curran), Wiley, Chichester, UK, 181-201.
- Bayerisches Geologisches Landesamt, 1996.  
Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern. Bayerisches Geologisches Landesamt, München.
- Beisl, U., 2001.  
Correction of Bidirectional Effects in Imaging Spectrometer Data. PhD Thesis, *Remote Sensing Series*, 37, RSL, University of Zurich.
- Bicheron, P., Leroy, M., Hautecoeur, O. & F.M. Breon, 1997.  
Enhanced discrimination of boreal forest covers with directional reflectances from the airborne polarization and directionality of Earth reflectances (POLDER) instrument.

- Journal of Geophysical Research, 102(D24), 29517-29528.
- Bicheron, P. & M. Leroy, 1999.  
A method of biophysical parameter retrieval at global scale by inversion of a vegetation reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 67, 251-266.
- Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, 1997.  
Entwicklungsstadien von Pflanzen BBCH Monograph, Blackwell Wissenschaftsverlag.
- Boochs, F., Godding, R., v. Rüsten, Ch., Ruwwe, T. & U. Tempelmann, 1989.  
Informationsgehalt von Fernerkundungsdaten im Bereich landwirtschaftlicher Anwendungen. *BuL*, 57, Heft 3, 112-125.
- Borel, C.C., Gerstl, S.A.W. & B.J. Powers, 1991.  
The radiosity method in optical remote sensing of structured 3-D surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 36, 13-44.
- Boucher, Y., Cosnefroy, H., Petit, D., Serrot, G. & X. Briottet, 1999.  
Comparison of measured and modelled BRDF of natural targets. 3<sup>rd</sup> Annual International Symposium Aerosense SPIE.
- Bowers, S.A & R.J. Hanks, 1965.  
Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science*, 100, 130-138.
- Büker, C., & Kühbauch, W., 1991.  
Ein Parameter zur Bestimmung der Vitalität von Winterweizen – die Verschiebung des Rot-Infrarot – Anstieges im Reflexionsspektrum. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.*, 4, 319-322.
- Cabot, F. & G. Dedieu, 1997.  
Surface albedo from space: coupling bidirectional models and remotely sensed measurements. *Journal of Geophysical Research*, 102, 19645-19663.
- Capderou, M., 1998.  
Determination of the shortwave anisotropic function for clear sky desert scenes from ScaRab data comparison with models issued from other satellite data. *Journal of Appl. Meteorology*, 37, 1398-1911.
- Castelli, F., Contillo, R. & F. Miceli, 1996.  
Non-destructive determination of leaf chlorophyll content in four crop species. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 177, 275-283.
- Chandrasekhar, S., 1944.  
On the radiative equilibrium of a stellar atmosphere {II}. *Astrophysical Journal*, 100, 76-86.
- Chandrasekhar, S., 1960.  
Radiative Transfer. Dover Publications, New York.
- Chapron, M., Boissard, P. & L. Assemat, 1999.  
A method for 3D reconstruction of vegetation by stereovision. *Precision Agriculture '99* (ed. Stafford, J.V.), 2<sup>nd</sup> European Conference on Precision Agriculture, Odense (DNK), Sheffield Academic Press, 1, 249-256.
- Chopping, M.J., 2000.  
Testing a LiSK BRDF model with in situ bidirectional reflectance factor measurements over semiarid grasslands. *Remote Sensing of Environment*, 74, 287-312.

- Choudhury, B.J., Ahmed, N.U., Idso, S.B., Reginato, R.J. & C.S.T. Daughtry, 1994.  
Relations between evaporation coefficients and vegetations indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, 50, 1-17.
- Cierniewski, J., 1999.  
Geometrical modelling of soil bidirectional reflectance in the optical domain. Bogucki Scientific Publishers, Poznan, ISBN: 83-86001-87-9.
- Curran, P.J., 2001.  
Imaging spectrometry for the study of vegetation canopies. Proceedings of the International Workshop on Spectroscopy Application in Precision Farming (IWSAPF), Freising, Weihenstephan, 7-8.
- Dave, J.V., 1980.  
Effect of atmospheric conditions on remote sensing of a surface nonhomogeneity. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46, 1173-1180.
- Deering, D.W. & P. Leonoe, 1986.  
A sphere-scanning radiometer for rapid directional measurements of sky and ground radiance. *Remote Sensing of Environment*, 19, 1-24.
- Deering, D.W., 1989.  
Field measurements of bidirectional reflectance. *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* (ed. G. Asrar), John Wiley, New York, 14-65.
- Dendron Resource Surveys, Fogal, W., Hutchinson T., Thriscutt, A., 1997.  
Bioindicators of forest health and sustainability - Review report and project implementation strategies. Forest research information paper No. 138, Ministry of Natural Resources, Canada.
- Dwyer, L.M., Tollenaar, M. & L. Houwig, 1991.  
A non-destructive method to monitor leaf greenness in corn. *Canadian Journal of Plant Science*, 71, 505-509.
- Ehlert, D., 1996.  
Großflächige Anwendung von Satellitenortung in der Landwirtschaft; Teilflächenspezifischer Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln. Forschungs-Report Nr 96-1.
- Engelsen, O., Pinty, B., Verstraete, M.M. & J.V. Martonchik, 1996.  
Parametric bidirectional reflectance factor models: Evaluation, improvements and applications. Technical Report, EC Joint Research Centre, EUR 16426 EN.
- Epiphanio, J.C.N. & A.R. Huete, 1995.  
Dependence of NDVI and SAVI on sun sensor geometry and effect on FAPAR relationships in alfalfa. *Remote Sensing of Environment*, 51, 351-360.
- ESA, 1998.  
The retrieval of geo- and bio-physical information from remote sensing data (Specification and work statement). Appendix 1 to AO/1-3381/98/NL/GD.
- FAO, 2002a.  
Water: source of Food Security. Statement by the Director-General, World Food Day Ceremony, Rome, <http://www.fao.org/english/dg/2002/wfd1610.htm>, am 10.12.2002.

- FAO, 2002b.  
Agriculture needs to produce more food with less water. World Water Day 2002, Press Release 02/33.
- FAO, 2002c.  
FAO calls attention to the vital role of water in agriculture. Water Food Day 2002, Press Release 02/100.
- Gerbermann, A.H. & D.D. Weher, 1979.  
Reflectance of varying mixtures of clay soil and sand. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 45, 1145-1151.
- Gerstl, S.A.W., Simmer, C. & B.J. Powers, 1986.  
The canopy hot spot as crop identifier. *Symposium on Remote Sensing of Resources Development and Environment Management*, Enschede, F.R.G., August, 261-263.
- Gerstl, S.A.W. & C.C. Borel, 1992.  
Principles of radiosity method versus radiative transfer for canopy reflectance modeling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 271-275.
- Girolamo, L., Varnai, T. & R. Davies, 1998.  
Apparent breakdown of reciprocity in reflected solar radiances. *Journal of Geophysical Research*, 103(D8), 8795-8803.
- Gobron, N., Pinty, B., Verstraete, M.M. & Y. Govaerts, 1997.  
A semidiscrete model for the scattering of light by vegetation. *Journal of Geophysical Research - Atmosphere*, 102(D8), 9431-9446.
- Goel, N.S. & Rozehnal, 1991a.  
Some non-biological applications of {L}-systems. *International Journal of General Systems*, 18, 321-405.
- Goel, N.S., Rozehnal, I. & R.L. Thompson, 1991b.  
A computer graphics based model for scattering from objects of arbitrary shapes in the optical region. *Remote Sensing of Environment*, 36, 73-104.
- Goel, N.S. & W. Qin, 1994.  
Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation indices and {LAI} and {FPAR}: A computer simulation. *Remote Sensing Reviews*, 10, 309-347.
- Goffe, W.L., 1996.  
SIMANN: a global optimization algorithm using simulated annealing. *Studies in Nonlinear Dynamics and Econometrics*, 1(3), 169-176.
- Govaerts, Y. & M.M. Verstraete, 1994.  
Applications of the {L}-systems to canopy reflectance modelling in a Monte Carlo ray tracing technique. *Fractals in Geosciences and Remote Sensing*, Proceedings of a Joint JRC/EARSel Expert Meeting, Ispra, Italy, European Commission, 211-236.
- Govaerts, Y. & M.M. Verstraete, 1995.  
Evaluation of the capability of {BRDF} models to retrieve structural information on the observed target as described by a three-dimensional ray tracing code. *The European Symposium on Satellite Remote Sensing*, EUROPTO-SPIE Conference, Rome, SPIE, 2314, 9-20.

- Govaerts, Y. & M.M. Verstraete, 1996.  
Modelling the scattering of light in arbitrarily complex media: motivation for a ray tracing approach. Final Report of the Ray Tracing Exploratory Research, Institute of Remote Sensing Applications, Joint Research Centre, European Commission, Ispra, Italy.
- Grenzdörffer, G., 1999.  
Dokumentation und Analyse kleinräumiger Heterogenität mit Fernerkundung und GIS. Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, 93-105.
- Guyot, G., Baret, F. & D.J. Mayor, 1988.  
High spectral resolution: Determination of spectral shifts between the red and the near infrared. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 11, 750-760.
- Heege, H.J., 2001.  
Optical control for site-specific application of farm chemicals. Proceedings of the International Workshop on Spectroscopy Application in Precision Farming (IWSAPF), Weihenstephan, Freising, 99-102.
- von Helmholtz, H.L.F., 1883.  
Physikalische Optik. Mathematisch physikalische Exkurse, II., 136.
- Hermann, K., 1989.  
Signaturanalysen und Klassifizierungsergebnisse an Kiefer unterschiedlicher Vitalität unter Verwendung multispektraler Flugzeug-Scannerdaten. Dissertation, Lehrstuhl für Landschaftstechnik der Universität LMU München, DFVLR Publikation, ISSN: 0171-1342.
- Horler, D.N.H., Dockray, M., Barber, J. & A.R. Barringer, 1983.  
Red edge measurements for remotely sensing plant chlorophyll content. *Advances in Space Research*, 3(2), 273-277.
- Hu, B., Lucht, W., Li, X. & A.H. Strahler, 1997.  
Validation of kernel-driven semiempirical models for the surface bidirectional reflectance distribution function of land surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 62, 201-214.
- Hyman, A.H. & M.J. Barnsley, 1997.  
On the potential for land cover mapping from multiple-view-angle (MVA) remotely-sensed images. *International Journal of Remote Sensing*, 18(11), 2471-2475.
- Iaquinta, J. & B. Pinty, 1994.  
Adaptation of a bidirectional reflectance model including the hot spot to an optically thin canopy. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Val d'Isere, France, Editions du CNES, 683-690.
- Irons, J.R. & J.A. Smith, 1990.  
Soil surface roughness characterization from light scattering observations. 10<sup>th</sup> Annual International Geosciences and Remote Sensing Symposium, II, 1007-1010.
- IWSAPF, 2001.  
Concluding remarks. International Workshop on Spectroscopy Application in Precision Farming (16<sup>th</sup> – 18<sup>th</sup> January 2001), Weihenstephan, Freising, Germany.

- Jacquemoud, S. and F. Baret, 1990.  
 PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34, 75-91.
- Jacquemoud, S., Bacour, C., Poilve, H. & J.-P. Frangi, 2000.  
 Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: Direct and Inverse Mode. *Remote Sensing of Environment*, 74, 471-481.
- Jakubauskas, M., 1996.  
 Thematic mapper characterization of Lodgepole Pine seral stages in Yellowstone National Park, USA. *Remote Sensing of Environment*, 56, 118-132.
- Jürgens, C., 2000.  
 Fernerkundungsanwendungen im Precision Farming. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 144, 60-69.
- Kennedy, R.E., Cohen, W.B. & G. Takao, 1997.  
 Empirical methods to compensate for a view-angle-dependent brightness gradient in AVIRIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 62, 277-291.
- Kimes, D.S., 1983.  
 Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. *Applied Optics*, 22(9), 1364-1372.
- Kimes, D.S. & P. Sellers, 1985a.  
 Inferring hemispherical reflectance of the Earth's surface for global energy budgets from remotely sensed nadir or directional radiance values, *Remote Sensing of Environment*, 18, 205-223.
- Kimes, D.S., Newcomb, W.W., Tucker, C.J., Zonneveld, I.S., Van Wijngaarden, W., De Leeuw, J. & G.F. Epema, 1985b.  
 Directional reflectance factor distributions for cover types of northern Africa. *Remote Sensing of Environment*, 18, 1-19.
- Kimes, D.S., Newcomb, W.W., Nelson, R.S. & J.B. Schutt, 1986.  
 Directional reflectance distributions of a hardwood and pine forest canopy; *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 24(2), 281-293.
- Kimes, D.S., Smith, J.A. Harrison, P.A. & P.R. Harrison, 1994.  
 Application of techniques to infer vegetation characteristics from directional reflectance(s). *Proceedings of the 6th ISPRS International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Val d'Isere, France, 17-21 January 1994, CNES, 581-592.
- Kimes, D., Nelson, F., Manry, M. & A. Fung, 1998.  
 Attributes of neural networks for extracting continuous vegetation variables from optical and radar measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 19(14), 2639-2663.
- Kirkpatrick, S., 1983.  
 Optimization by simulated annealing. *Science*, 200, 671-680.
- Knyazikhin, Y.V. & A.L. Marshak, 1991.  
 Fundamental equations of radiative transfer in leaf canopies, and iterative methods for their solution. *Photon-Vegetation Interactions* (ed. Myneni, R. & J. Ross), Springer-Verlag, 9-43.

Knyazikhin, Y., Martonchik, J.V., Diner, D.J., Myneni, R.B., Verstraete, M.M., Pinty, B. & N. Gobron, 1998.

Estimation of vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from atmosphere corrected MISR data. *Journal of Geophysical Research*, 103(D24), 32239-32256.

Koehler, C., Hosgood, B., Andreoli, G., Schmuck, G., Verdebout, J., Pegoraro, A., Hill, J., Mehl, W., Roberts, D. & M. Smith, 1994.

The European Optical Goniometric Facility: Technical Descriptions and First Experiments on Spectral Unmixing. *Proceedings of IGARSS'94, Pasadena*.

Koch B., Schneider T. & U. Ammer, 1993.

Expected Radiometric and Spectral Significance of MOMS-02 Data for Vegetation Mapping: Calculations Based on System Parameters applied on Spectral Field Measurements. *Remote Sensing of Environment*, 46, 73-88.

KOMPASS, 2000.

Buchplan München. Auflage 30-00, KOMPASS – Karten GmbH, Österreich.

Kraus, K. & W. Schneider, 1988.

Fernerkundung, physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken. Ferd. Dümmler Verlag Bonn, Band 1, Nr. 7866.

Kriebel, K.T., 1976.

On the variability of reflected radiation field due to differing distributions of irradiation. *Remote Sensing of Environment*, 4, 257-264.

Kriebel, K.T., 1977.

Reflection properties of vegetated surfaces: Tables of measured spectral biconical reflectance factors. *Wissenschaftliche Mitteilungen des Meteorologischen Instituts der Universität München*, 29.

Kriebel, K.T., 1996a.

On the limited validity of reciprocity in measured BRDFs. *Remote Sensing of Environment*, 58, 52-62.

Kriebel, K.T., 1996b.

Mündliche Mitteilung. Spezialist am Institut für Physik der Atmosphäre, DLR.

Kuusk, A., 1985.

The hot spot effect of a uniform vegetative cover. *Sov. Journal of Remote Sensing*, 3, 645-658.

Kuusk, A., 1991.

The hot spot effect in plant canopy reflectance. *Photon-Vegetation Interactions* (ed. Myneni, R. B. and J. Ross), Applications in optical remote sensing and plant ecology, Springer-Verlag, Berlin, 139-159.

Kuusk, A., 1995.

A Markov-chain model of canopy reflectance. *Agric. For. Meteorol.*, 76, 221-236.

Kuusk, A., 1996.

A computer-efficient plant canopy reflectance model. *Computers & Geosciences*, 22(2), 149-163.

- Kuusk, A., 1999.  
Mündliche Mitteilung beim 2nd International Workshop on Multiangular Measurements and Models in Ispra, Italien.
- Kuusk, A. & T. Nilson, 2001.  
Testing directional properties of a forest reflectance model. *Journal of Geophysical Research*, 106(D11), 12011-12021.
- Langholz, H., 2002.  
Mündliche Mitteilung. Deutscher Wetterdienst in Weihenstephan.
- Leroy, M. & J.L. Roujean, 1994.  
Sun and View Angle Corrections on Reflectances Derived from NOAA/AVHRR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(3), 684-697.
- Lewis, P.E. & P. Boissard, 1997.  
The use of 3D plant modelling and measurement in remote sensing. *Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing* (ed. Guyot & Phulpin), Balkema, Rotterdam, 319-326.
- Li, X. & A.H. Strahler, 1985.  
Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 23, 705-721.
- Li, X. & A.H. Strahler, 1986.  
Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 24(6), 906-919.
- Li, X. & A.H. Strahler, 1992.  
Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: Effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 276-292.
- Li, X., Strahler, A.H. & C.E. Woodcock, 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.
- Li, Z., Cihlar, J., Zheng, X., Moreau, L. & H. Ly, 1996.  
The bidirectional effects of AVHRR measurements over boreal regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(6), 1308-1322.
- Liebler, J., Sticksel, E. & F.-X. Maidl, 2001.  
Detection of dry matter and nitrogen status of crops by field spectroscopy. *Proceedings of the International Workshop on Spectroscopy Application in Precision Farming (IWSAPF)*, Weihenstephan, Freising, 20-24.
- Liebler, J., 2001.  
Mündliche Mitteilung. Doktorand am Lehrstuhl für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Technischen Universität München, Mitarbeiter des IKB-Dürnast-Projektes (<http://ikb.weihenstephan.de>).
- Lucht, W., 1998.  
Expected retrieval accuracies of bidirectional reflectance and albedo from EOS-MODIS and MISR angular sampling. *Journal of Geophysical Research*, 103(D8), 8673-8778.

- Lucht, W., Schaaf, C.B. & A. H. Strahler, 2000.  
An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2), 977-998.
- Manakos I., Schneider T. und U. Ammer, 2000.  
A comparison between the ISODATA and the eCognition classification methods on basis of field data. *IAPRS, Vol. XXXIII, Supplement B7, Amsterdam, Netherlands.*
- Manalo-Smith, N., Smith, G.L., Tiwari, S.N. & W.F. Staylor, 1998.  
Analytic forms of bidirectional reflectance functions for application to Earth radiation budget studies. *Journal of Geophysical Research*, 103(D16), 19733-19752.
- Martonchik, J.V., 1994.  
Retrieval of surface directional reflectance properties using ground level multiangle measurements. *Remote Sensing of Environment*, 50, 303-316.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H. & E. Teller, 1953.  
Equations of state calculations by fast computing machines. *J. Chem. Phys.*, 21, 1087-1092.
- Milton, E.J., 1989.  
Principles of field spectroscopy. *Remote Sensing Yearbook, 1988-1989*, 79-99.
- Minnaert, M., 1941.  
The reciprocity principle in lunar photometry. *Astrophysical Journal*, 93, 403-410.
- Minolta Camera Co, 1989.  
Manual for chlorophyll meter SPAD-502. Minolta Camera Co., Osaka, Japan.
- Myneni, R.B. & E.T. Kanemasu, 1988.  
The hot spot of vegetation canopies. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 40, 165-168.
- Nicodemus, F.E., Richmond, J.C., Hsia, J.J., Ginsberg, J.W. & T. Limperis, 1977.  
Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. Monograph 160, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce.
- Nilson, T. & A. Kuusk, 1989.  
A reflectance model for the homogeneous plant canopy and its inversion. *Remote Sensing of Environment*, 27, 157-167.
- 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.
- PARABOLA Home Page, 1999.  
PARABOLA Data Acquisition Summary.  
<http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/PARABOLA/source/table1.html>, am 06.09.1999.
- Pearce, W.A., 1977.  
A study of the effects of the atmosphere on Thematic Mapper observations. NASA Contract, NAS5-23639.
- Penuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R. & I. Filella, 1997.  
Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 18(13), 2869-2875.

- Pinty, B., Verstraete, M.M. & R.E. Dickinson, 1990.  
A physical model of the bidirectional reflectance of vegetation canopies, 2. Inversion and validation. *Journal of Geophysical Research*, 95(D8), 11767-11775.
- Pinty, B., Gobron, N., Widlowski J.L., Gerstl, S.A.W., Verstraete, M.M., Antunes, M., Bacour, C., Gascon, F., Gastellu, J.P., Goel, N., Jacquemoud, S., North, P., Qin, W. & R. Thompson, 2001.  
Radiation transfer model intercomparison (RAMI) exercise. *Journal of Geophysical Research*, 106(D11), 11937-11956.
- Price, J.C., 1990.  
On the information content of soil reflectance spectra. *Remote Sensing of Environment*, 33, 113-121.
- Price, J.C., 1992.  
Variability of high spectral resolution crop reflectance spectra. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 2593-2610.
- Privette, J.L., Myneni, R.B., Tucker, C.J. & W.J. Emery, 1994.  
Invertibility of an 1-D discrete ordinates canopy reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 48, 89-105.
- Privette, J.L., Myneni, R.B., Emery, W.J. & B. Pinty, 1995.  
Inversion of a soil bidirectional reflectance model for use with vegetation reflectance models. *Journal of Geophysical Research*, 100, 25497-25508.
- Privette, J.L., Deering, D.W. & D.E. Wickland, 1997.  
Report on the Workshop on Multiangular Remote Sensing for Environmental Applications. NASA Technical Memorandum 113202, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD.
- Qi, J., Moran, M.S., Cabot, F. & G. Dedieu, 1995.  
Normalization of sun/view angle effects using spectral albedo-based vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 52, 207-217.
- Qin, W. & Y. Xiang, 1994.  
On the hotspot effect of leaf canopies: Modelling study and influence of leaf shape. *Remote Sensing of Environment*, 50, 95-106.
- Qin, W. & N.S. Goel, 1995.  
An evaluation of hotspot models for vegetation canopies. *Remote Sensing of Reviews*, 13, 121-159.
- Radke M., 2000.  
Ein neues Verfahren zur Messung der bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion unter Verwendung einer CCD-Zeilen-Kamera. Dissertation, TU Berlin, D83, Shaker Verlag, Aachen.
- Rahman, H., Verstraete, M.M. & B. Pinty, 1993a.  
Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model 1. Model description and inversion on synthetic data. *Journal of Geophysical Research*, 98(D11), 20779-20789.

- Rahman, H., Pinty, B. & M.M. Verstraete, 1993b.  
Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model 2. Semiempirical surface model usable with NOAA advanced very high resolution radiometer data. *Journal of Geophysical Research*, 98(D11), 20791-20801.
- Ranson, K.J., Biehl, L.L. & C.S.T. Daughtry, 1984.  
Soybean canopy reflectance modeling data sets. LARS Technical Report 071584.
- Ranson, K.J., Irons, J.R. & C.S.T. Daughtry, 1991.  
Surface Albedo from Bidirectional Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 35, 201-211.
- Reusch, S., 1997.  
Entwicklung eines reflexionsoptischen Sensors zur Erfassung der Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität, VDI-MEG 303, Kiel.
- Reusch, S., 1999.  
Online Erfassung der Stickstoffversorgung von Pflanzen. Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTLB), Darmstadt, Arbeitspapier 264, 110-117.
- Reusch, S. 2001.  
Effect of viewing geometry on canopy reflectance - Practical problems and their solution. *Proceedings of the International Workshop on Spectroscopy Application in Precision Farming (IWSAPF)*, Weihenstephan, Freising, 64-67.
- Richards, J.A. & X. Jia, 1999.  
*Remote Sensing Digital Image Analysis (An Introduction)*. 3<sup>rd</sup> edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York..
- Robinson, B.R. & L.L. Biehl, 1979.  
Calibration procedures for measurement of reflectance factor in remote sensing field research. *Proc. Soc. Phot.-Opt. Instr. Eng.*, 196, 16-20.
- Rollin, E.M., Milton, E.J. & D.R. Emery, 2000.  
Reference panel anisotropy and diffuse radiation - some implications for field spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing*, 21(15), 2799-2810.
- Röser, H., Schönermark, M. & M. Radke, 1998.  
Vorrichtung und Verfahren zur Bestimmung der bidirektionalen Reflektanzverteilung. *Offenlegungsschrift Deutsches Patentamt*, DE 197 11 127 A 1.
- Ross, J.K., 1981.  
*The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Dr. W. Junk Publishers, The Hague, Netherlands.
- Ross, J. & A.L. Marshak, 1988.  
Calculation of the canopy bidirectional reflectance using the Monte-Carlo method. *Remote Sensing of Environment*, 24, 213-225.
- Ross, J. & A.L. Marshak, 1989.  
The influence of leaf orientation and the specular component of leaf reflectance on the canopy bidirectional reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 27, 251-260.

- Rötzer, T., Häckel, H. & R. Würländer, 1997.  
Agrar- und Umweltklimatologischer Atlas von Bayern. Selbstverlag Deutscher Wetterdienst, Weihenstephan, Zolling.
- Roujean, J.-L., Leroy, M. & P.-Y. Deschamps, 1992.  
A bidirectional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 97(18), 20455-20468.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. & J.C. Harlan, 1974.  
Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Final Report Type III, Greenbelt, NASA-GSFC.
- Royer, A., Vincent, P. & F. Bonn, 1985.  
Evaluation and correction of viewing angle effects on satellite measurements of bidirectional reflectance. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(12), 1899-1914.
- Sandmeier, S., Müller, C., Hosgood, B. & G. Andreoli, 1998a.  
Physical mechanisms in hyperspectral BRDF data of grass and watercress. *Remote Sensing of Environment*, 66(2), 222-233.
- Sandmeier, S., Müller, C., Hosgood, B. & G. Andreoli, 1998b.  
Sensitivity analysis and quality assessment of laboratory BRDF data. *Remote Sensing of Environment*, 64, 176-191.
- Sandmeier, S.R. & A.H. Strahler, 1998c.  
BRDF laboratory measurements. *Remote Sensing Reviews, Special Issue on BRDF*, 9, 1-34.
- Sandmeier, S.R. & K.I. Itten, 1999a.  
A field goniometer system (FIGOS) for acquisition of hyperspectral BRDF data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(2), 978-986.
- Sandmeier, S.R., Middleton, E.M., Deering, D.D. & W. Qin, 1999b.  
The potential of hyperspectral bidirectional reflectance distribution function data for grass canopy characterization. *Journal of Geophysical Research*, 104(D8), 9547-9560.
- Sandmeier, S., 2000.  
Acquisition of bidirectional reflectance factor data with field goniometers. *Remote Sensing of Environment*, 73, 257-269.
- Schneider, T., Ammer, U., Koch, B. & A. Scherrer, 1992.  
Simulation of MOMS-02 Stereo Band Radiometric Capability Using Field Spectroscopy Data. *Proceedings of ISY Kongress, München*.
- Schneider, T., 1994.  
Möglichkeiten und Grenzen der spektralen Trennbarkeit ackerbaulicher Oberflächentypen - eine Abschätzung anhand spektroskopischer Untersuchungen über die Vegetationsperiode. *Dissertation, Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz der LMU München, Schriftenreihe der ZADI, Band 4, ISSN 0947-661X*.
- Schneider, T., Buhk, R. & U. Ammer, 1999a.  
Investigations on synergy and complementarity of multispectral and anisotropy information from MOMS-02/D2-Mode 3-data for land use classification in the Sinaloa district of Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 20(8), 1499-1526.

- Schneider, T., Manakos, I., Reinartz, P. & R. Müller, 1999b.  
Anisotropy information from moms-02/priroda stereo data sets - an additional physical parameter for land surface characterisation. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 97-105.
- Schneider, T., Manakos, I., Reinartz, P. & R. Müller, 1999c.  
The evaluation of spectral and angular signatures from MOMS-2/P mode D data sets – an application case study for land use purposes. *Proceedings of the Joint Workshop von ISPRS Working Groups I/1, I/3 and I V/4: "Sensors and Mapping from Space 1999"*, Hannover, Deutschland.
- Schneider T., de Kok R., Buck A. and I. Manakos, 2000.  
Objektorientierte Bildanalyse -Paradigmenwechsel in der thematischen Auswertung von Erdbeobachtungsdaten? *Aktuelle Forschungsberichte, Festschrift zur Emeritierung von Prof.Dr. U. Ammer, Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz (Hrsg), TUM, Freising, Germany*, 234 - 258.
- Serrano, L., Filella, I. & J. Penuelas, 2000.  
Remote Sensing of Biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science*, 40, 723-731.
- Shibayama, M. & C.L. Wiegand, 1985.  
View azimuth and zenith, and solar angle effects on wheat canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 18, 91-103.
- Solheim, I., 1998.  
Bidirectional and spectral reflectance properties of the *Cladonia stellaris* and *Flavocetraria nivalis* lichens and the *Racomitrium lanuginosum* moss. PhD Thesis, University of Tromsø, Department of Physics, Tromsø, Norway.
- Stark, R. & A.A. Gitelson, 2000.  
Radiation regime in irrigated wheat. *Proc. of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Lake Buena Vista, Florida, USA*, 2, 89-96.
- Steingießer, R., Davidson, M. & W. Kühbauch, 1999.  
Lesbarkeit von Radarsignaturen in der landwirtschaftlichen Fernerkundung. *Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt*, 118-122.
- Stickel, E., Maidl, F.-X., Schaechtl, J., Huber, G. & J. Schulz, 2001.  
Laser-induced chlorophyll fluorescence – A tool for online detecting nitrogen status in crop stands. *Proceeding of the 3<sup>rd</sup> European Conference on Precision Agriculture* (ed. Grenier, G. & S. Blackmore), 959-964.
- Stokes, G.G., 1862.  
On double Refraction. *British Association Reports*, 253.
- Strahler, A.H., Wanner, W., Zhu, Q. & X. Jin, 1995.  
Bidirectional reflectance modeling of data from vegetation obtained in the Changchun solar simulation laboratory. *Proceedings of IGARSS'95, Florence, Italy, 1965-1977*.

- Suits, G.H., 1972.  
The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *Remote Sensing of Environment*, 2, 117-125.
- Tucker, C.J. & M.W. Garratt, 1977.  
Leaf optical properties as a stochastic process. *Applied Optics*, 16, 635-642.
- Ustin, S.L., Smith, M. O., Jacquemoud, S., Verstraete, M. M. & Y. Govaerts, 1998.  
Geobotany: Vegetation Mapping for Earth Sciences. *Manual of Remote Sensing* (ed. R. Andrew), Earth Sciences Volume.
- Verhoef, W., 1984.  
Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling: the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16, 125-141.
- Verstraete, M.M., 1987.  
Radiation Transfer in Plant Canopies: Transmission of Direct Solar Radiation and the Role of Leaf Orientation. *Journal of Geophysical Research*, 92(D9), 10985-10995.
- Verstraete, M.M., Pinty, B. & R.E. Dickinson, 1990.  
A physical model of the bidirectional reflectance of vegetation canopies - 1. Theory. *Journal of Geophysical Research*, 95, 11755-11765.
- Verstraete, M.M., Vogt, P. & B. Pinty, 1999.  
Sensitivity of albedo retrieval and BRDF reconstruction to directional sampling: A simulation study. LSPIM study meeting, Munich.
- Verstraete, M.M. & B. Pinty, 2000.  
The 2nd International Workshop on Multiangular Measurements and Models (IWMMM-2). *The Earth Observer*, 12(2), 21-24.
- Vogt, P., Verstraete, M.M., Pinty, B., Menenti, M., Caramango, A., Rast, M. & D. Lajas, 2000.  
The impact of multiangular measurements on the accuracy of land-surface albedo retrieval: Preliminary results for the proposed ESA LSPIM mission. *Remote Sensing Reviews*, 19, 191-204.
- Völlger, C., 1993.  
Die Bestimmung der spektralen Reflexionsfunktion natürlicher Oberflächen bei Verwendung der Reziprozität. Dissertation, DLR Institut für Physik der Atmosphäre, DLR-FB 93-30.
- Walthall, C.L., Norman, J.M., Welles, J.M., Campbell, G. & B.L. Blad, 1985.  
Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces. *Applied Optics*, 24(3), 383-387.
- Walthall, C.L., Kim, M.S., Williams, D.L., Meeson, B.W., Agbu, P.A., Newcomer, J.A. & E.R. Levine, 1993.  
Data sets for modelling: A retrospective collection of bidirectional reflectance and forest ecosystems dynamics multisensor aircraft campaign data sets. *Remote Sensing of Environment*, 46, 340-346.
- Wanner, W., Li, X. & A.H. Strahler, 1995.  
On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *Journal of Geophysical Research*, 100(D10), 21077-21089.

- Wanner, W., Strahler, A.H., Hu, B., Lewis, P., Muller, J.-P., Li, X., Schaaf, C.L.B. & M. J. Barnsley, 1997.  
Global retrieval of bidirectional reflectance and albedo over land from EOS/MODIS and MISR data: Theory and algorithm. *Journal of Geophysical Research.*, 102(D14), 17143-17161.
- Wardley, N., 1984.  
Vegetation index variability as a function of viewing angle geometry. *International Journal of Remote Sensing*, 5(5), 861-870.
- Westman, W.E. & C.V. Price, 1987.  
Remote detection of air pollution stress to vegetation: Laboratory level studies. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, University of Michigan*, 451-456.
- Wood, G.A., Thomas, G. & J.C. Taylor, 1999.  
Developing calibration techniques to map crop variation and yield potential using remote sensing. *Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Agriculture, USA*, 1457-1464.
- Wu, A., Li, Z. & J. Cihlar, 1995.  
Effects of land cover type and greenness on advanced very high resolution radiometer bidirectional reflectances: Analysis and removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 100(D5), 9179-9192.
- Yost, E.F. & S. Wenderoth, 1969.  
*Remote Sensing in Ecology*. The University of Georgia Press (ed. P.L. Johnson).

## ANHANG

Im Anhang A werden ausgewählte Reflexionsverteilungen der untersuchten Standorte in den Wellenlängen  $0.55\mu\text{m}$ ,  $0.67\mu\text{m}$ ,  $0.97\mu\text{m}$  und  $1.65\mu\text{m}$  dargestellt. In jeder Abbildung bzw. auf jeder Seite wird die Reflexionsverteilung eines Entwicklungsstadiums und einer Beobachtungszimutebene im Tagesverlauf bzw. in mehreren Sonnenzenitwinkeln präsentiert:

Eine Abbildung wird in drei Spalten und vier Reihen aufgeteilt.

- Die erste Spalte bezieht sich auf den Standort hohen Ertrags (HE), die zweite Spalte auf den Standort niedrigen Ertrags (NE) und die dritte Spalte auf die Reflexionsunterschiede zwischen den zwei Standorten. Die Reflexionsunterschiede wurden mit Hilfe der Formel 18 (s. Kapitel 4.4.5.1) berechnet.
- In der ersten Reihe werden die Reflexionsverteilung und -unterschiede in der Wellenlänge  $0.55\mu\text{m}$  dargestellt. Entsprechend werden in der zweiten, dritten und vierten Reihe die Reflexionsverteilung und –unterschiede in den Wellenlängen  $0.67\mu\text{m}$ ,  $0.97\mu\text{m}$  und  $1.65\mu\text{m}$  präsentiert.

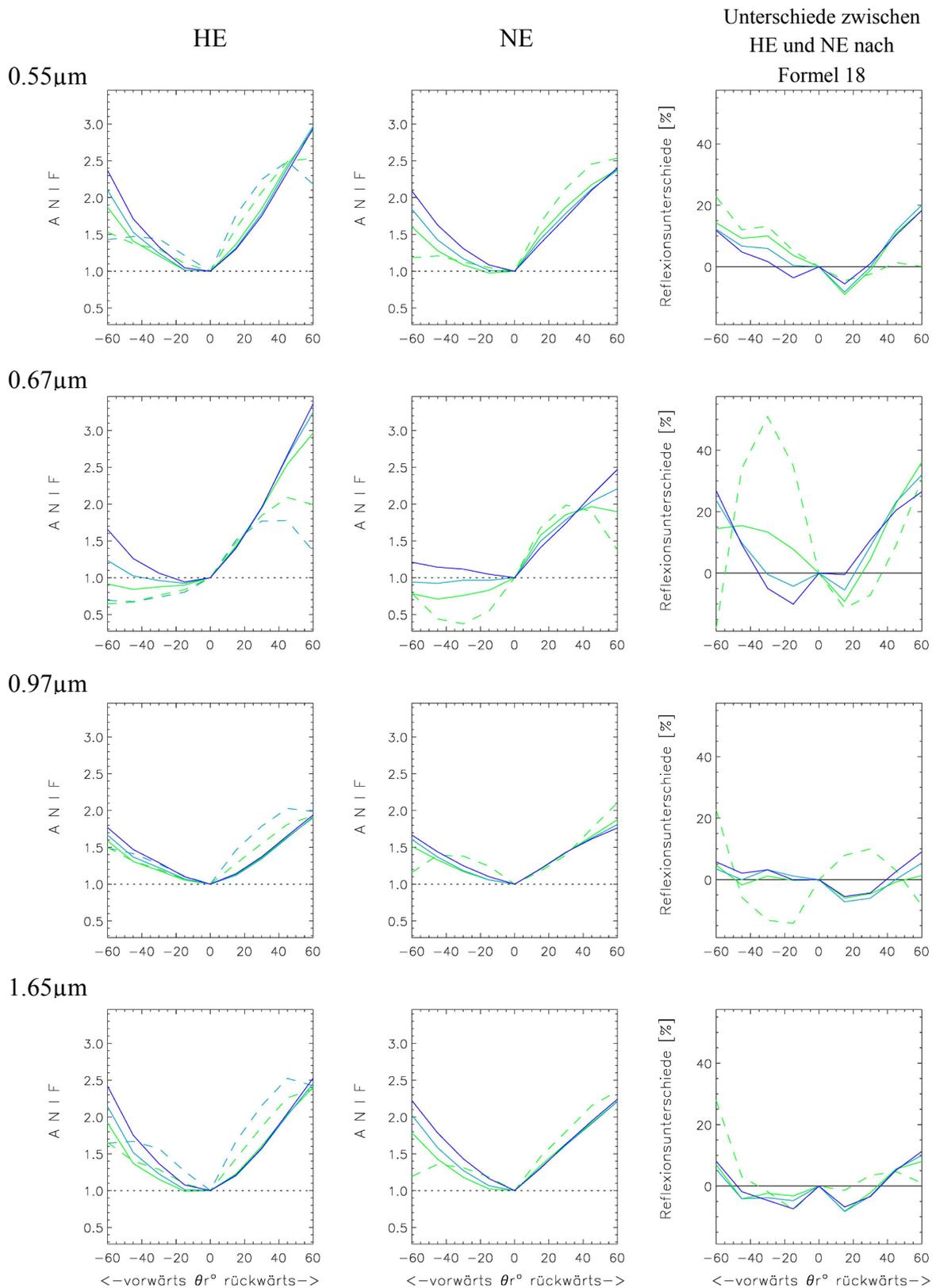
Im Anhang B werden die Werte der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes an denselben Entwicklungsstadien, Sonnen- und Beobachtungswinkeln mit denjenigen im Anhang A dargestellt. In jeder Abbildung bzw. auf jeder Seite werden die Vegetationsindizes je nach Entwicklungsstadium, Beobachtungszimutebene und Standort dargestellt.

Schließlich muss erwähnt werden, dass bei den Darstellungen, welche die um  $90^\circ$  zur Sonnenhauptebene gedrehte Beobachtungszimutebene betreffen, lediglich die Beobachtungszimutebene bei der Beobachtungszimutebene von  $90^\circ$  präsentiert werden. Die Werte der Beobachtungszimutebene bei der Beobachtungszimutebene von  $270^\circ$  wurden nach der zweiten Annahme der Messstrategie (s. Kapitel 4.2.1) simuliert und sind aufgrund der Simulationsmethodik der symmetrischen „Spiegelung“ der Messwerte um die Sonnenhauptebene die gleiche mit denjenigen bei der Beobachtungszimutebene von  $90^\circ$ .

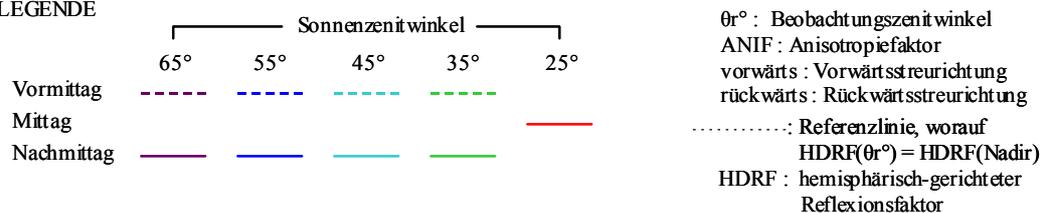
## **ANHANG A**

### **A1 Reflexionsverteilung parallel zur Sonnenhauptebene ( $\varphi^\circ: 0^\circ / 180^\circ$ )**



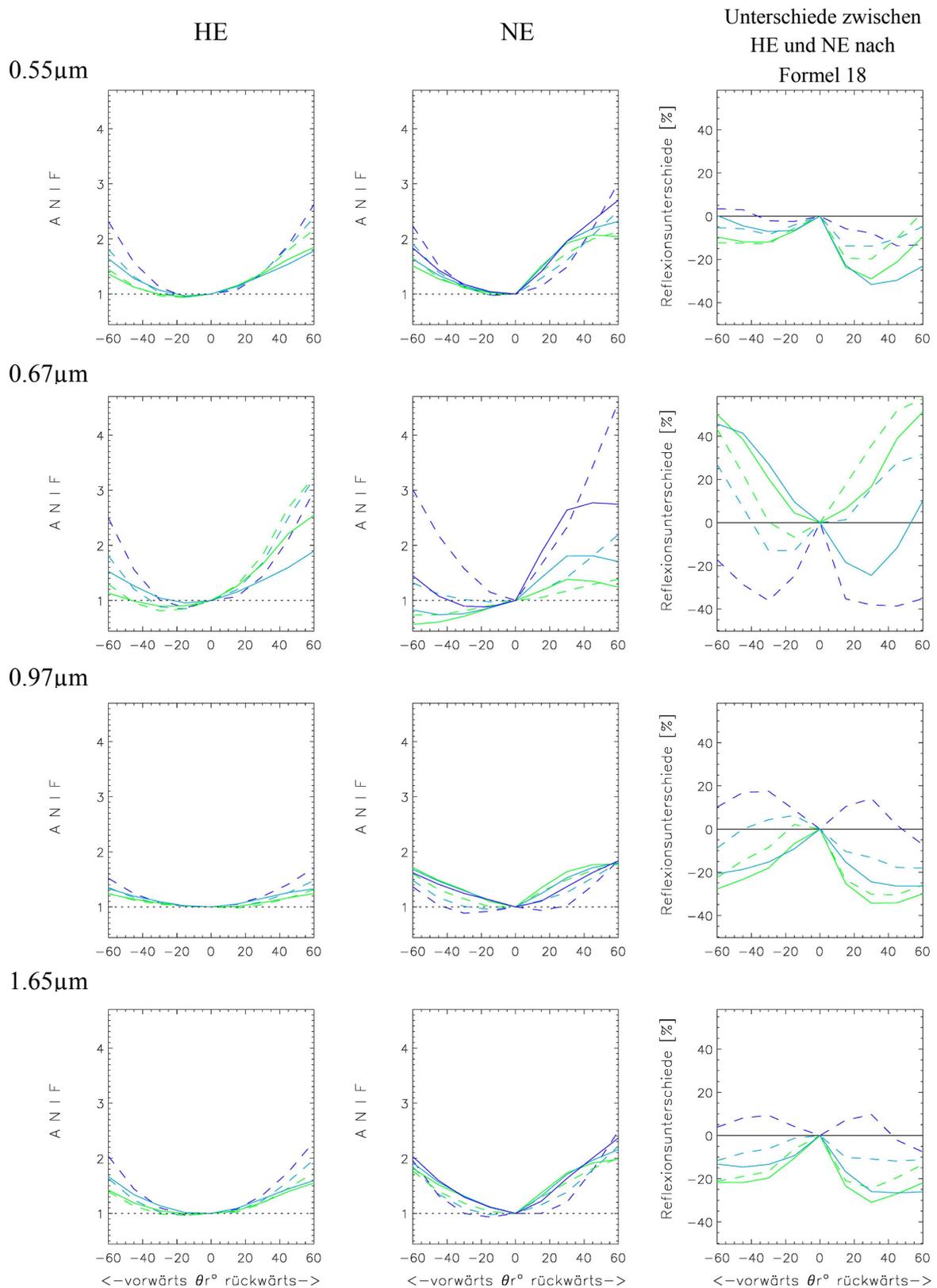


LEGENDE

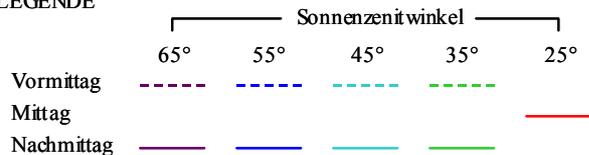


**Abbildung 72.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC32 in der Vegetationsperiode 2000. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).



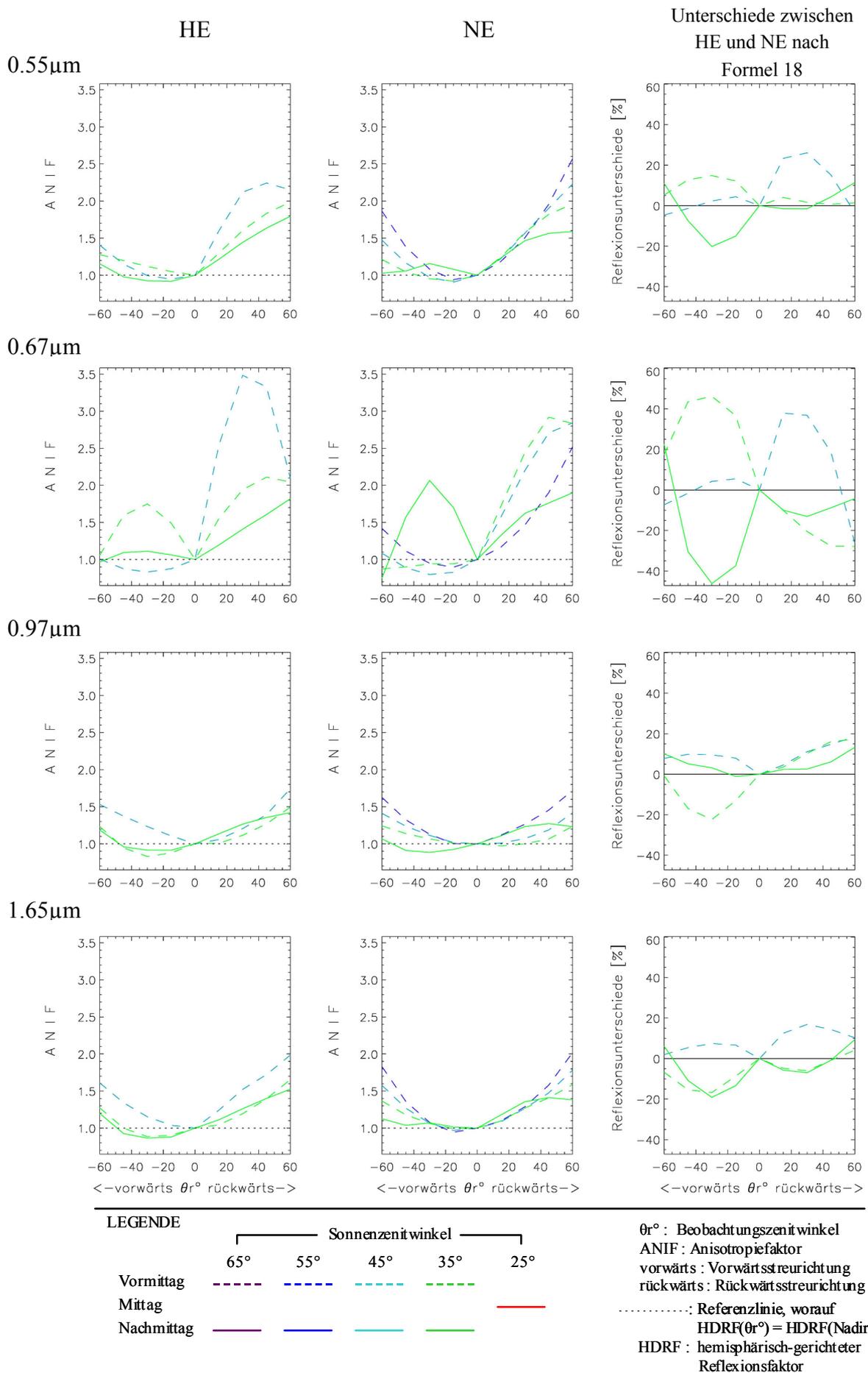


LEGENDE



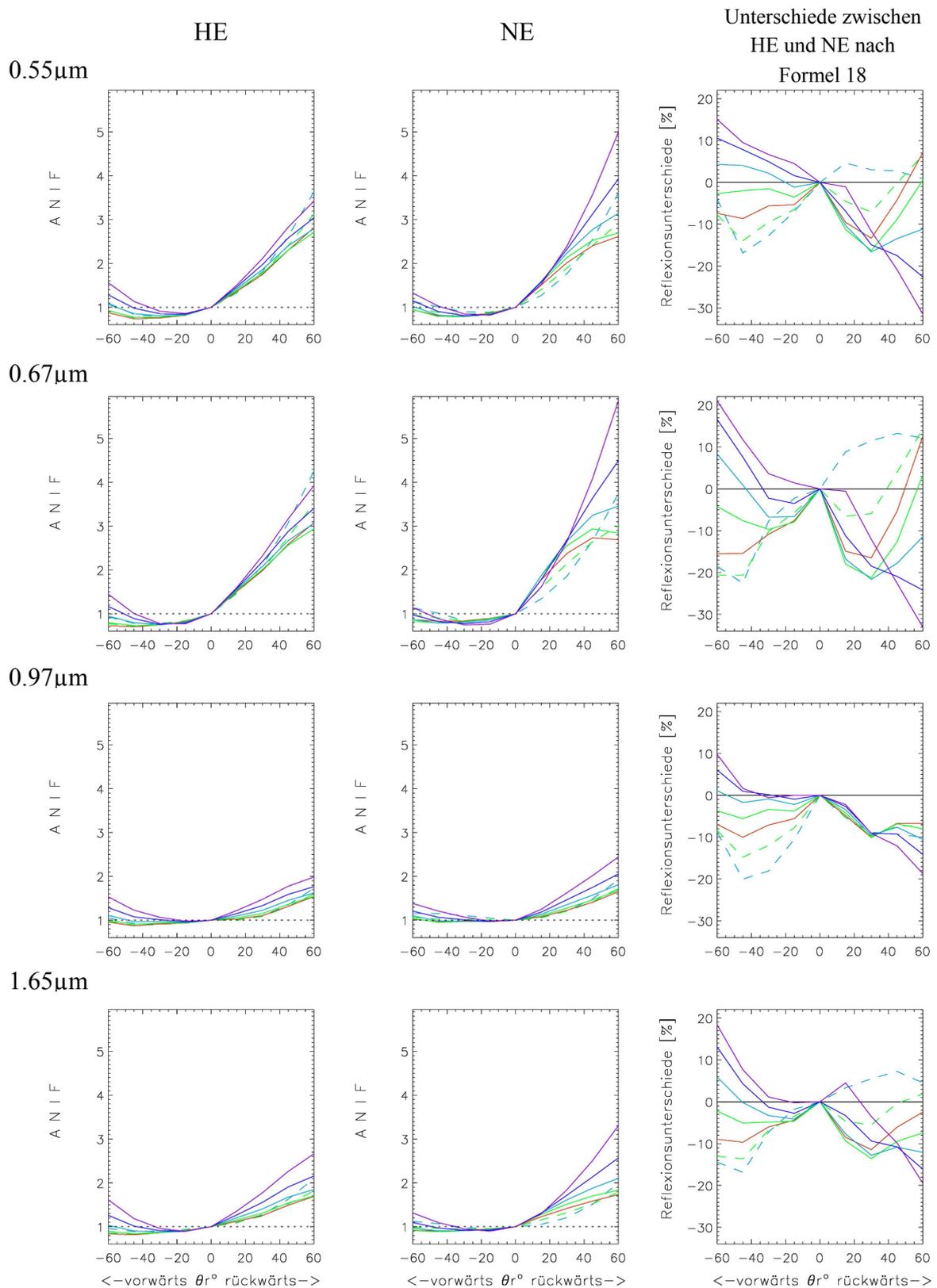
$\theta_r^\circ$  : Beobachtungszenitwinkel  
 ANIF : Anisotropiefaktor  
 vorwärts : Vorwärtsstreirichtung  
 rückwärts : Rückwärtsstreirichtung  
 ..... : Referenzlinie, worauf  $HDRF(\theta_r^\circ) = HDRF(\text{Nadir})$   
 HDRF : hemisphärisch-gerichteter Reflexionsfaktor

Abbildung 74. Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC39 in der Vegetationsperiode 2000. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).

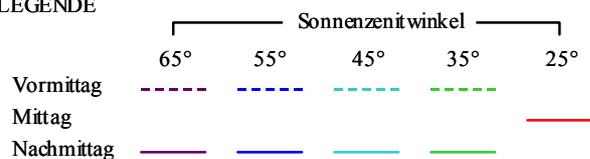


**Abbildung 75.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC39 in der Vegetationsperiode 2001. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).



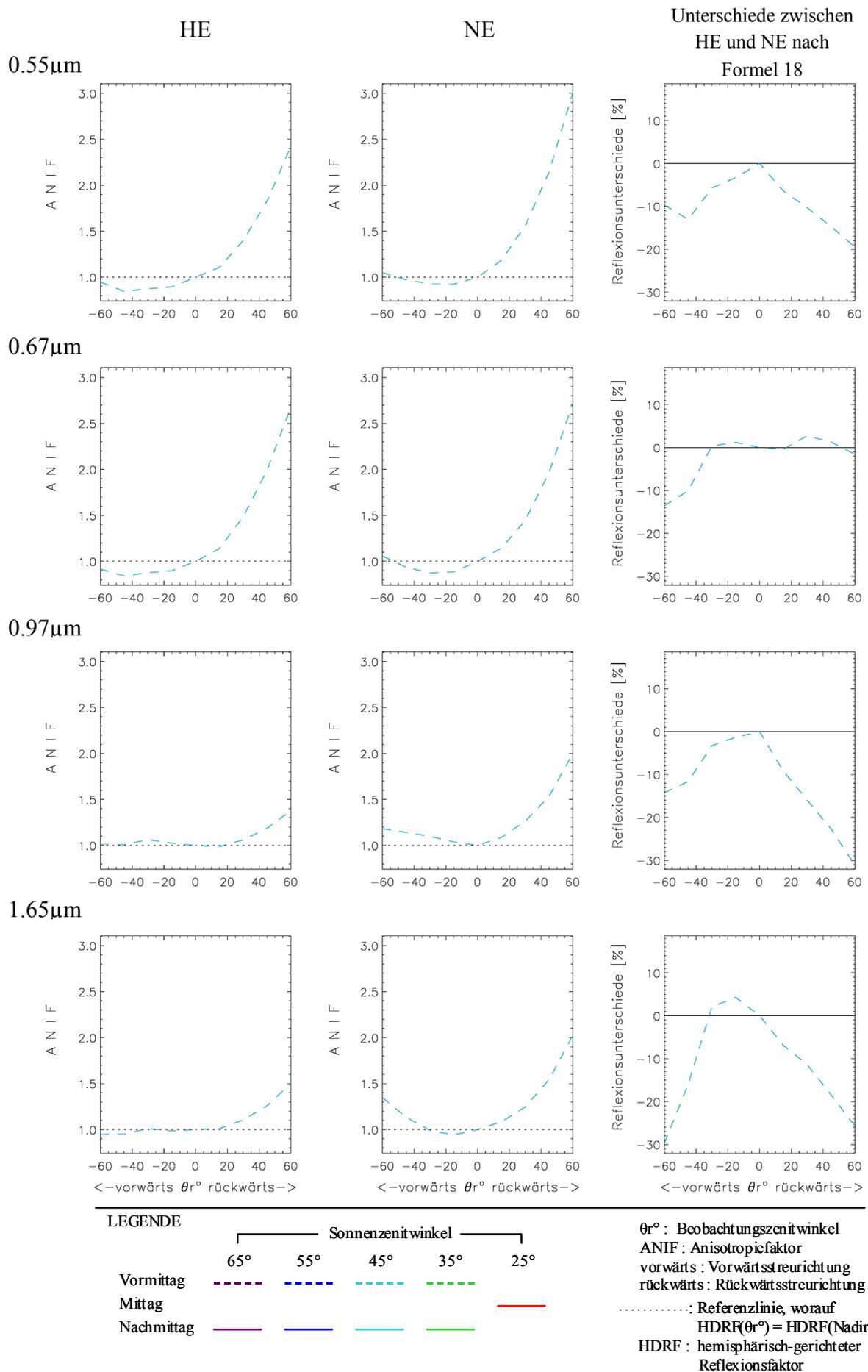


LEGENDE

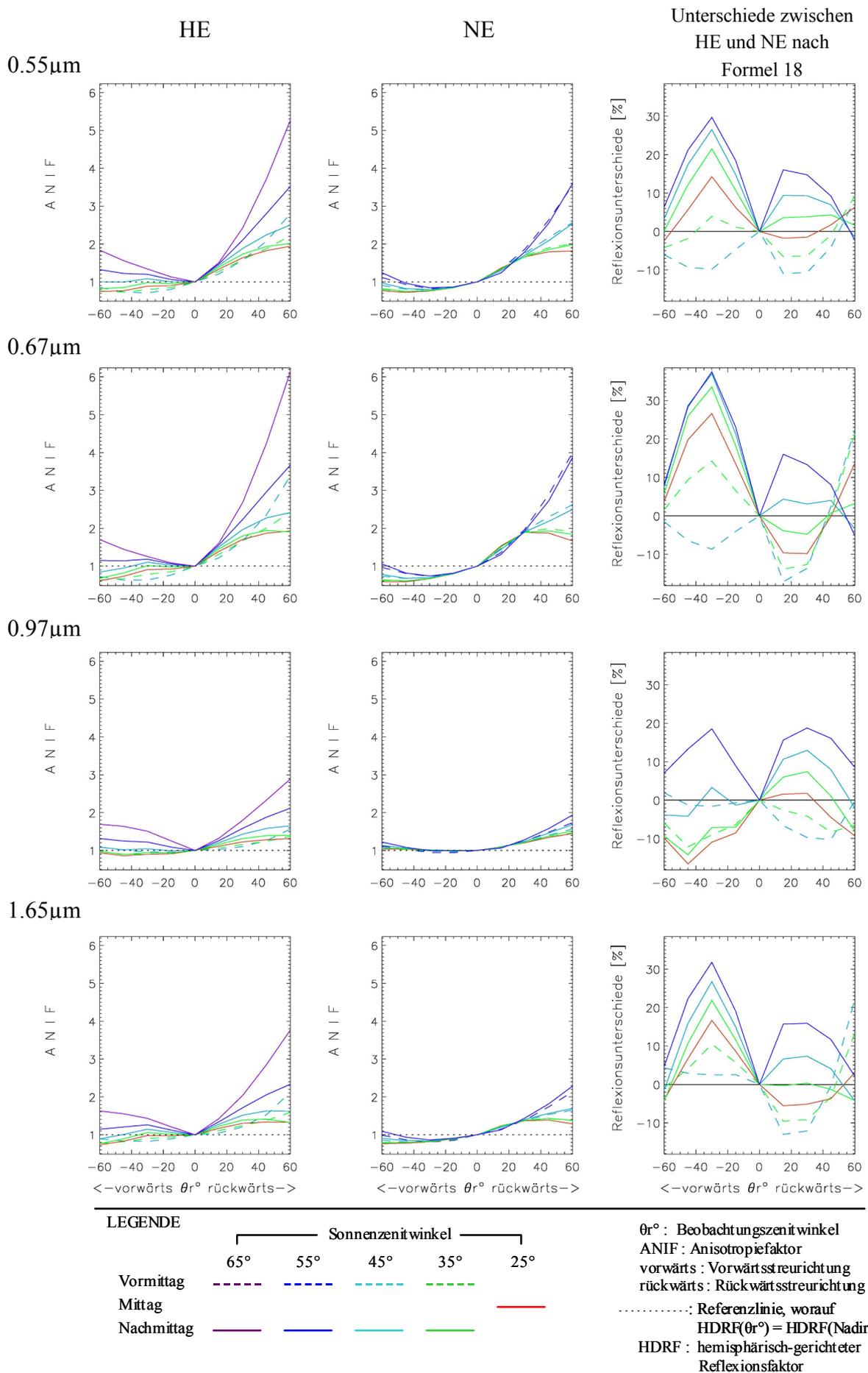


$\theta_r^\circ$  : Beobachtungszenitwinkel  
 ANIF : Anisotropiefaktor  
 vorwärts : Vorwärtsstreue  
 rückwärts : Rückwärtsstreue  
 ..... : Referenzlinie, worauf  $HDRF(\theta_r^\circ) = HDRF(\text{Nadir})$   
 HDRF : hemisphärisch-gerichteter Reflexionsfaktor

**Abbildung 77.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC65 in der Vegetationsperiode 2000. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).



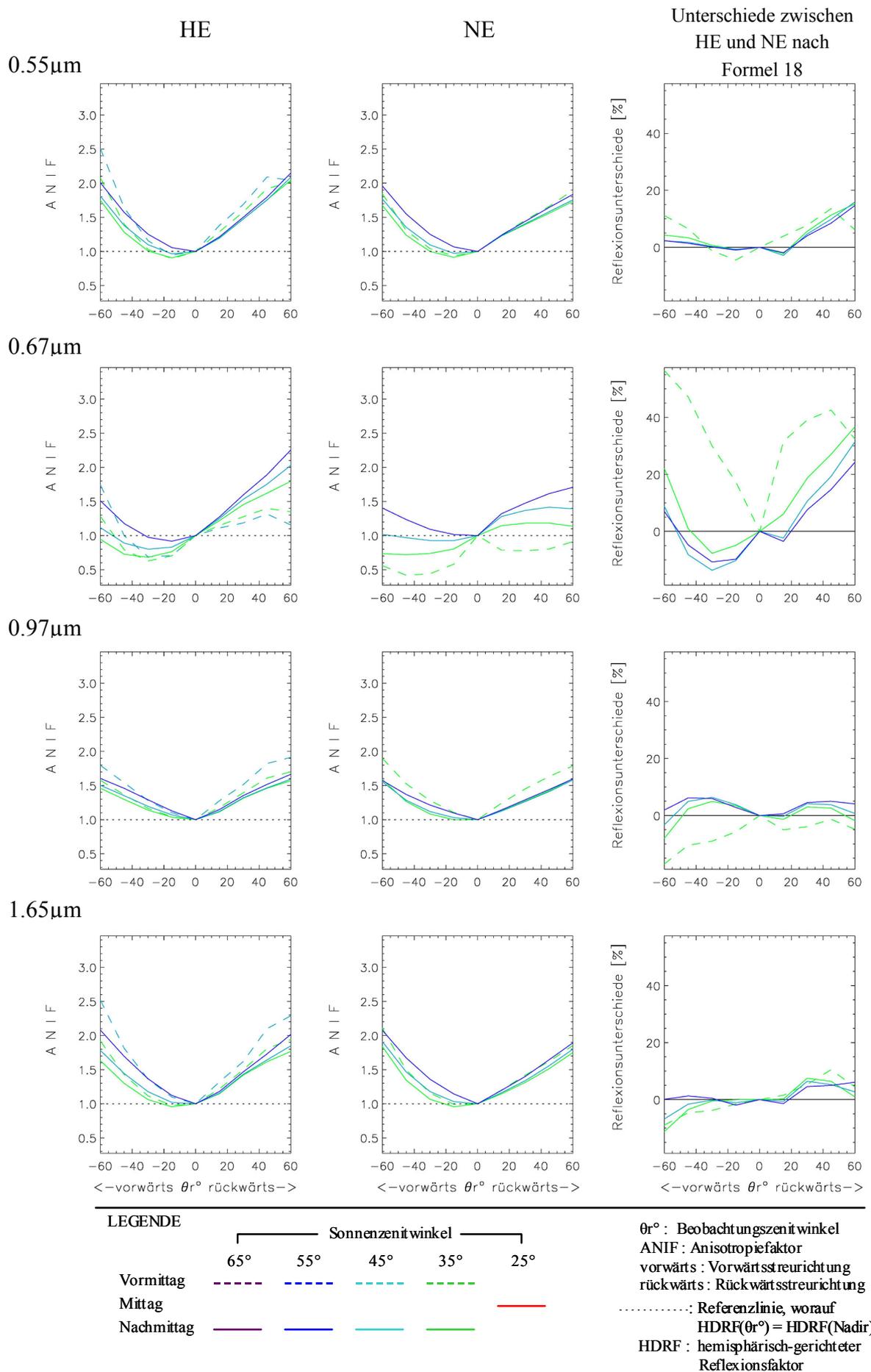
**Abbildung 78.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC71 in der Vegetationsperiode 2000. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).



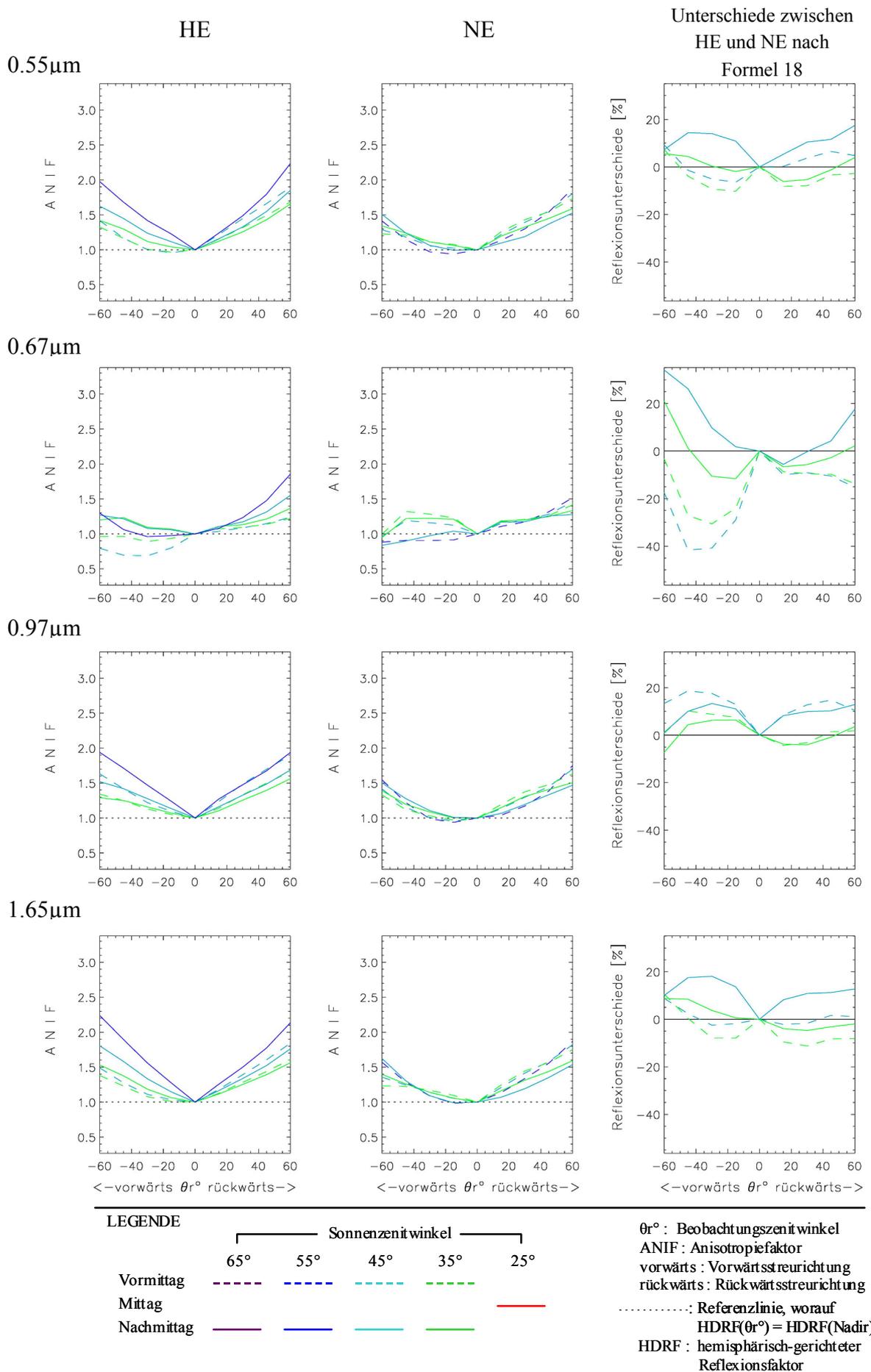
**Abbildung 79.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC71 in der Vegetationsperiode 2001. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).

**A2 Reflexionsverteilung in der um  $45^\circ$  zur Sonnenhauptebene gedrehte  
Beobachtungszimutebene ( $\varphi^\circ: 45^\circ / 225^\circ$ )**

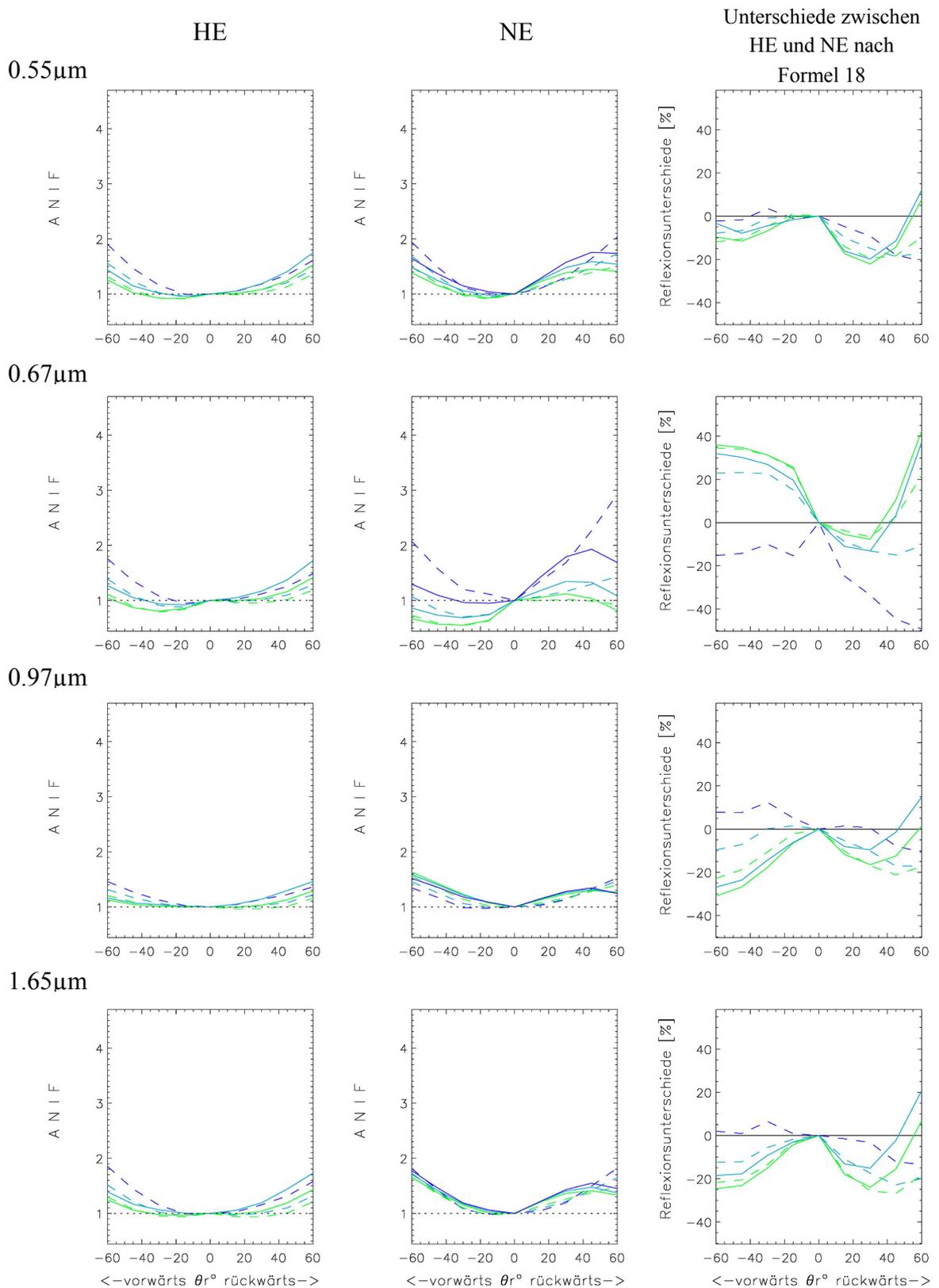




**Abbildung 81.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC32 in der Vegetationsperiode 2000. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).



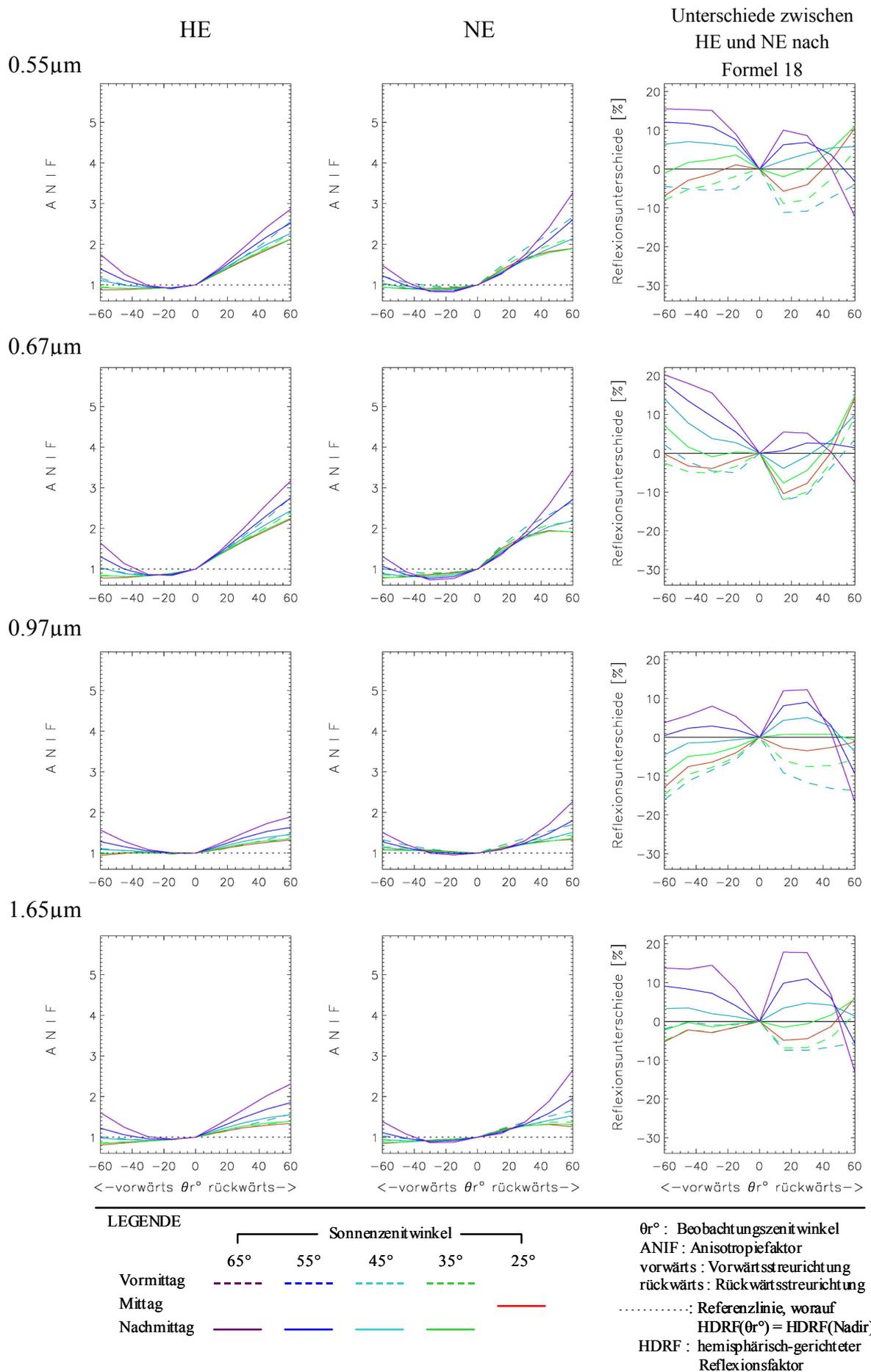
**Abbildung 82.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC32 in der Vegetationsperiode 2001. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).



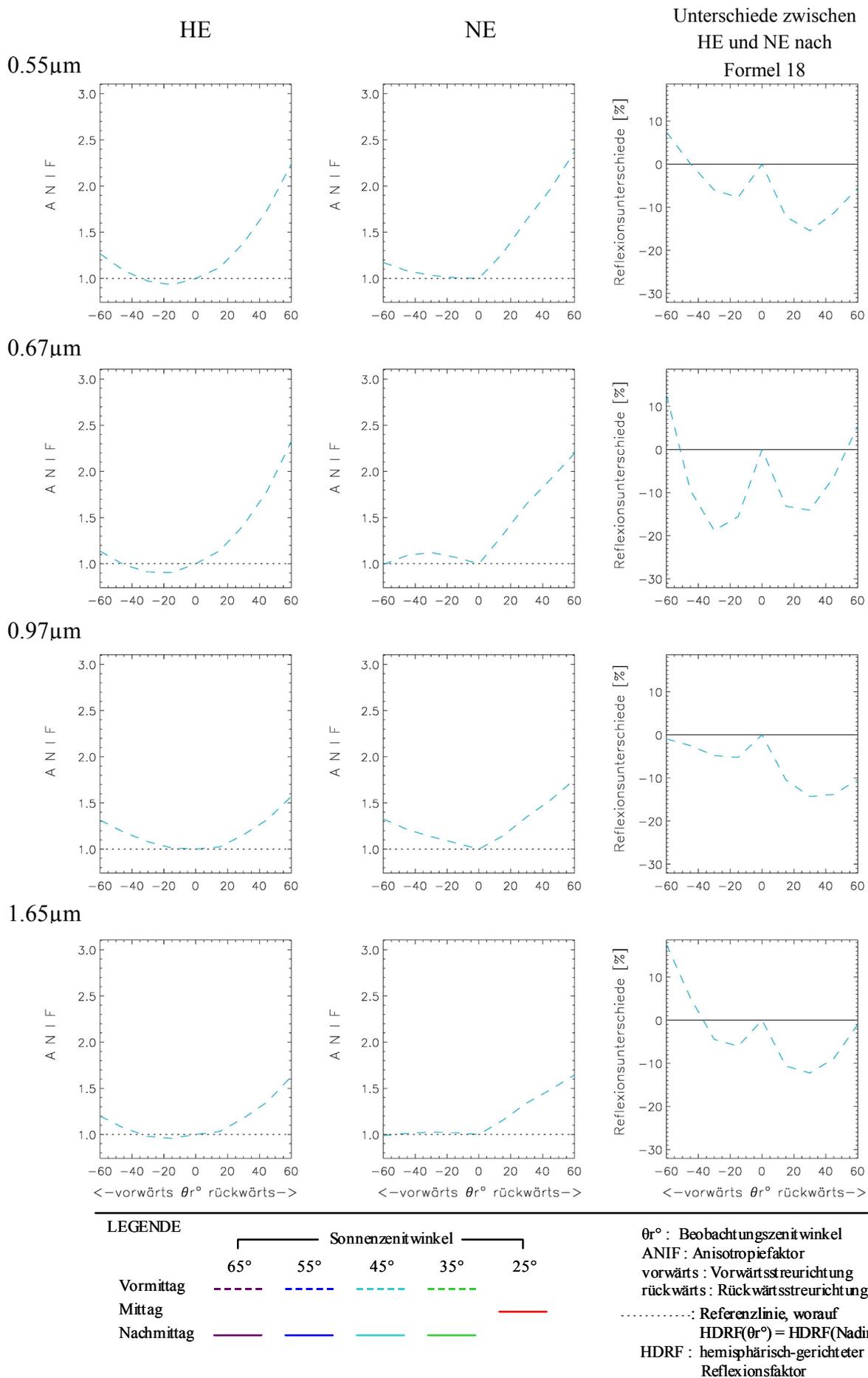
**Abbildung 83.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC39 in der Vegetationsperiode 2000. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).



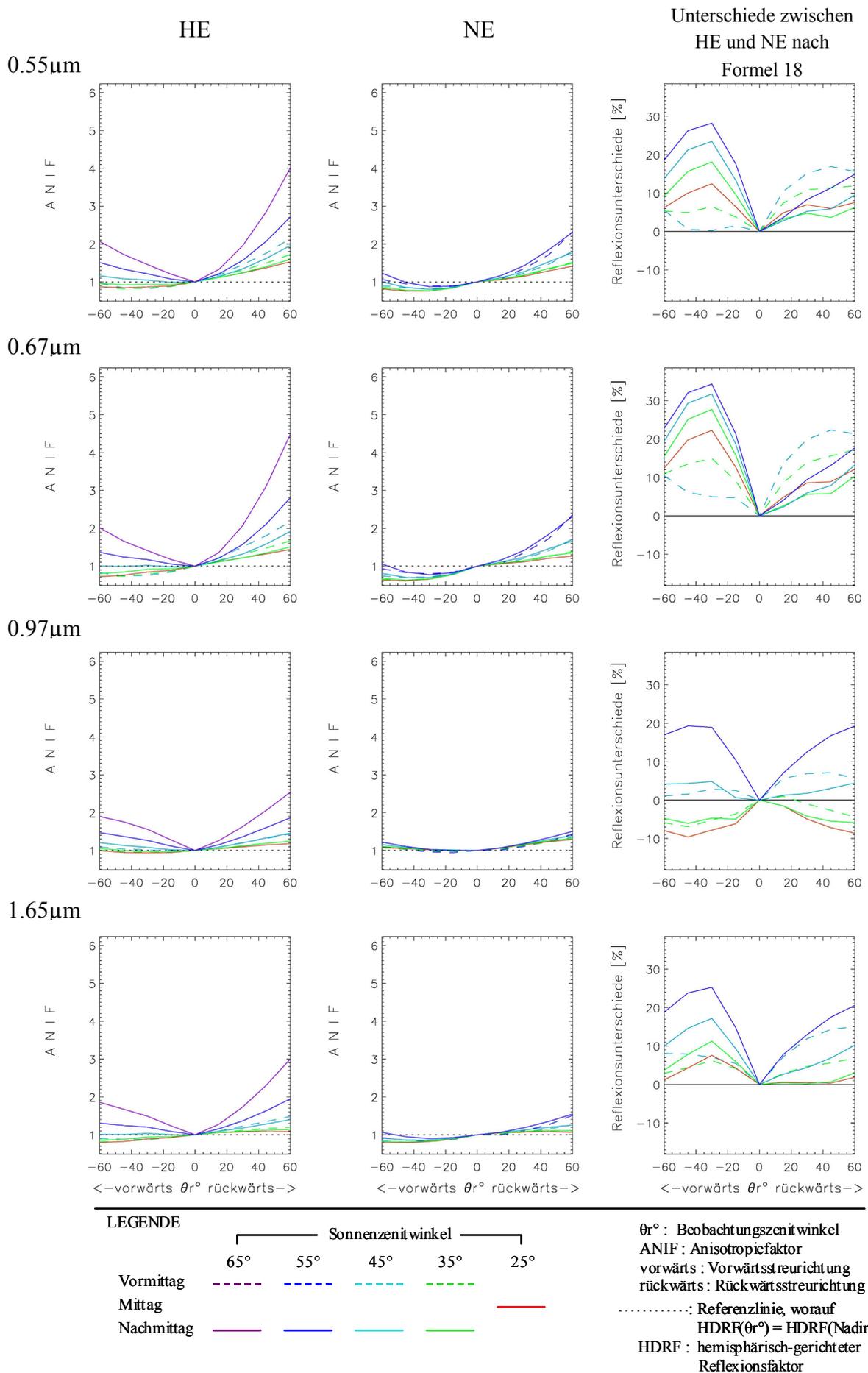




**Abbildung 86.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC65 in der Vegetationsperiode 2000. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).

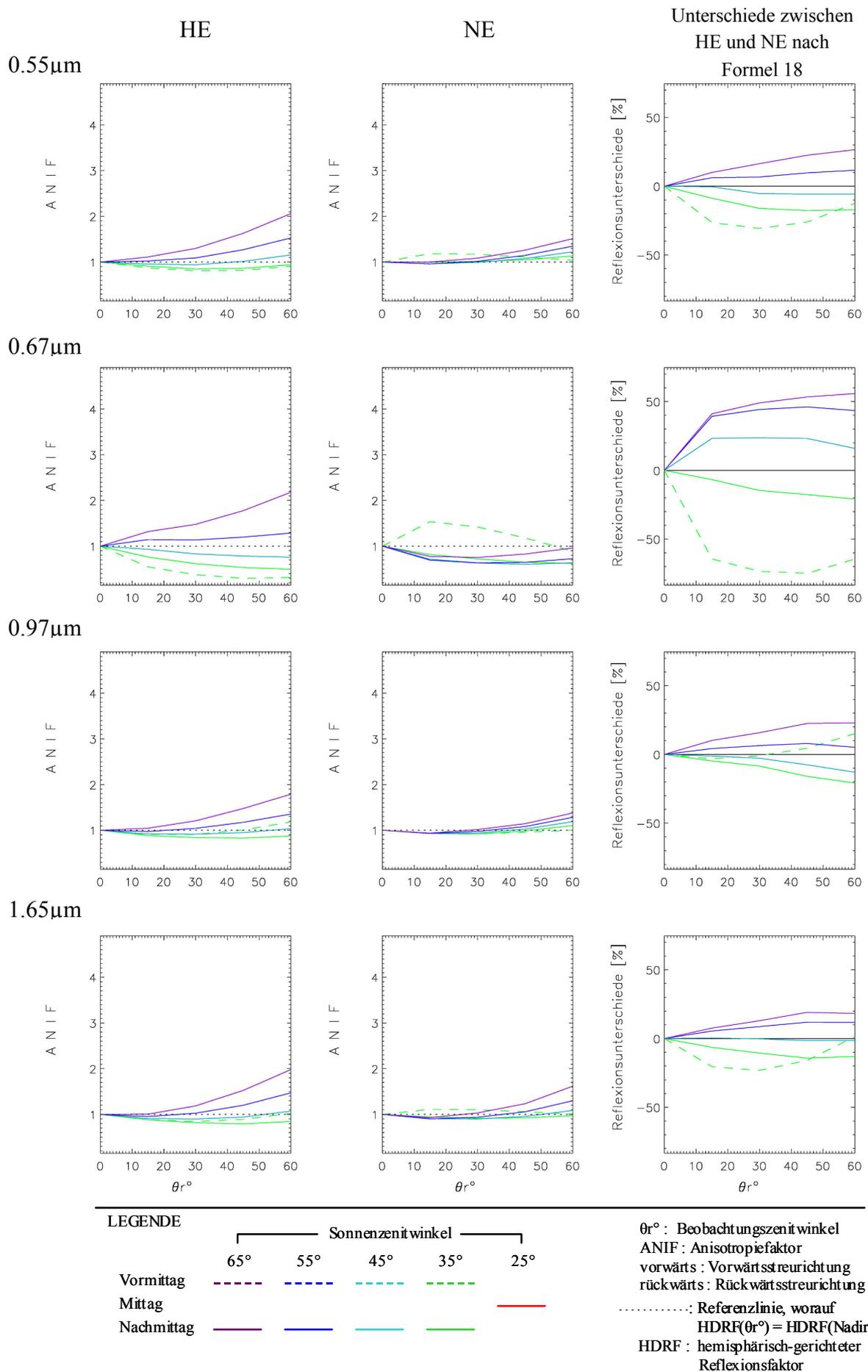


**Abbildung 87.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC71 in der Vegetationsperiode 2000. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).

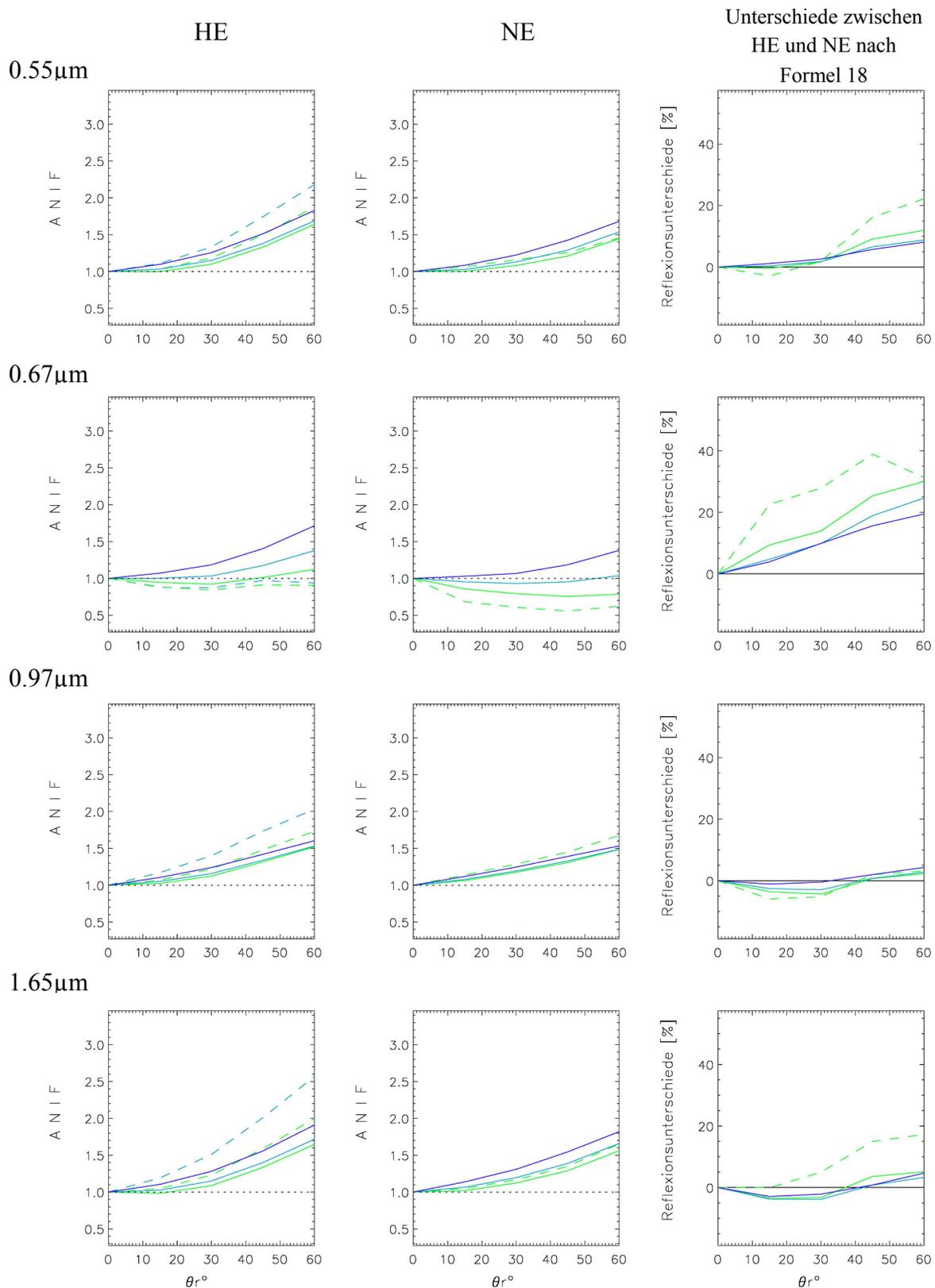


**Abbildung 88.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC71 in der Vegetationsperiode 2001. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).

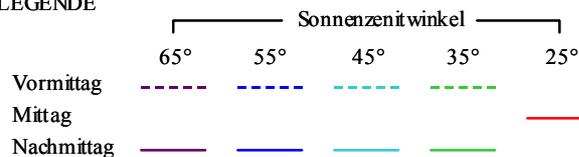
**A3 Reflexionsverteilung in der um  $90^\circ$  zur Sonnenhauptebene gedrehte  
Beobachtungszimutebene ( $\varphi^\circ$ :  $90^\circ$  /  $270^\circ$ )**



**Abbildung 89.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC30 in der Vegetationsperiode 2000. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).

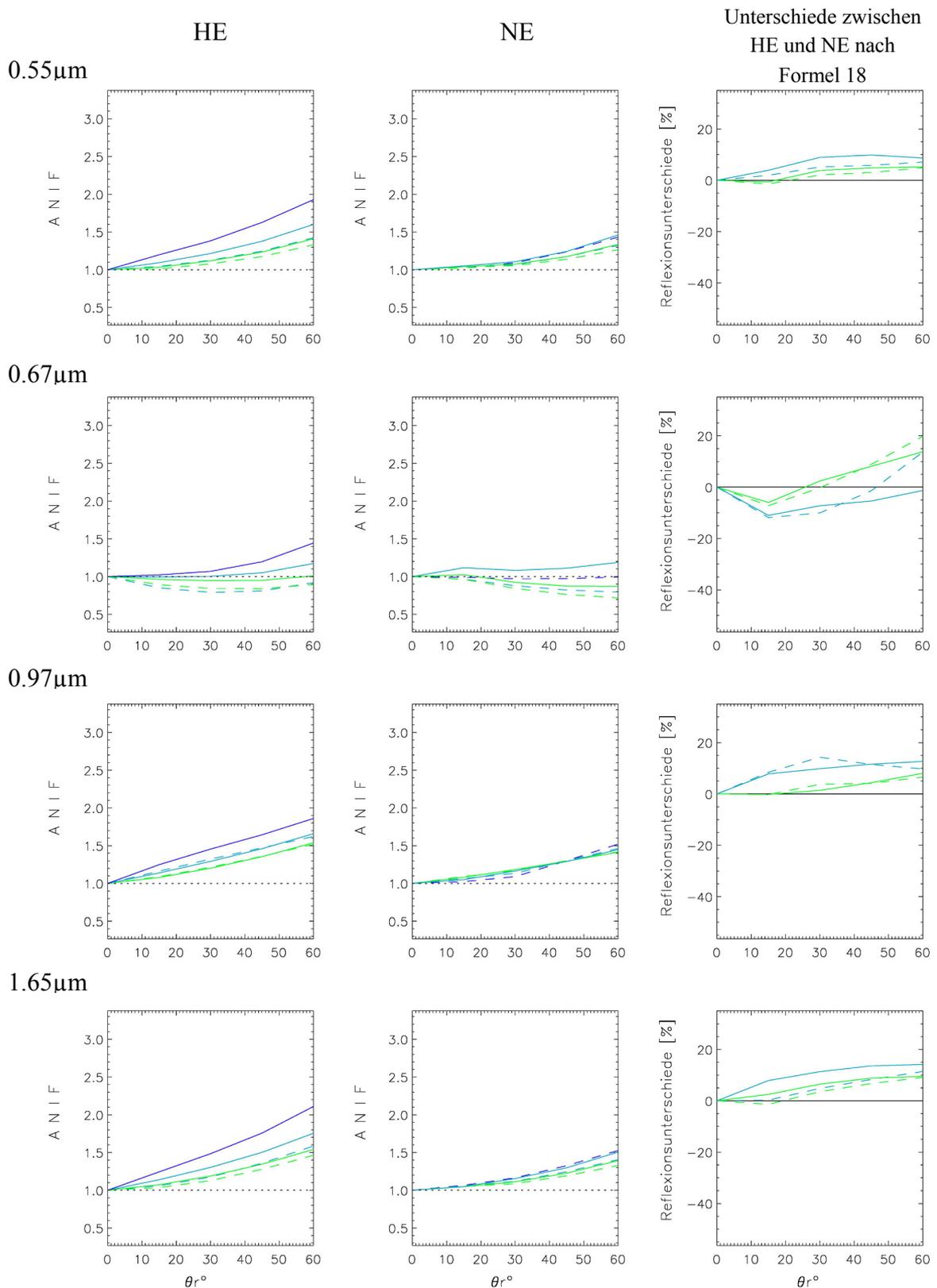


LEGENDE

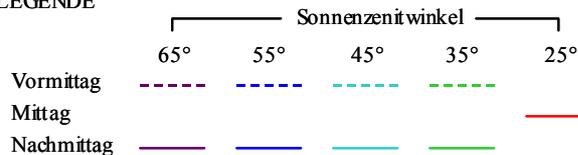


$\theta_r^\circ$  : Beobachtungszenitwinkel  
 ANIF : Anisotropiefaktor  
 vorwärts : Vorwärtsstreureichtung  
 rückwärts : Rückwärtsstreureichtung  
 ..... : Referenzlinie, worauf  
 $\text{HDRF}(\theta_r^\circ) = \text{HDRF}(\text{Nadir})$   
 HDRF : hemisphärisch-gerichteter  
 Reflexionsfaktor

Abbildung 90. Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC32 in der Vegetationsperiode 2000. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).

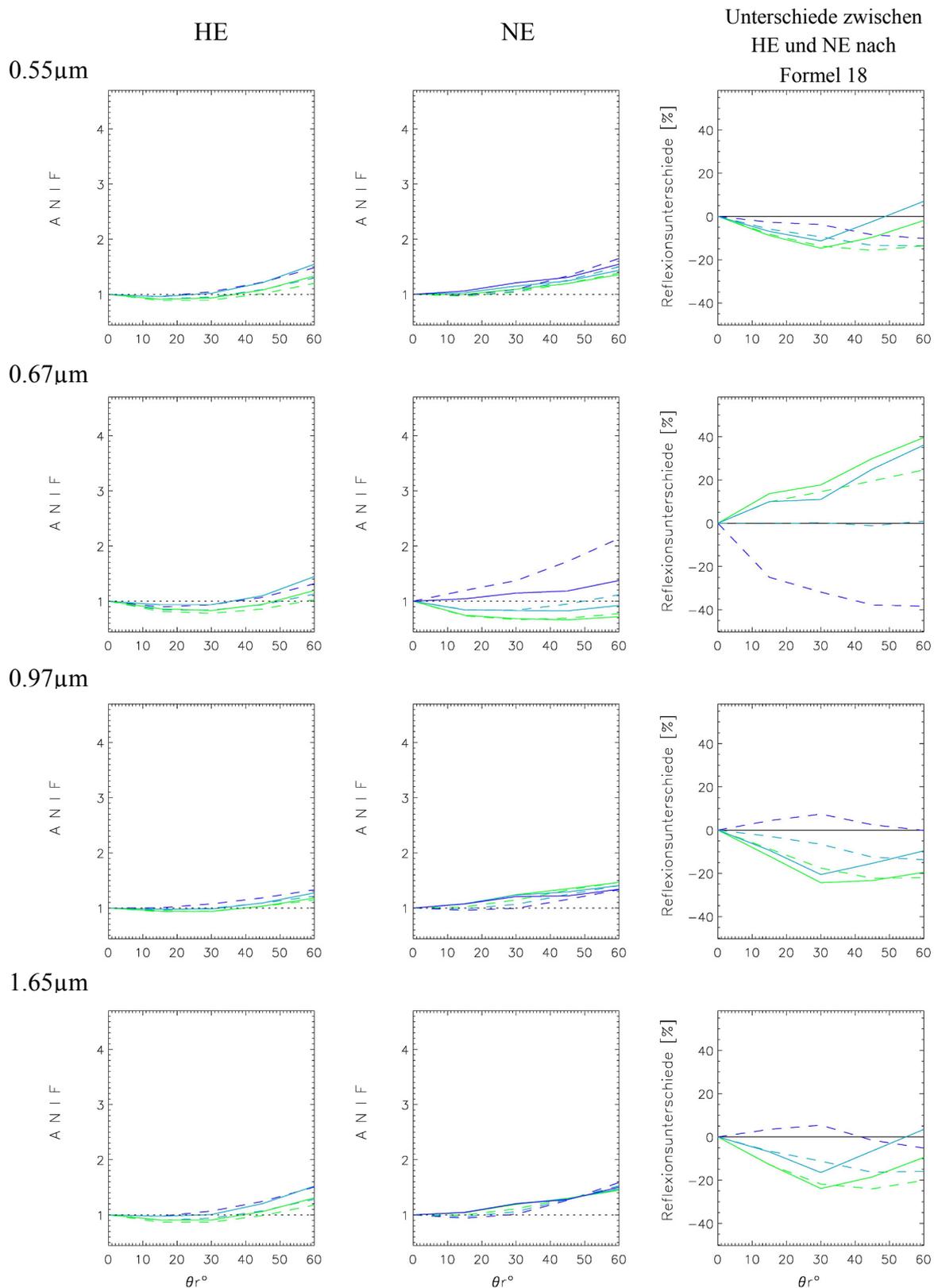


LEGENDE

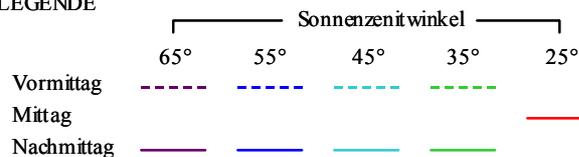


$\theta_r^\circ$  : Beobachtungszenitwinkel  
 ANIF : Anisotropiefaktor  
 vorwärts : Vorwärtsstreureichtung  
 rückwärts : Rückwärtsstreureichtung  
 ..... : Referenzlinie, worauf  
 $\text{HDRF}(\theta_r^\circ) = \text{HDRF}(\text{Nadir})$   
 HDRF : hemisphärisch-gerichteter  
 Reflexionsfaktor

Abbildung 91. Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC32 in der Vegetationsperiode 2001. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).

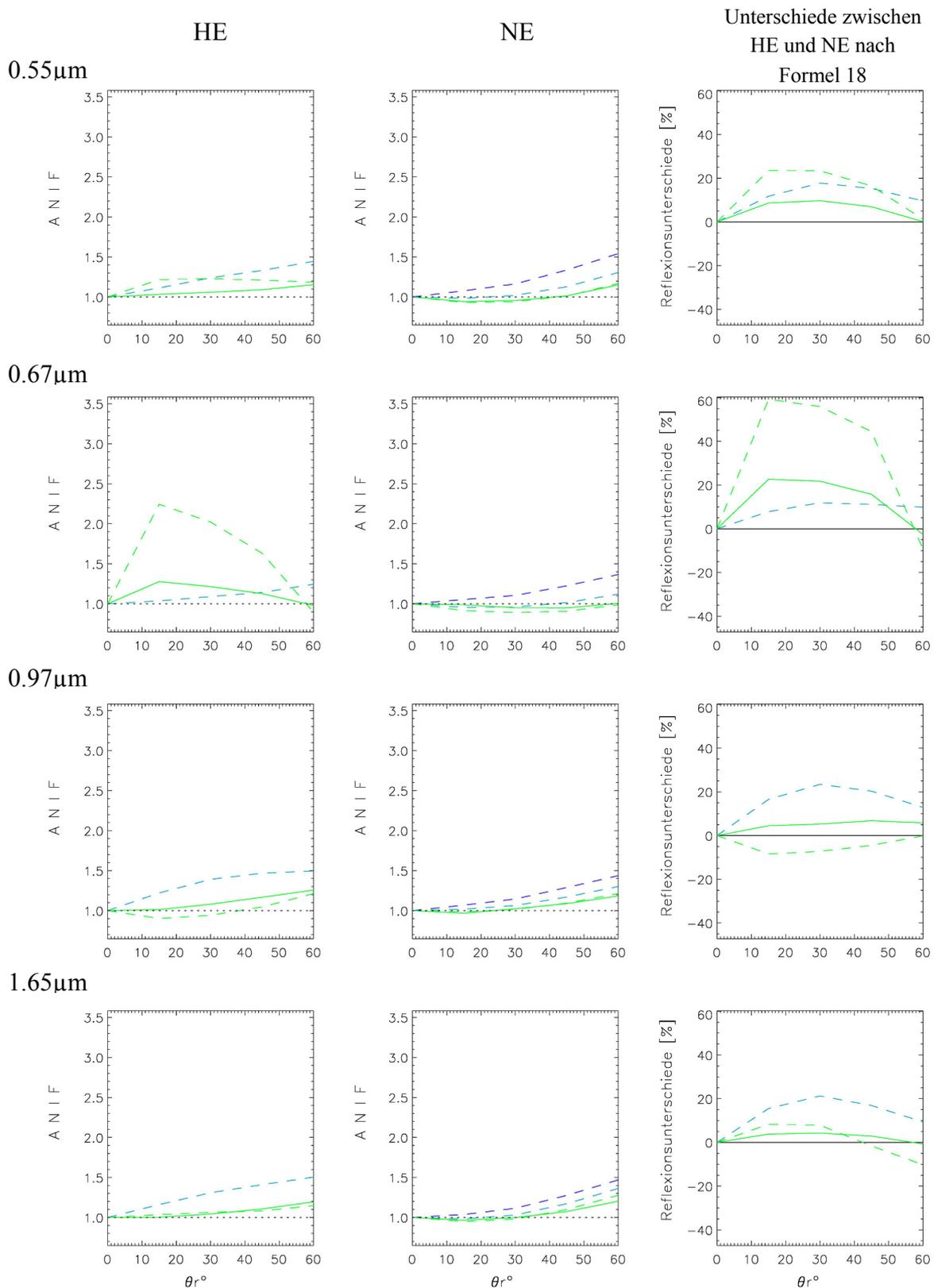


LEGENDE

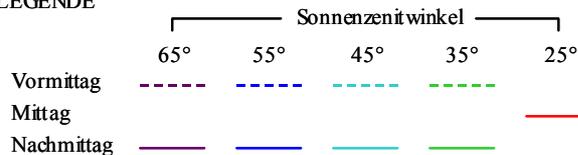


$\theta_r$ : Beobachtungszenitwinkel  
 ANIF: Anisotropiefaktor  
 vorwärts: Vorwärtsstreureichtung  
 rückwärts: Rückwärtsstreureichtung  
 .....: Referenzlinie, worauf  
 $\text{HDRF}(\theta_r) = \text{HDRF}(\text{Nadir})$   
 HDRF: hemisphärisch-gerichteter  
 Reflexionsfaktor

**Abbildung 92.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC39 in der Vegetationsperiode 2000. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).

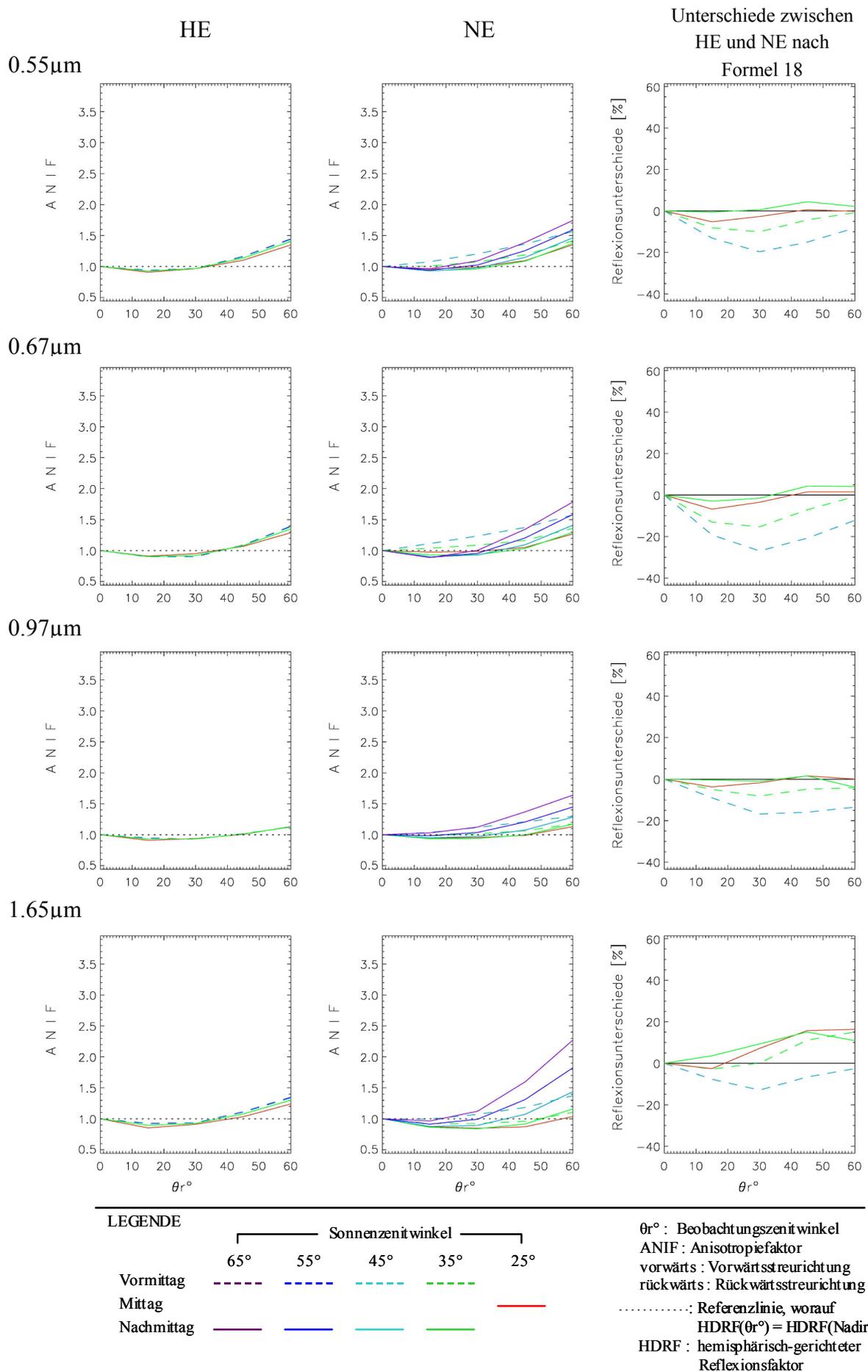


LEGENDE

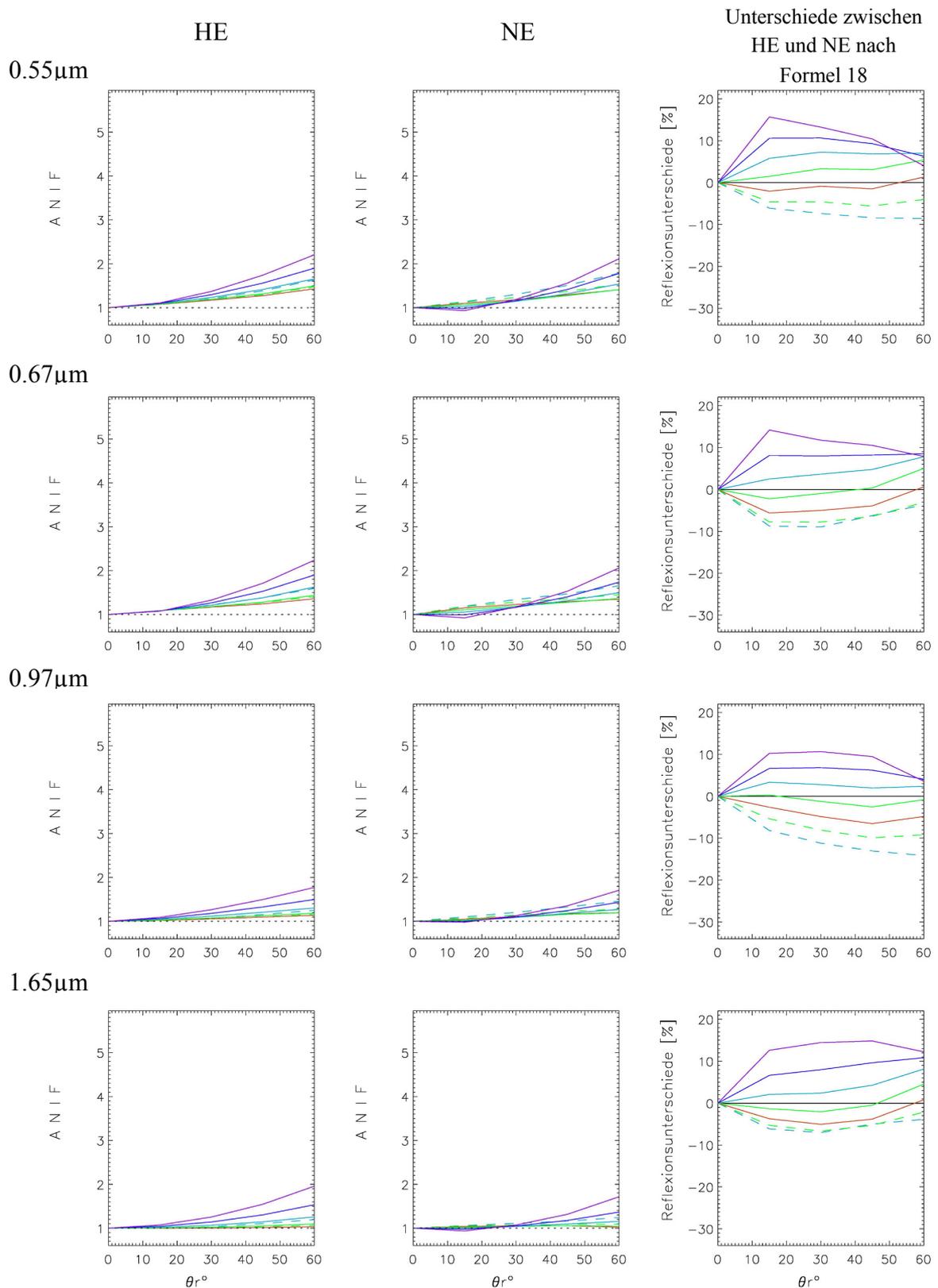


$\theta_r$ : Beobachtungszenitwinkel  
 ANIF: Anisotropiefaktor  
 vorwärts: Vorwärtsstreureichtung  
 rückwärts: Rückwärtsstreureichtung  
 .....: Referenzlinie, worauf  
 $HDRF(\theta_r) = HDRF(\text{Nadir})$   
 HDRF: hemisphärisch-gerichteter  
 Reflexionsfaktor

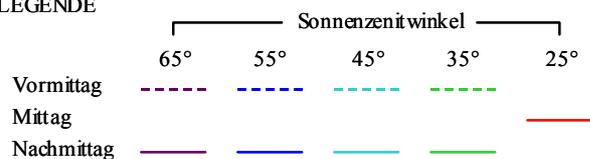
Abbildung 93. Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC39 in der Vegetationsperiode 2001. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).



**Abbildung 94.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC51 in der Vegetationsperiode 2000. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).

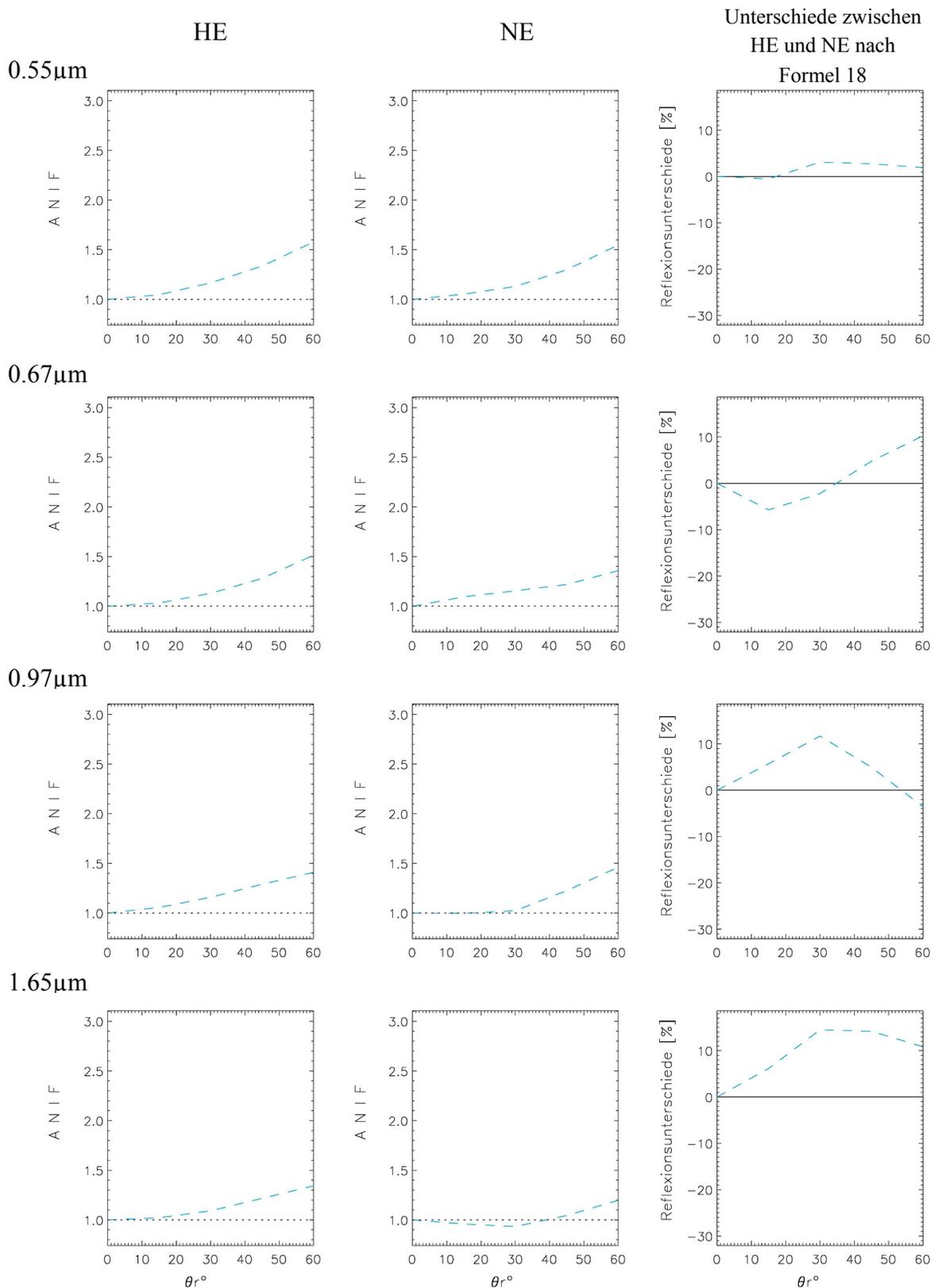


LEGENDE

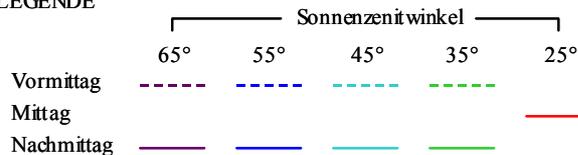


$\theta_r$ : Beobachtungszenitwinkel  
 ANIF: Anisotropiefaktor  
 vorwärts: Vorwärtsstreureichtung  
 rückwärts: Rückwärtsstreureichtung  
 .....: Referenzlinie, worauf  
 $HDRF(\theta_r) = HDRF(\text{Nadir})$   
 HDRF: hemisphärisch-gerichteter  
 Reflexionsfaktor

**Abbildung 95.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC65 in der Vegetationsperiode 2000. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).

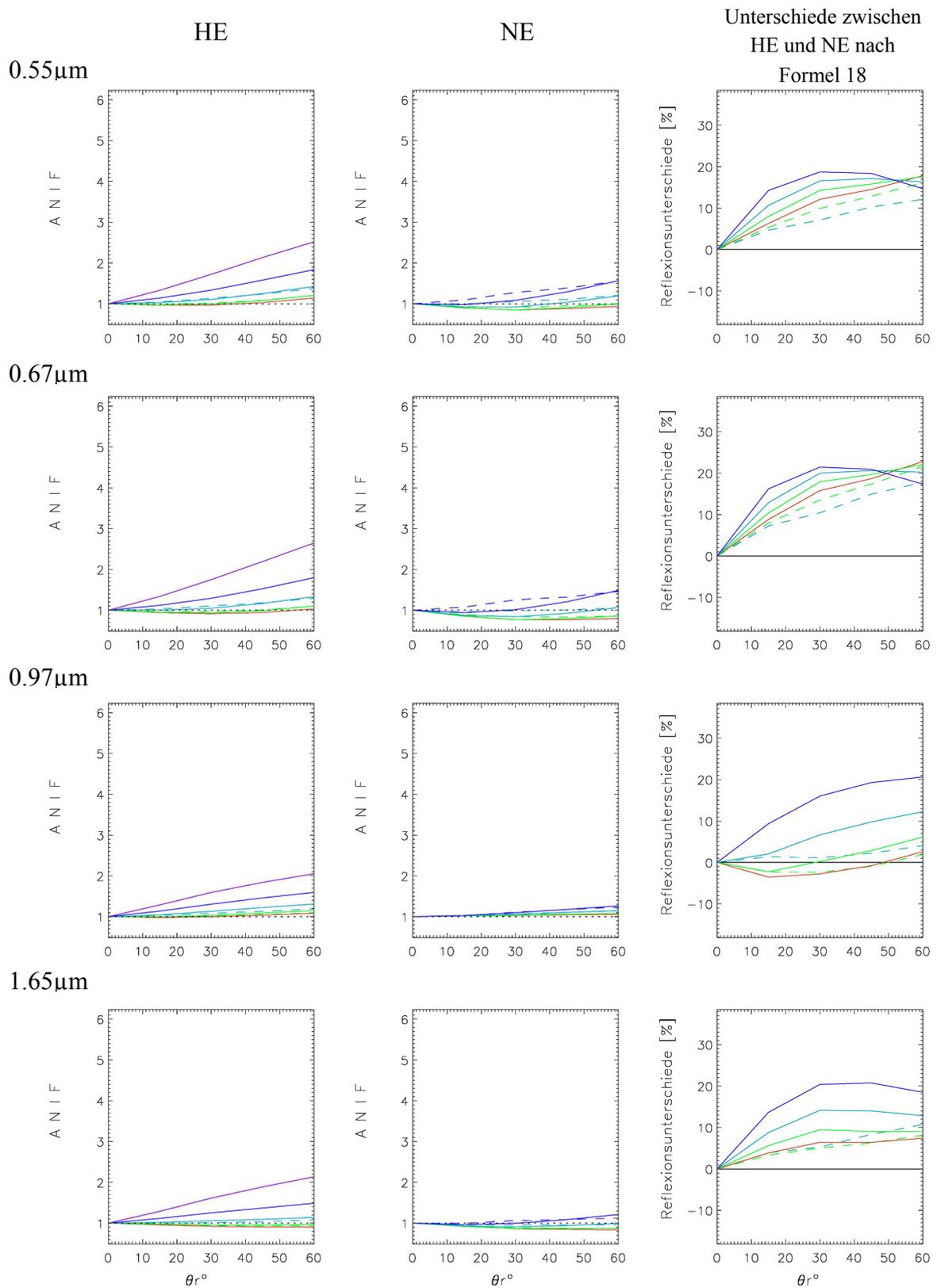


LEGENDE

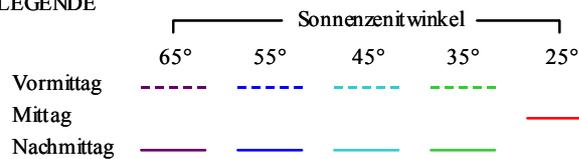


$\theta_r$ : Beobachtungszenitwinkel  
 ANIF: Anisotropiefaktor  
 vorwärts: Vorwärtsstreureichtung  
 rückwärts: Rückwärtsstreureichtung  
 .....: Referenzlinie, worauf  
 $\text{HDRF}(\theta_r) = \text{HDRF}(\text{Nadir})$   
 HDRF: hemisphärisch-gerichteter  
 Reflexionsfaktor

**Abbildung 96.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC71 in der Vegetationsperiode 2000. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).



LEGENDE

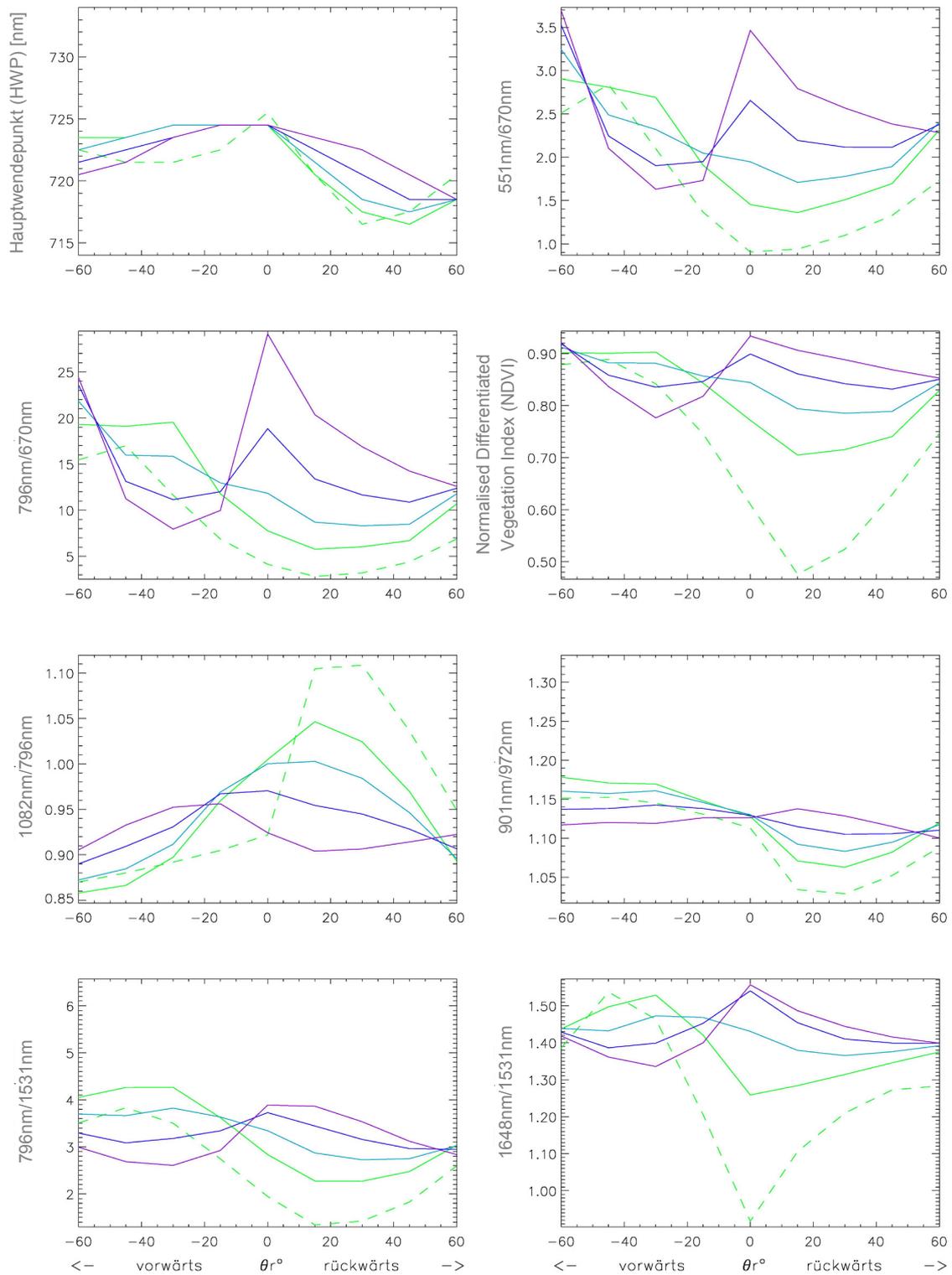


$\theta_r$ : Beobachtungszenitwinkel  
 ANIF: Anisotropiefaktor  
 vorwärts: Vorwärtsstreureichtung  
 rückwärts: Rückwärtsstreureichtung  
 .....: Referenzlinie, worauf  
 $HDRF(\theta_r) = HDRF(\text{Nadir})$   
 HDRF: hemisphärisch-gerichteter  
 Reflexionsfaktor

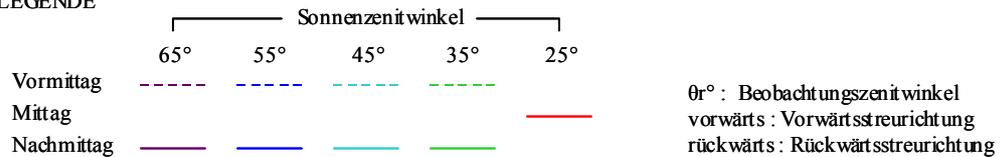
**Abbildung 97.** Reflexionsverteilung im Tagesverlauf bei EC71 in der Vegetationsperiode 2001. (HE oder NE: Standort hohen oder niedrigen Ertrags).

## **ANHANG B**

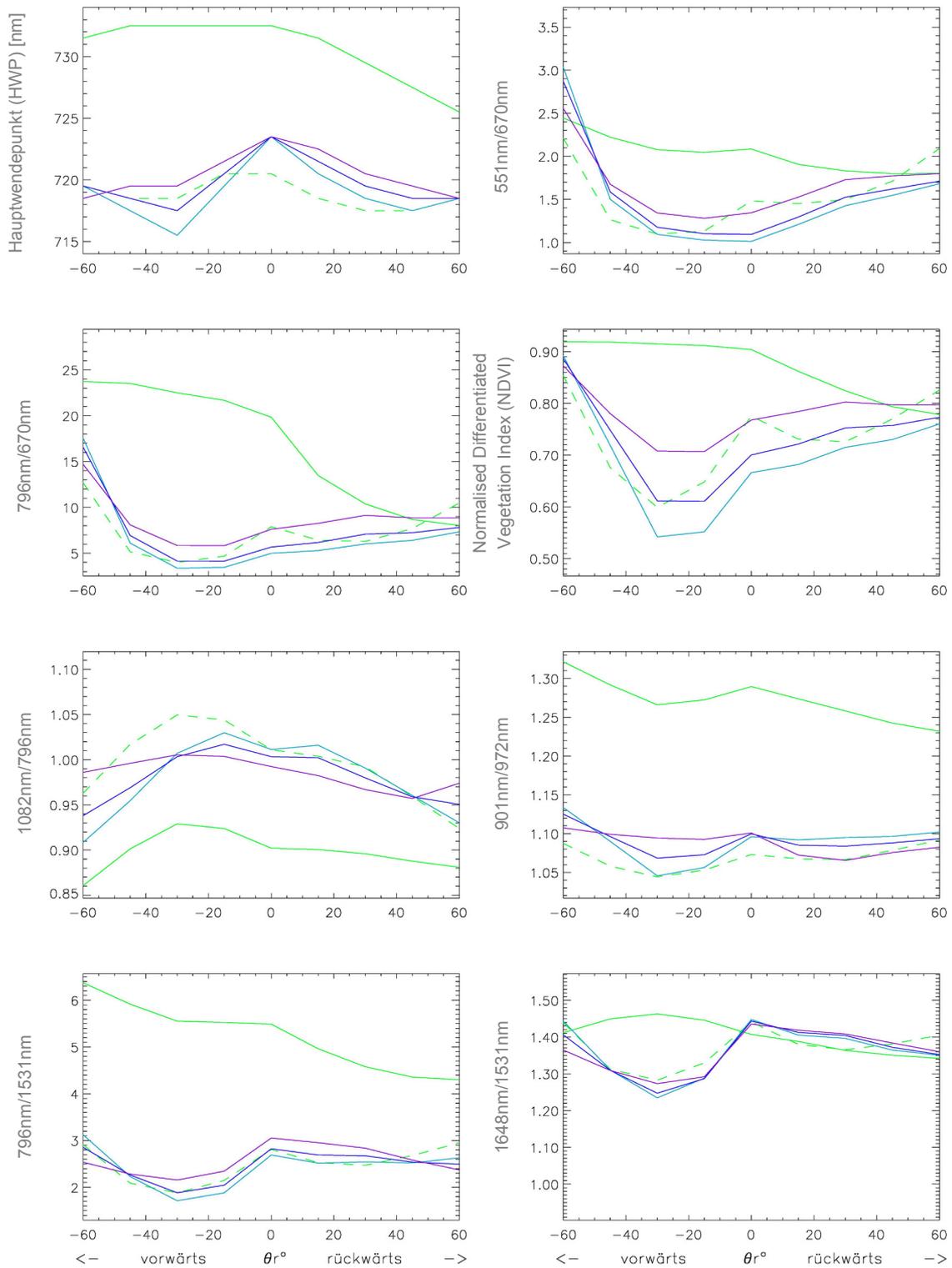
- B1**    **Berechnung der ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion parallel zur Sonnenhauptebene ( $\varphi^\circ$ :  $0^\circ$  /  $180^\circ$ )**



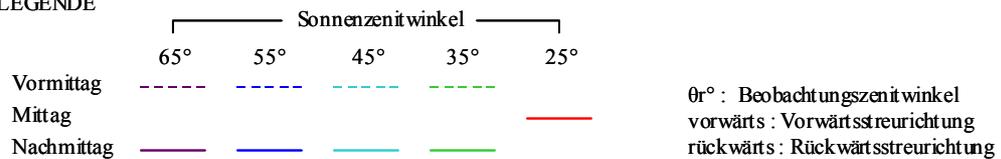
LEGENDE



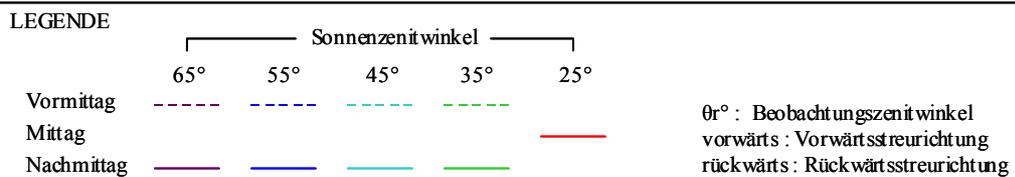
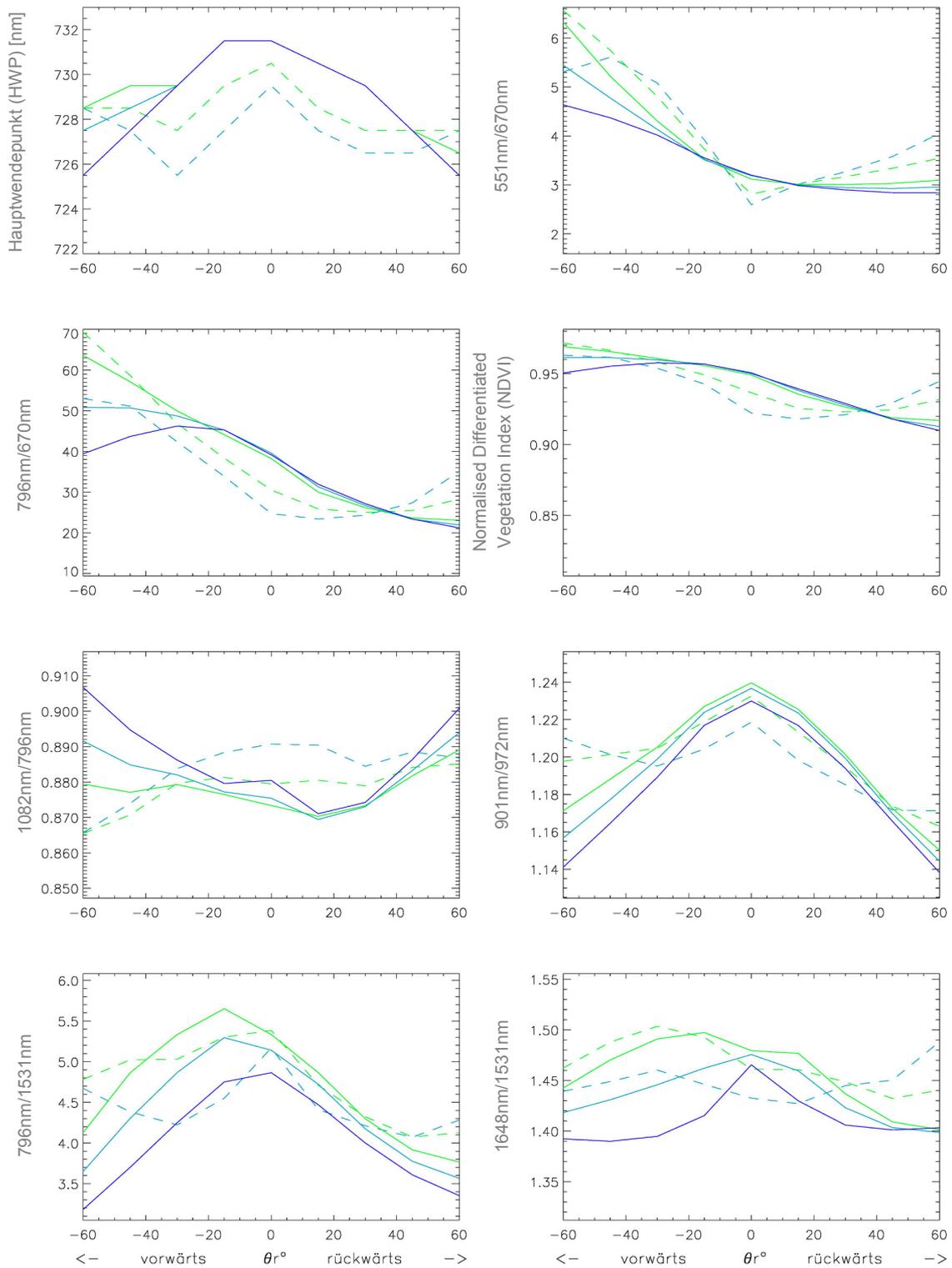
**Abbildung 98.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC30 in der Vegetationsperiode 2000.



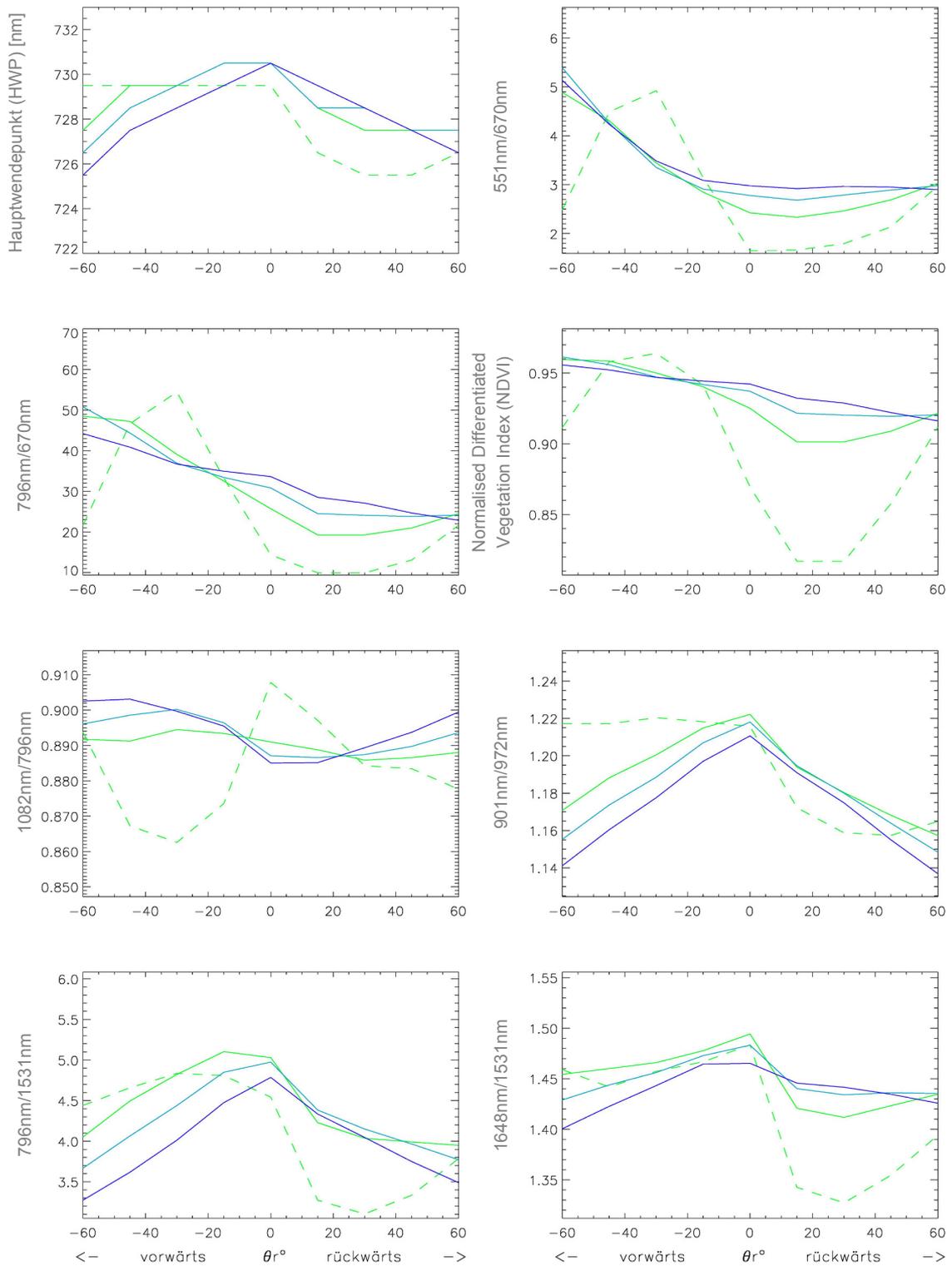
LEGENDE



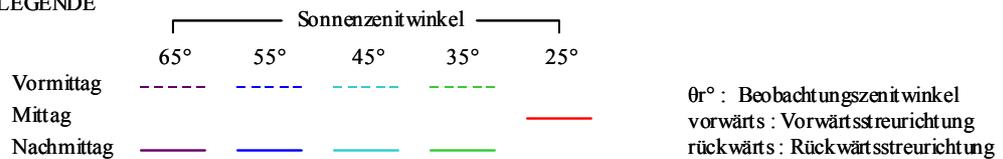
**Abbildung 99.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC30 in der Vegetationsperiode 2000.



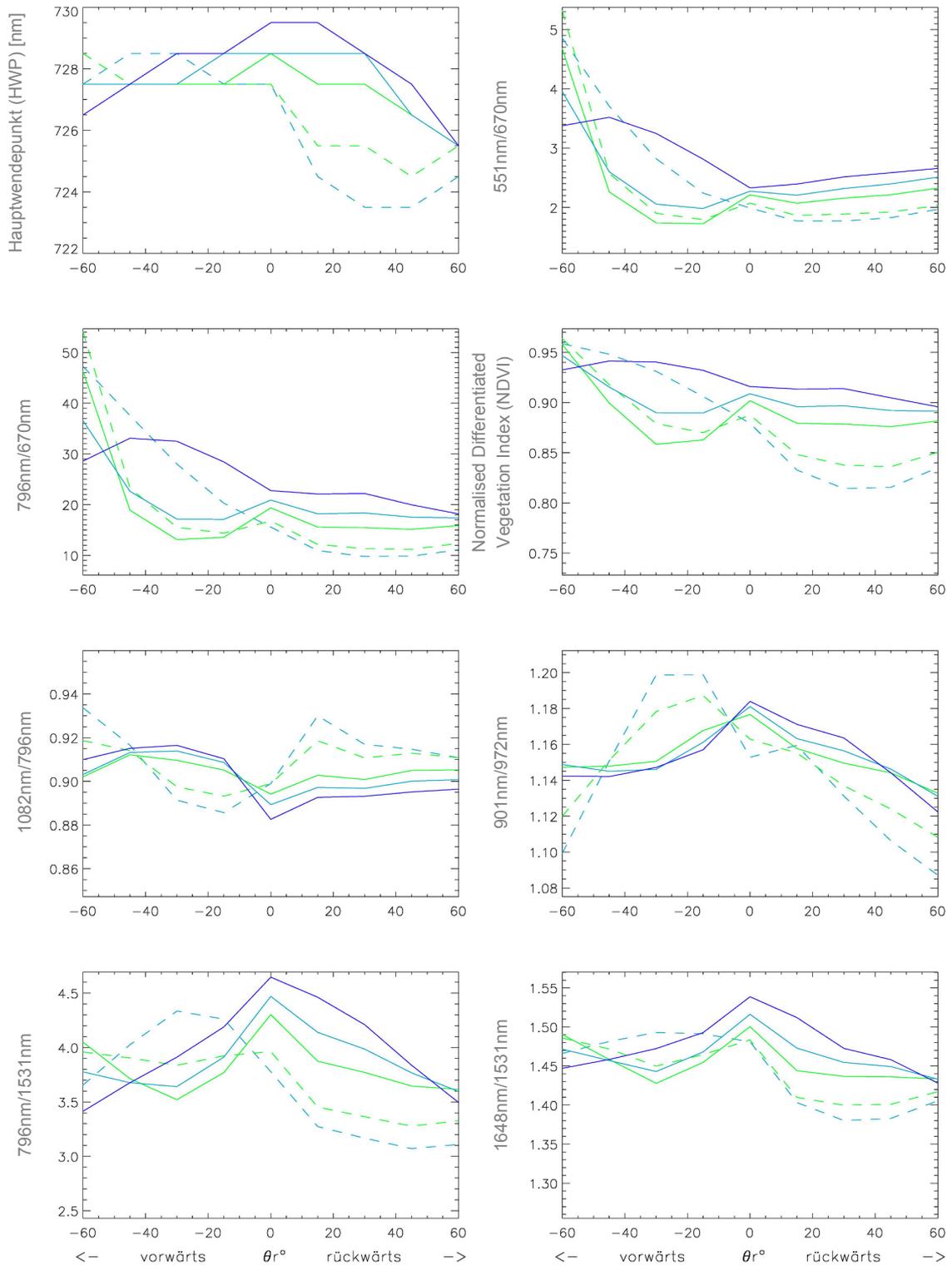
**Abbildung 100.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungswinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC32 in der Vegetationsperiode 2000.



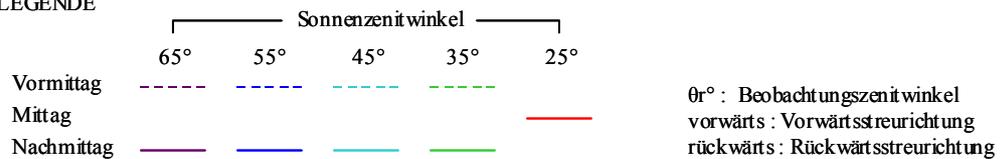
LEGENDE



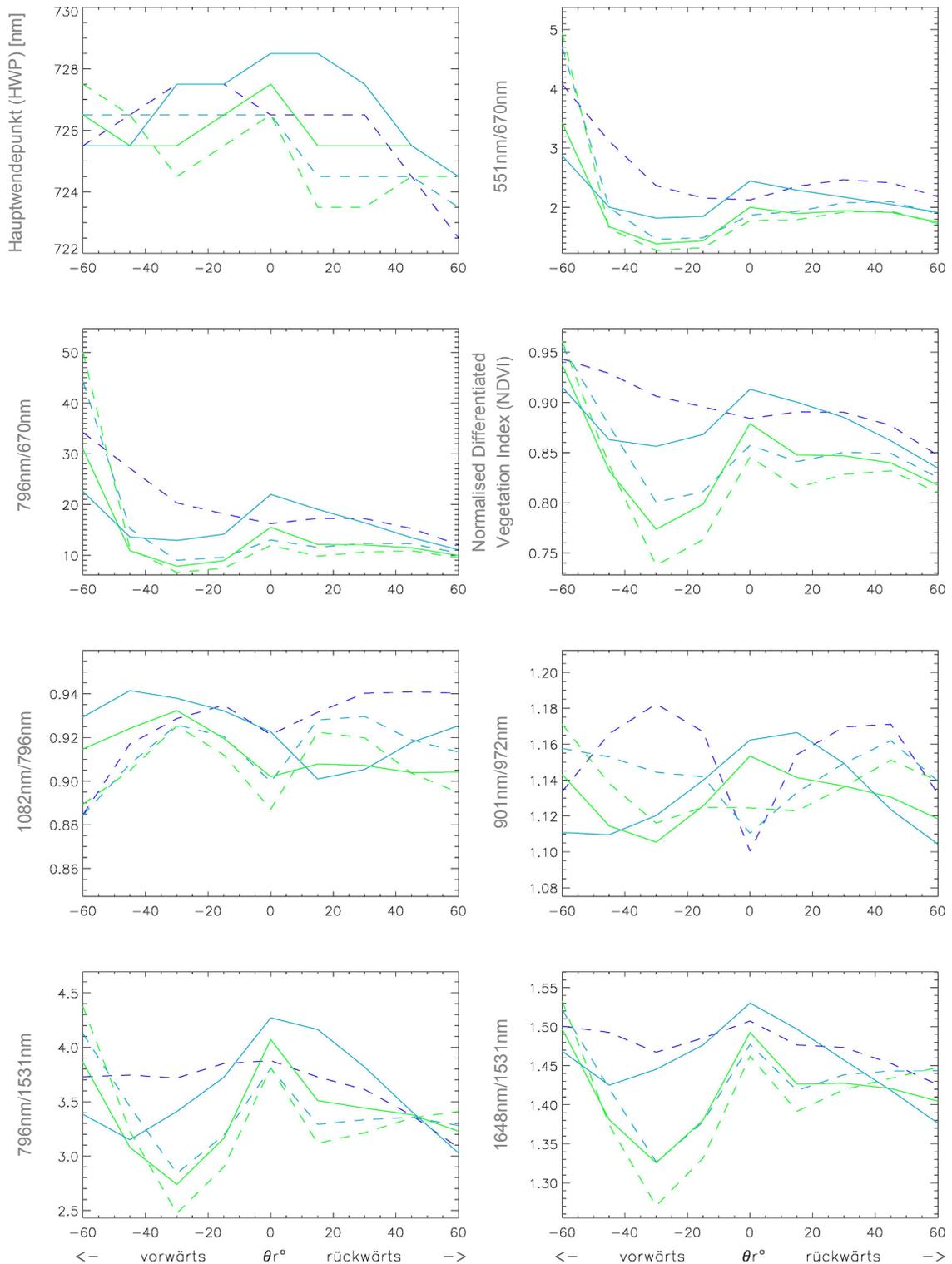
**Abbildung 101.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC32 in der Vegetationsperiode 2000.



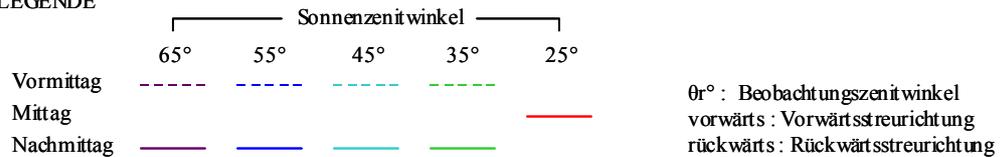
LEGENDE



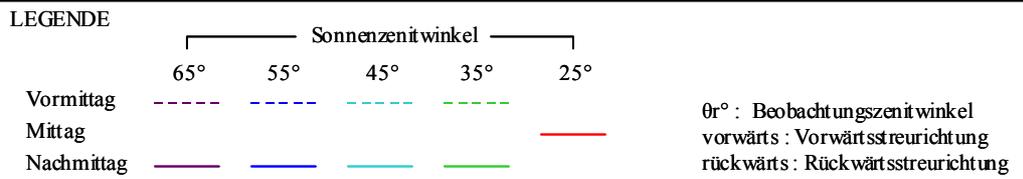
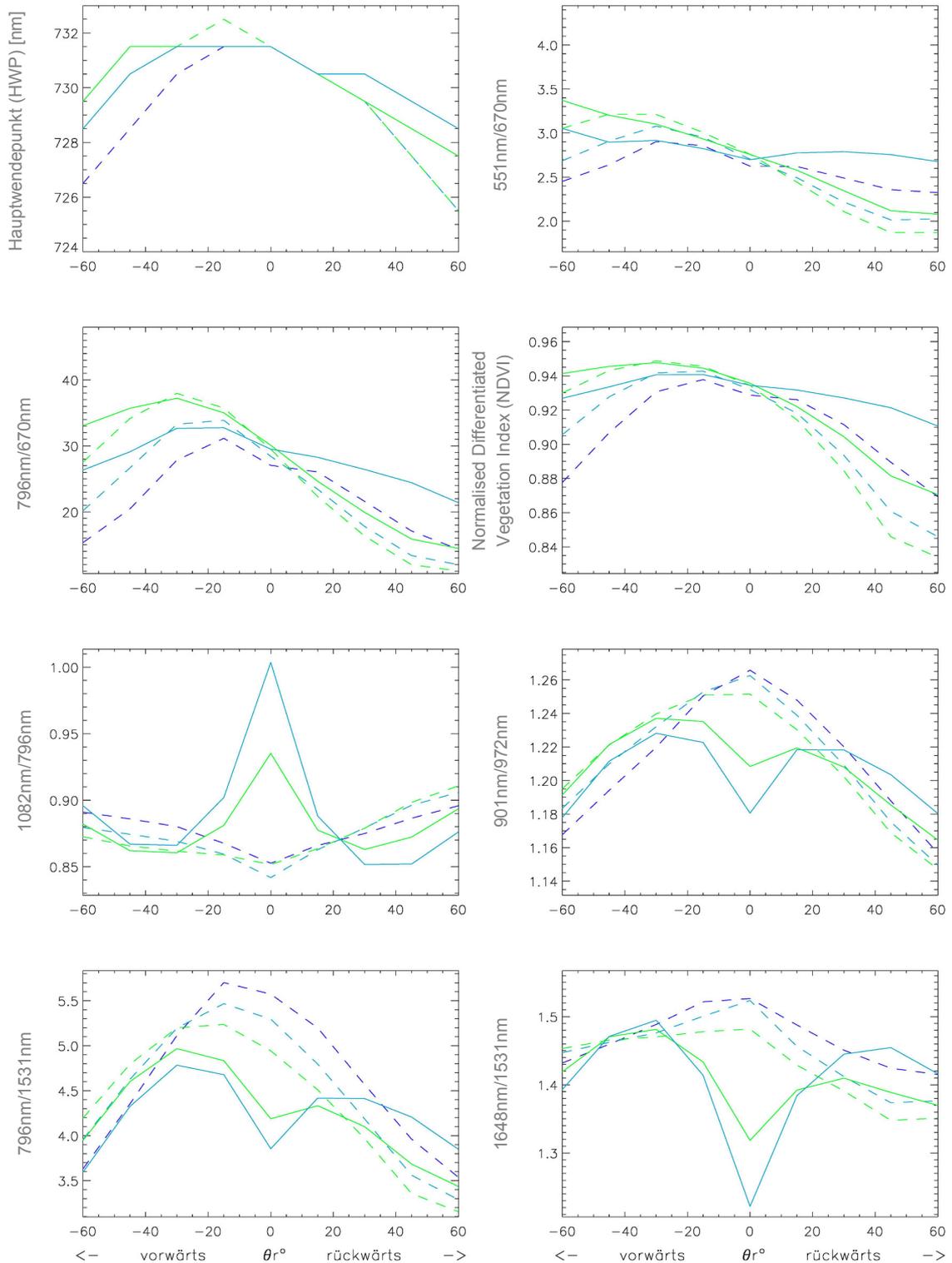
**Abbildung 102.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszentwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC32 in der Vegetationsperiode 2001.



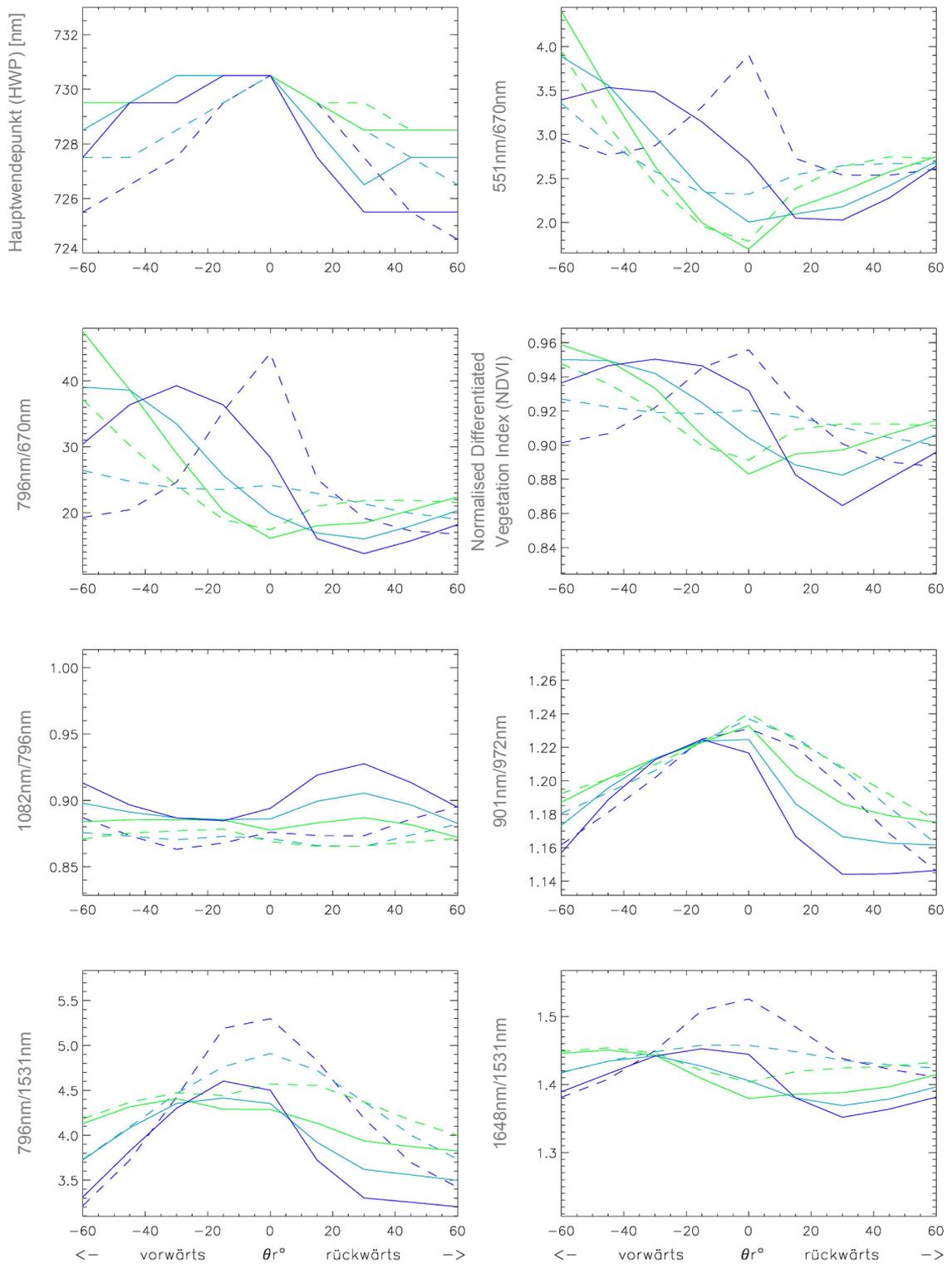
LEGENDE



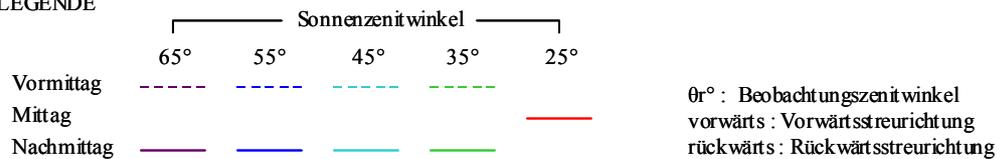
**Abbildung 103.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungsenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC32 in der Vegetationsperiode 2001.



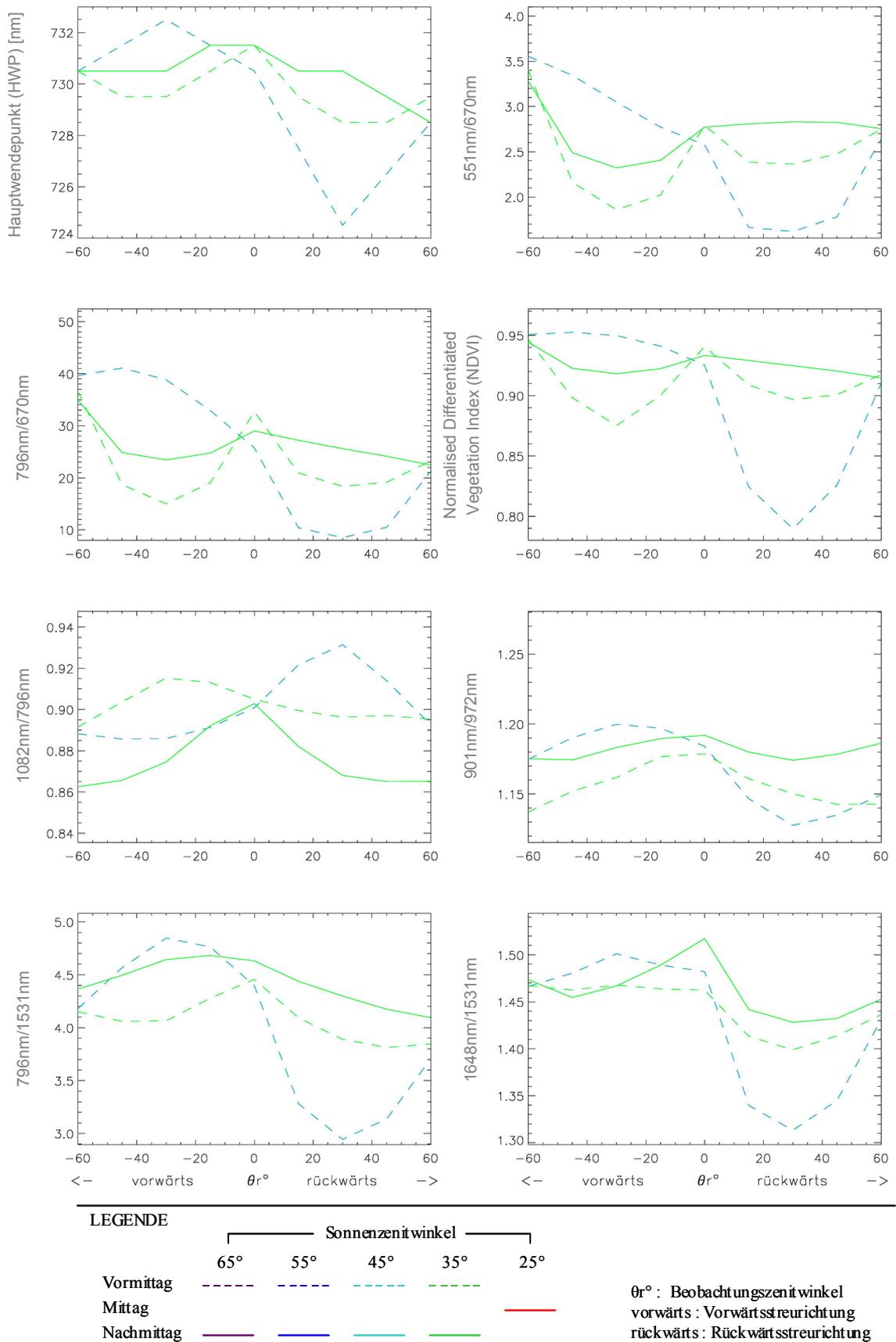
**Abbildung 104.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungswinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC39 in der Vegetationsperiode 2000.



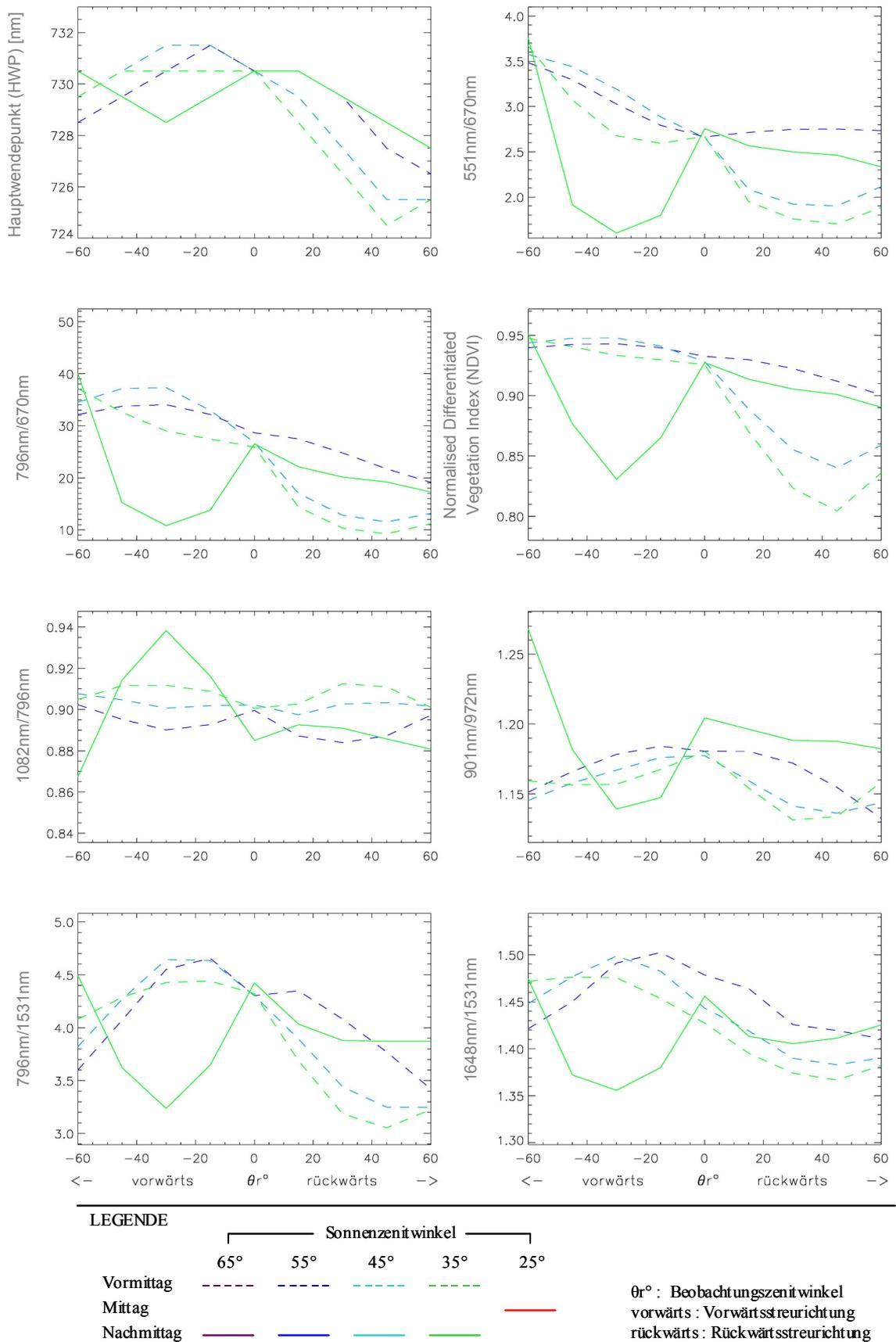
LEGENDE



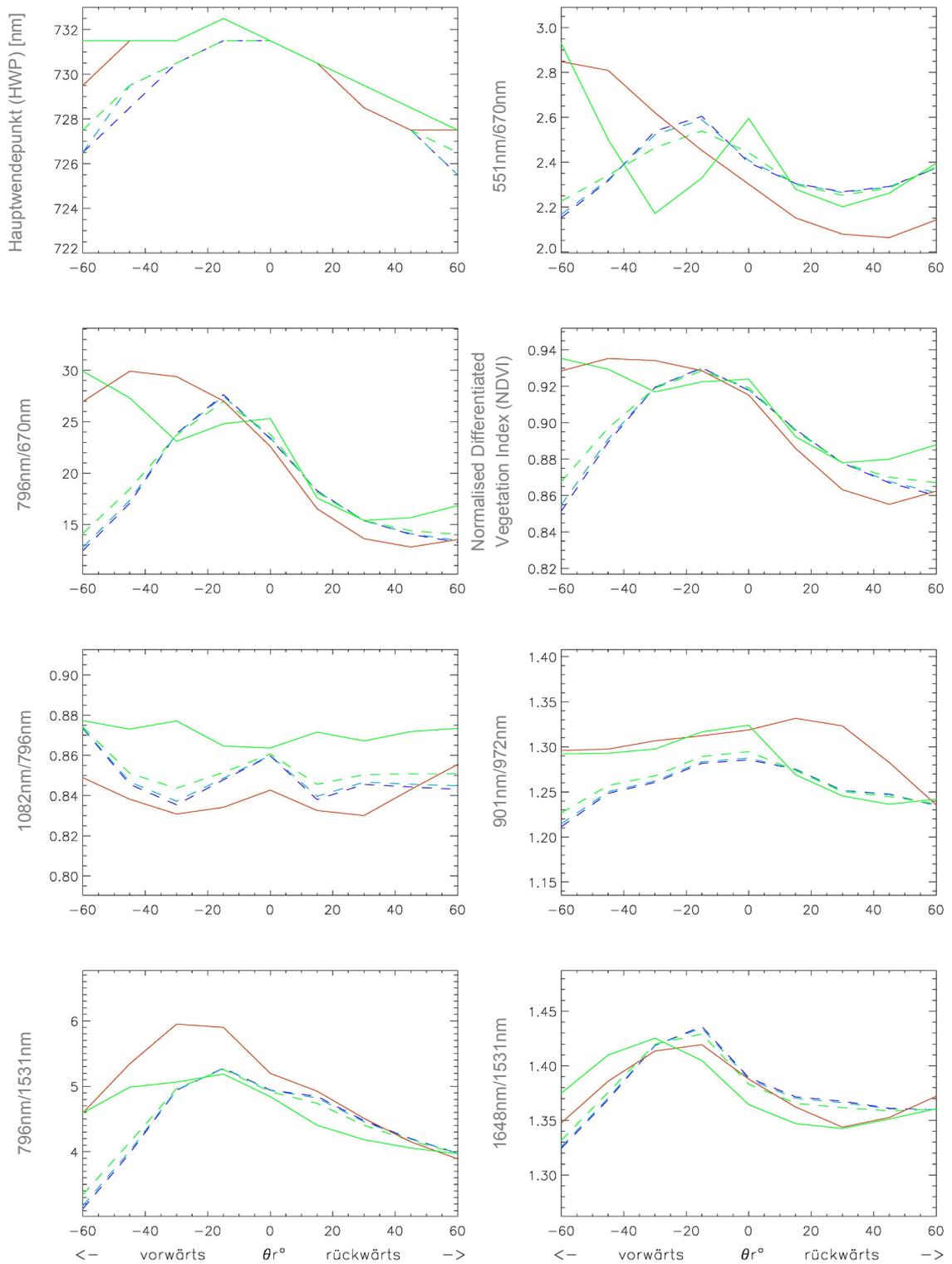
**Abbildung 105.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC39 in der Vegetationsperiode 2000.



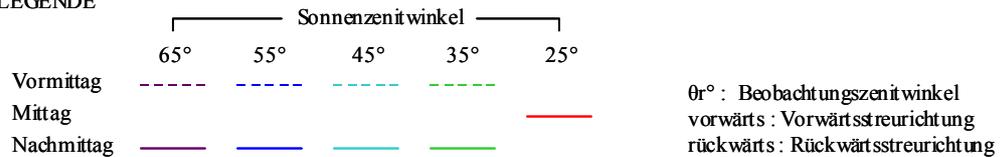
**Abbildung 106.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungsenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC39 in der Vegetationsperiode 2001.



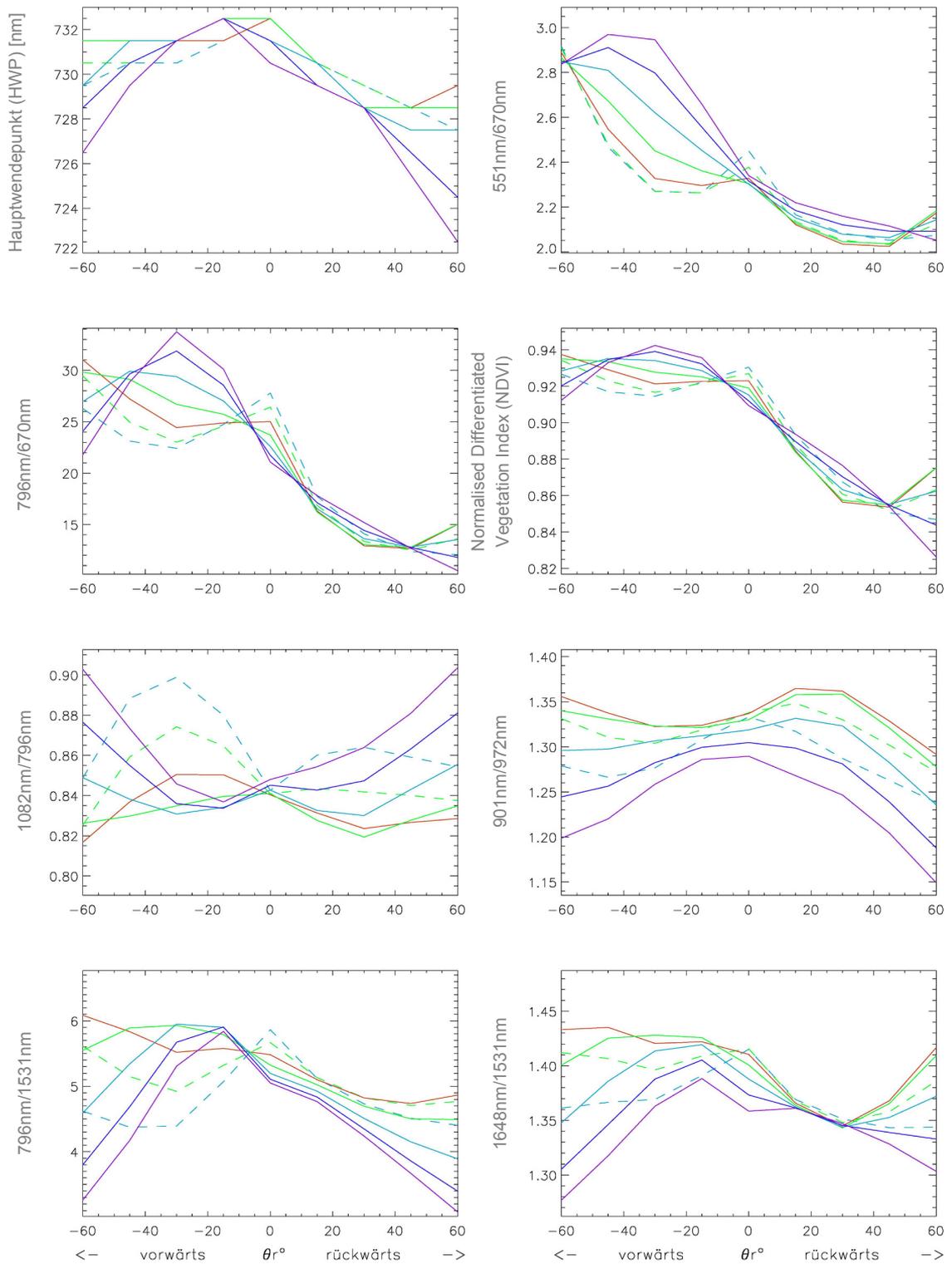
**Abbildung 107.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungsenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC39 in der Vegetationsperiode 2001.



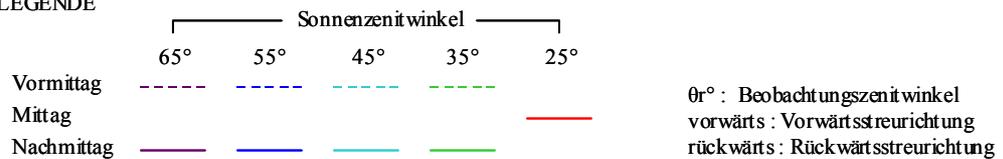
LEGENDE



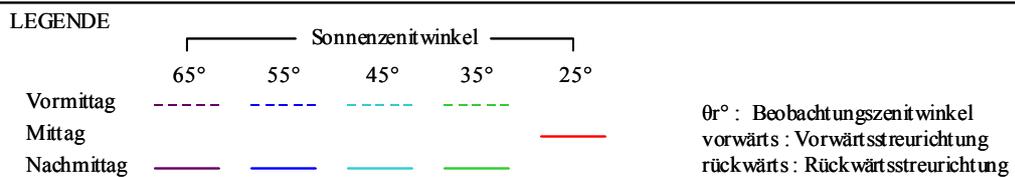
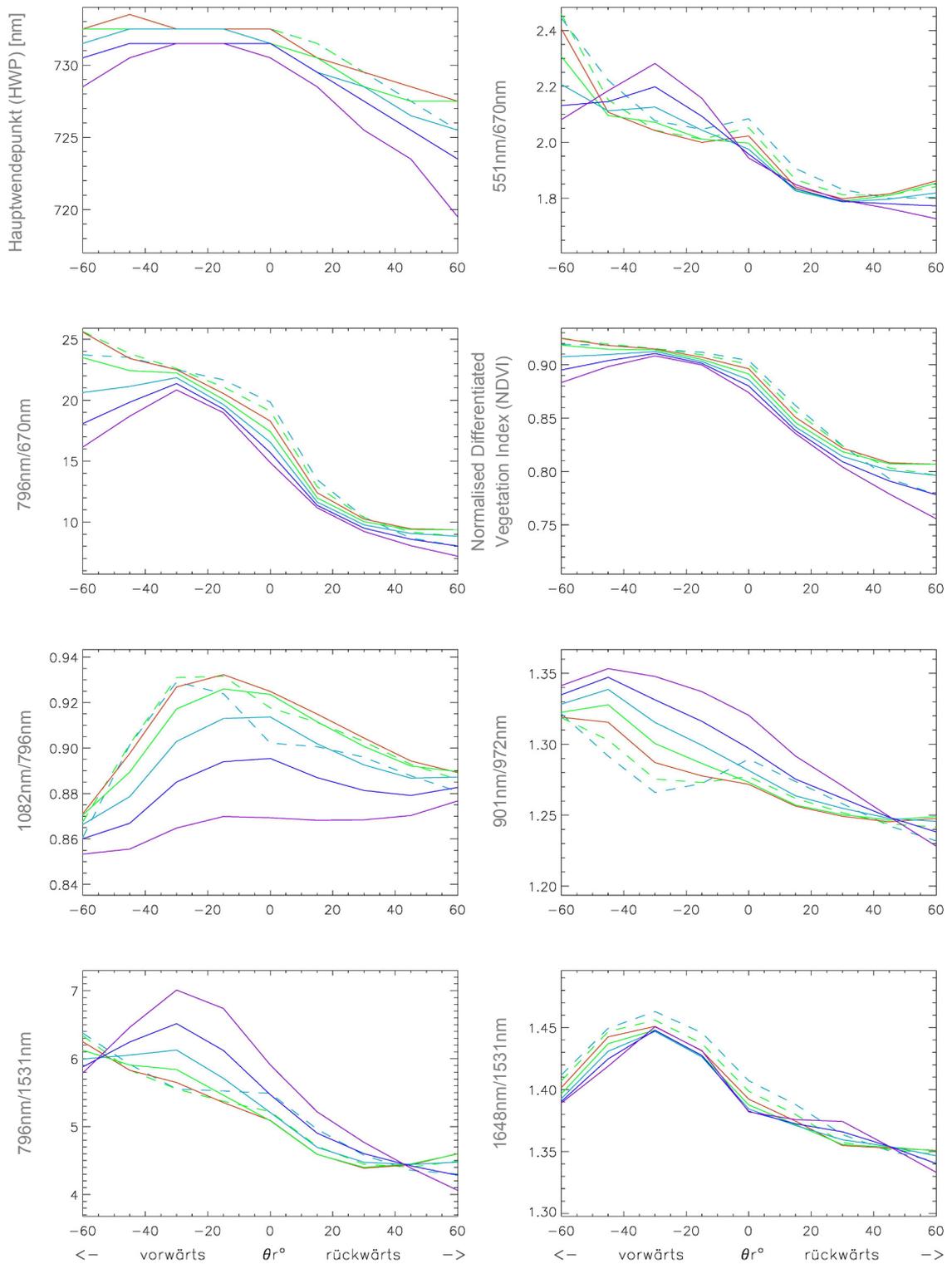
**Abbildung 108.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszentwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC51 in der Vegetationsperiode 2000.



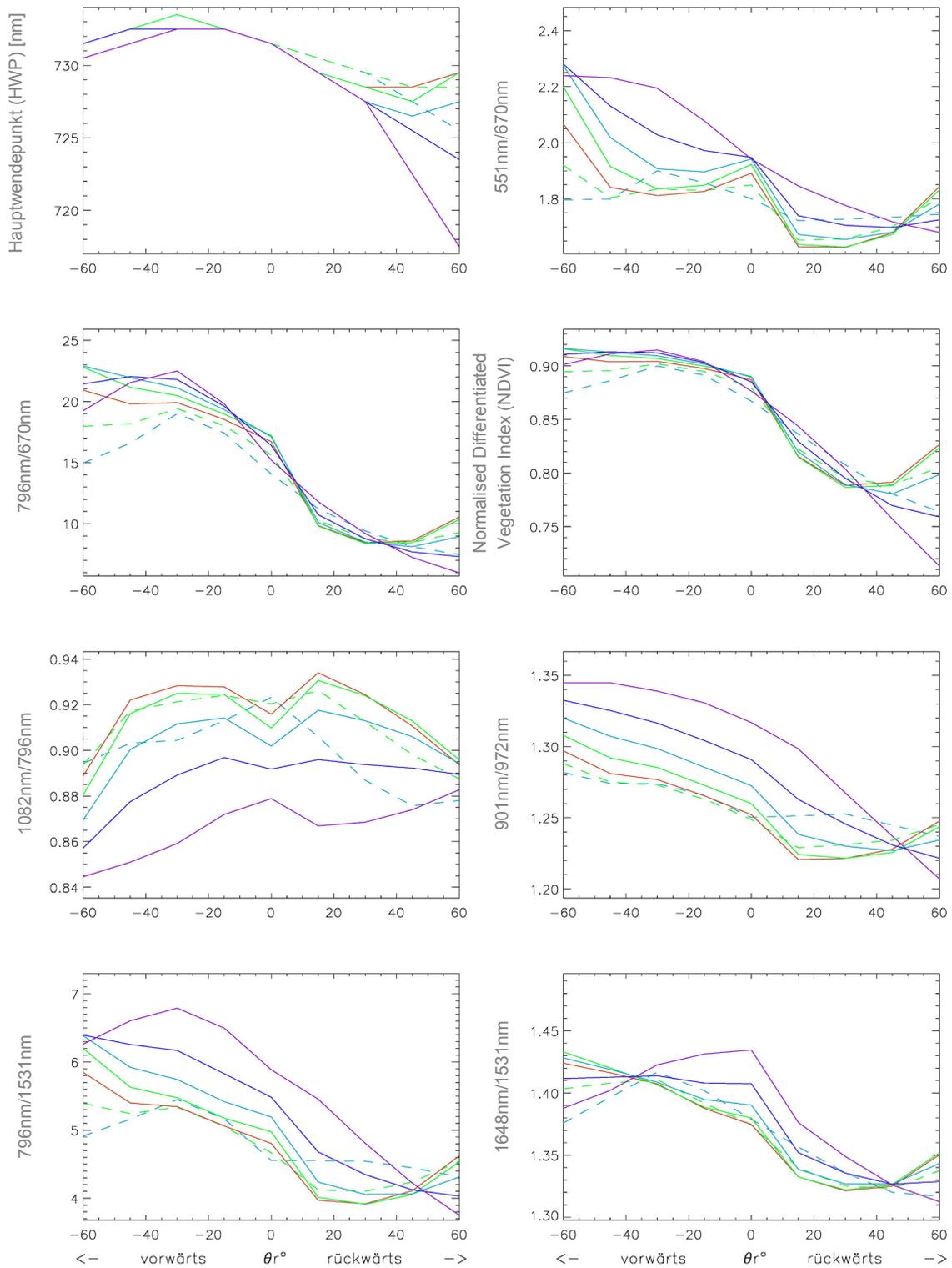
LEGENDE



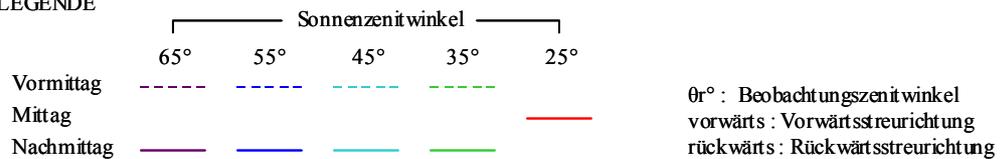
**Abbildung 109.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC51 in der Vegetationsperiode 2000.



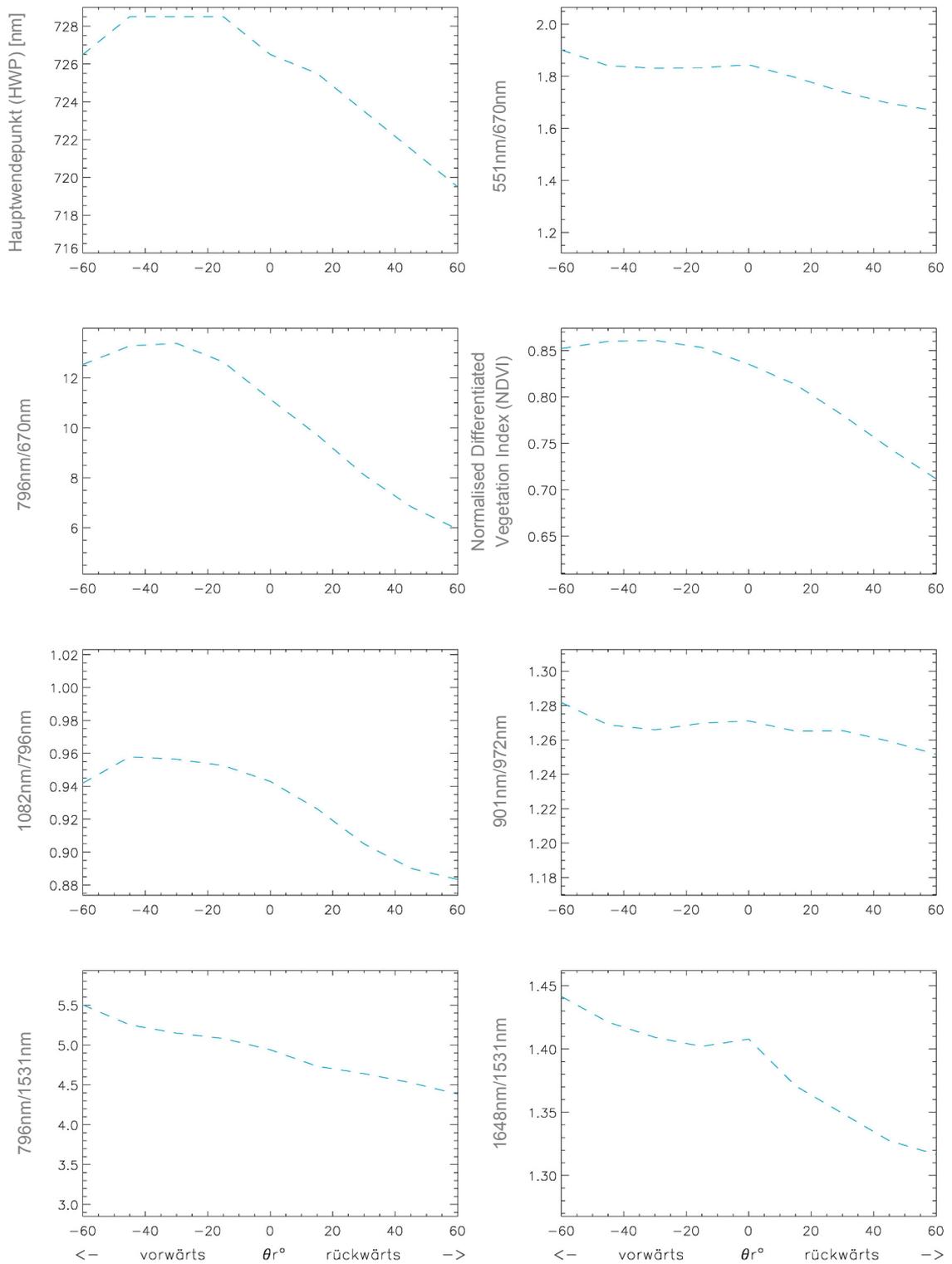
**Abbildung 110.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC65 in der Vegetationsperiode 2000.



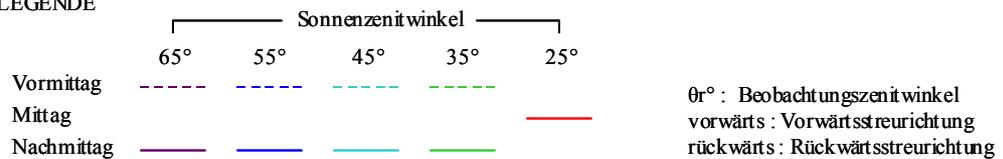
LEGENDE



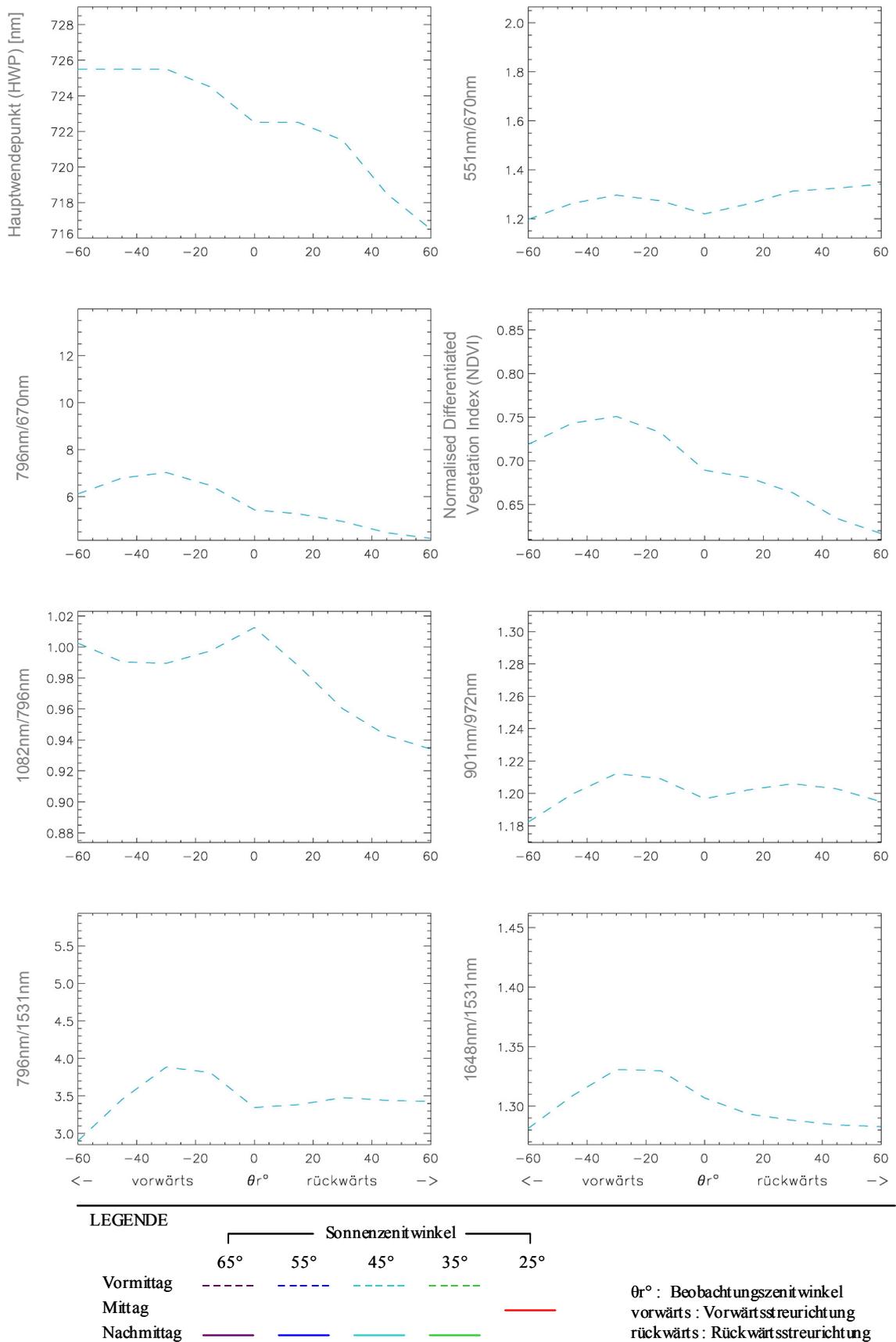
**Abbildung 111.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC65 in der Vegetationsperiode 2000.



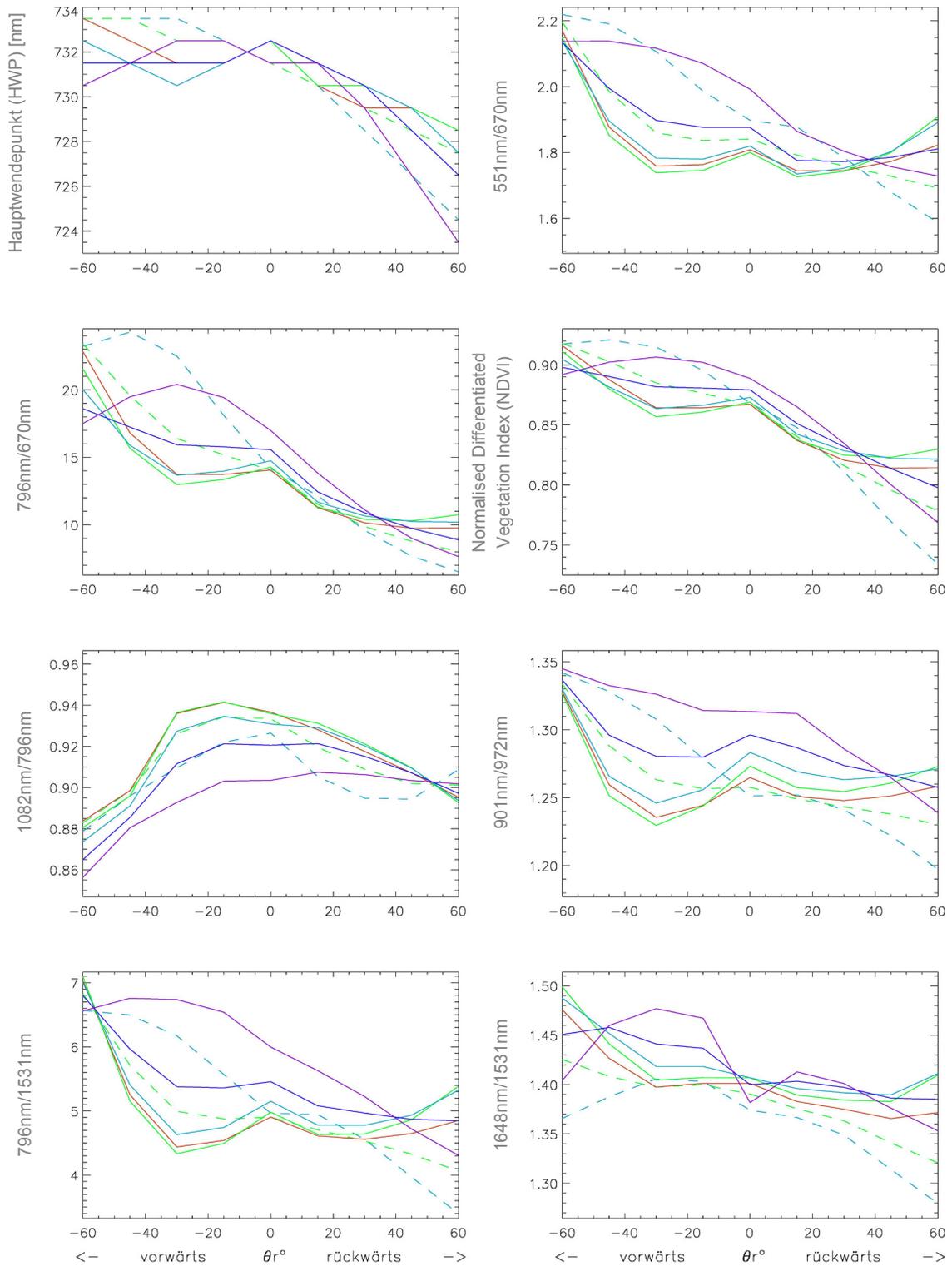
LEGENDE



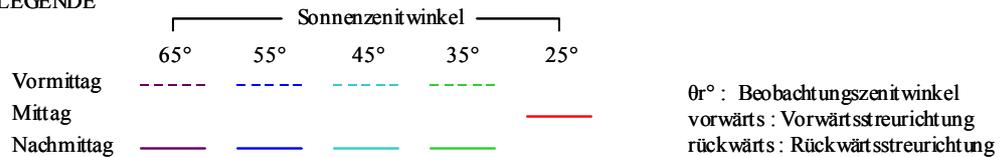
**Abbildung 112.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungswinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC71 in der Vegetationsperiode 2000.



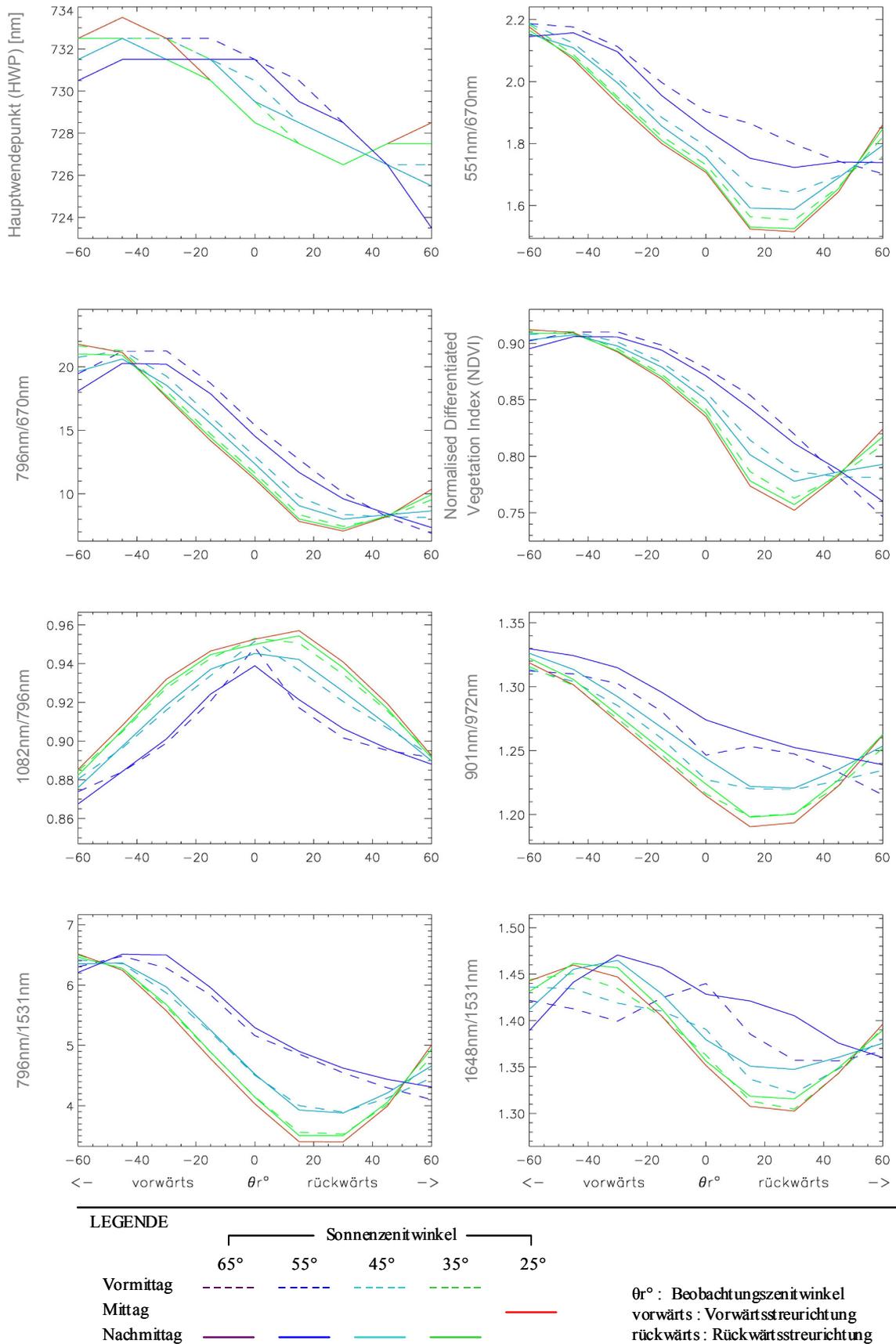
**Abbildung 113.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungsenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC71 in der Vegetationsperiode 2000.



LEGENDE

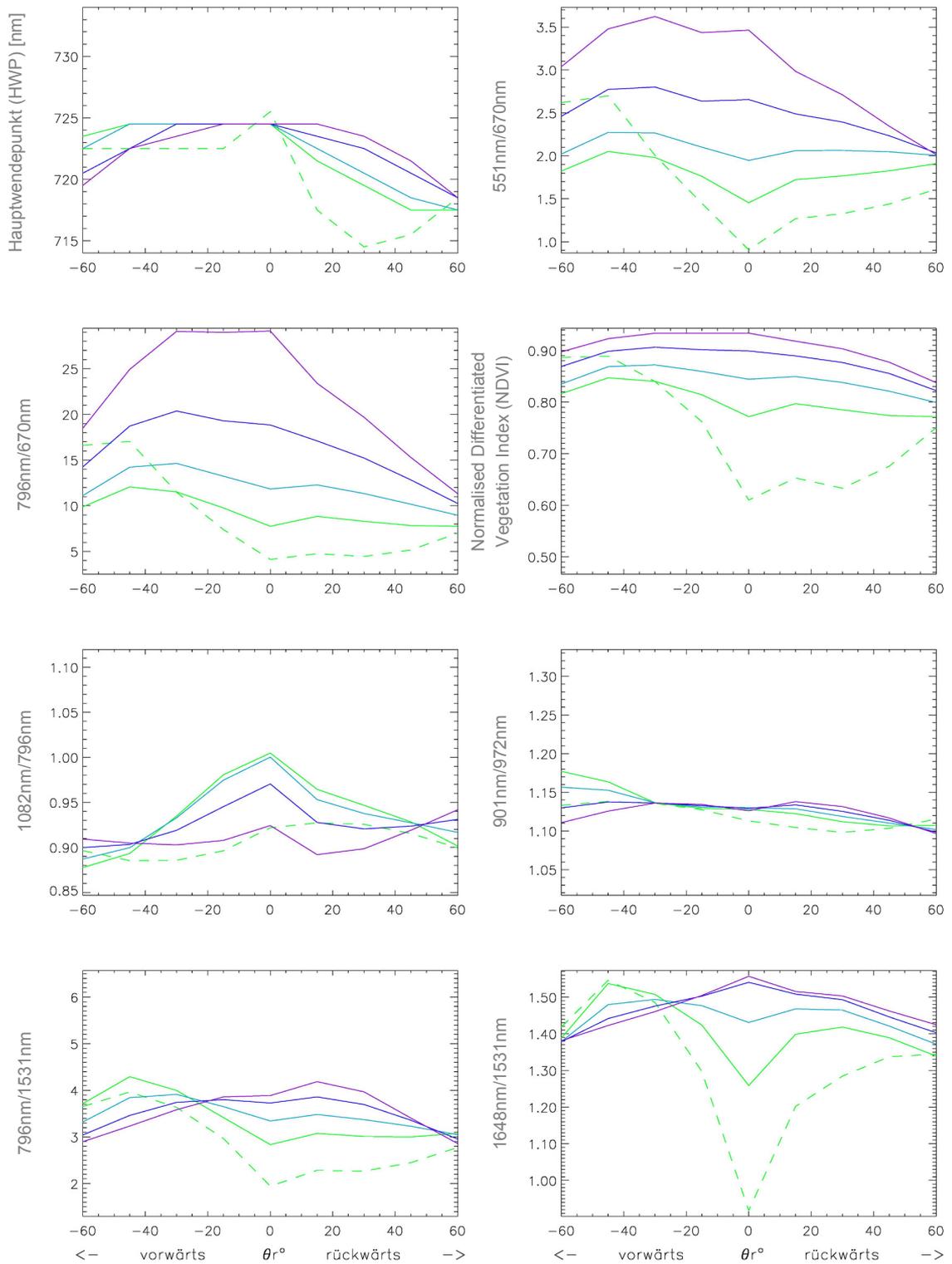


**Abbildung 114.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungswinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC71 in der Vegetationsperiode 2001.

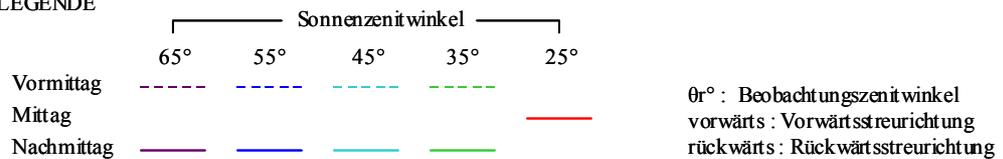


**Abbildung 115.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungswinkel im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC71 in der Vegetationsperiode 2001.

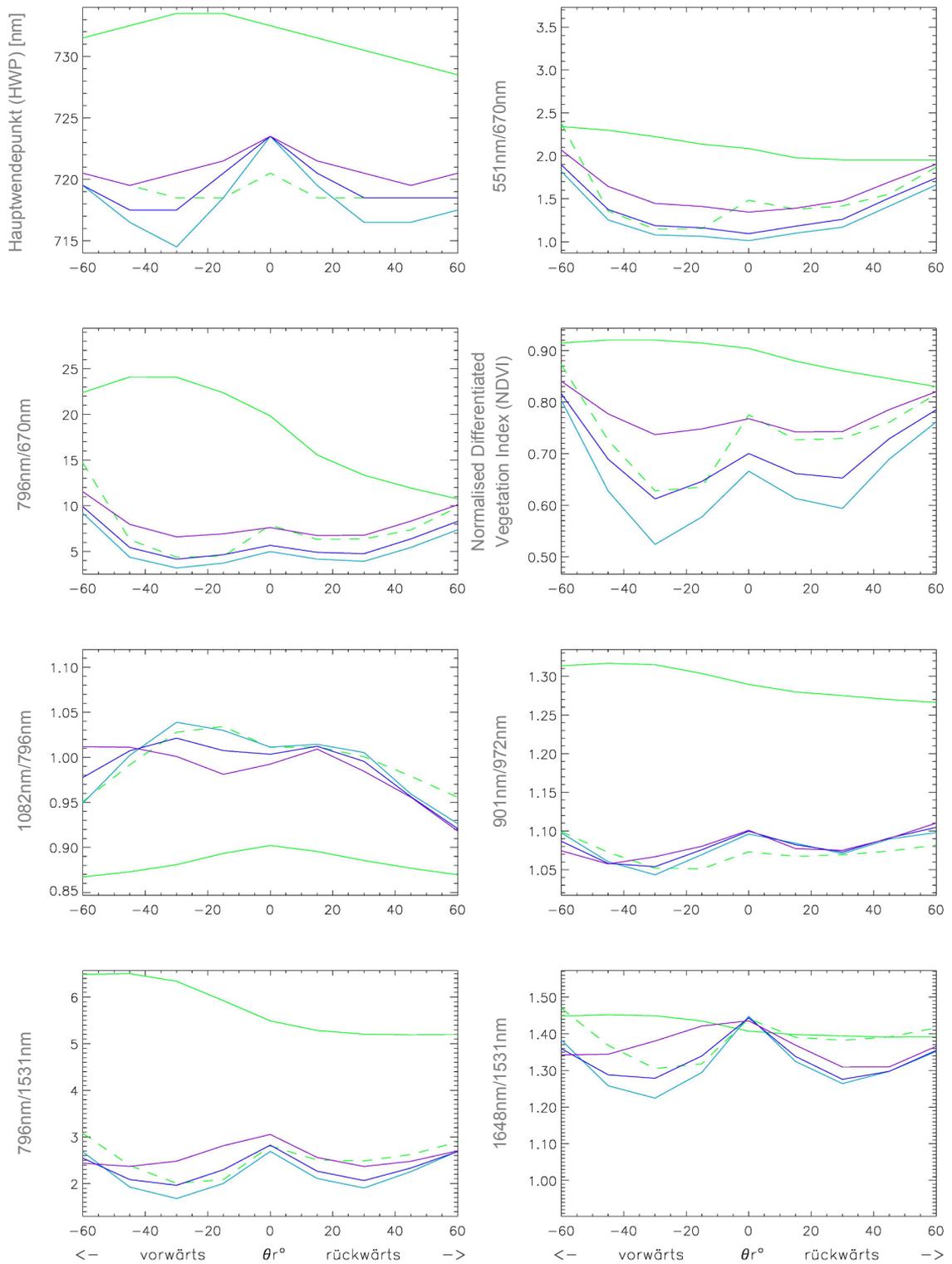
**B2 Berechnung der ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion in der um 45° zur Sonnenhauptebene gedrehte Beobachtungszimutebene ( $\varphi^\circ$ : 45°/225°)**



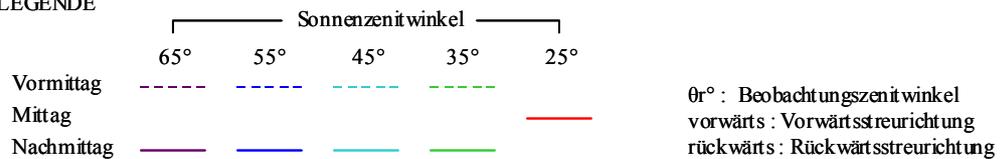
LEGENDE



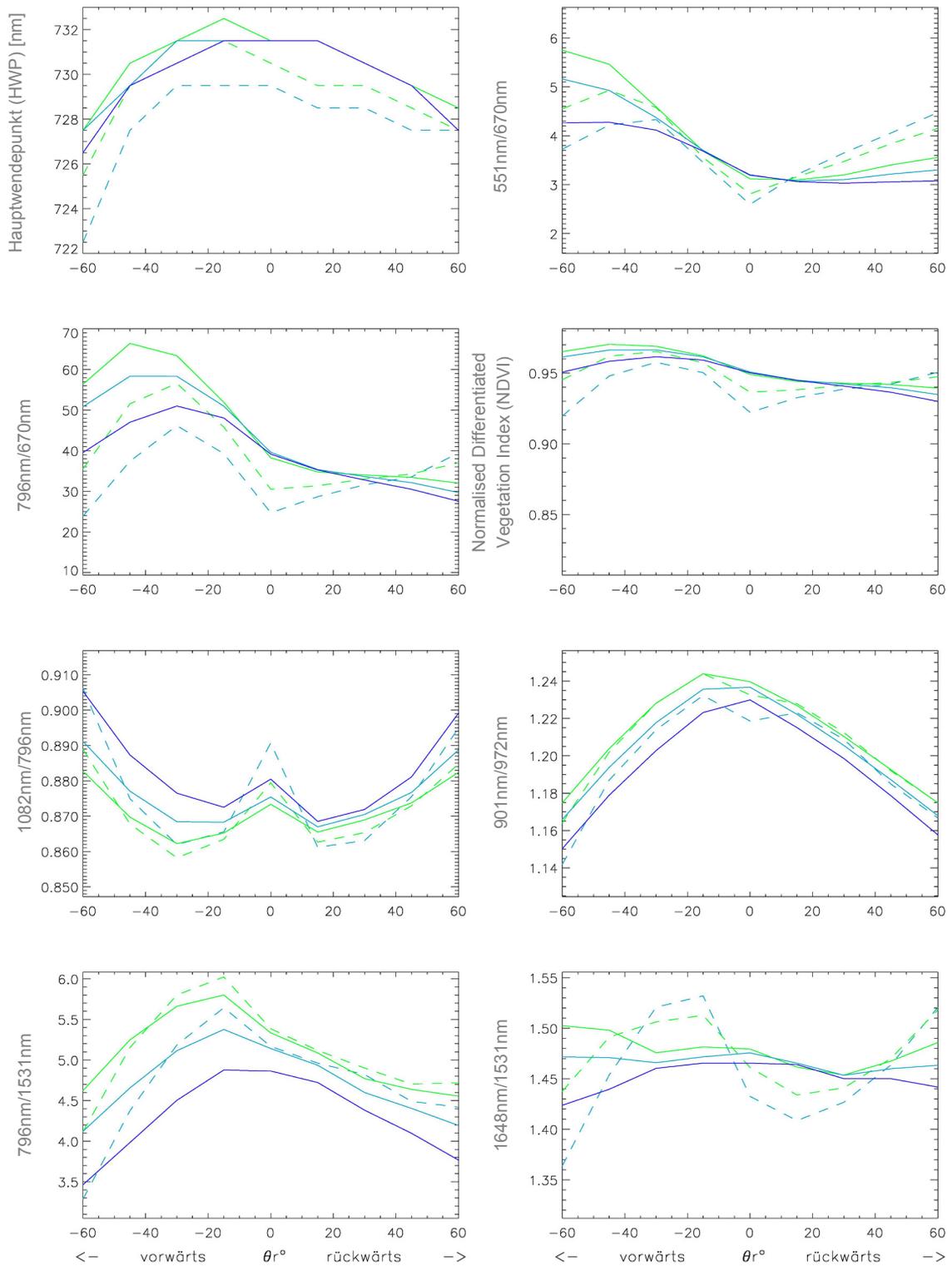
**Abbildung 116.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC30 in der Vegetationsperiode 2000.



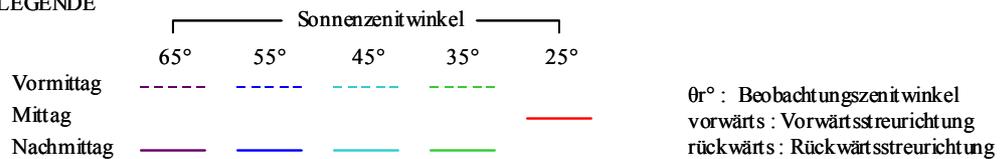
LEGENDE



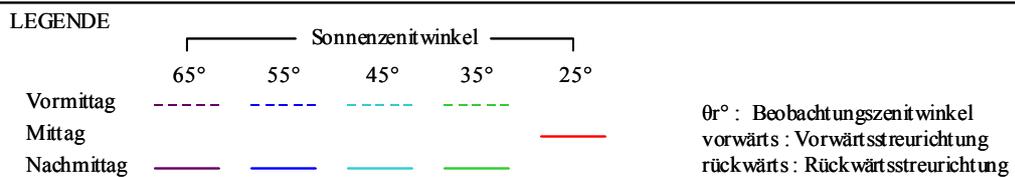
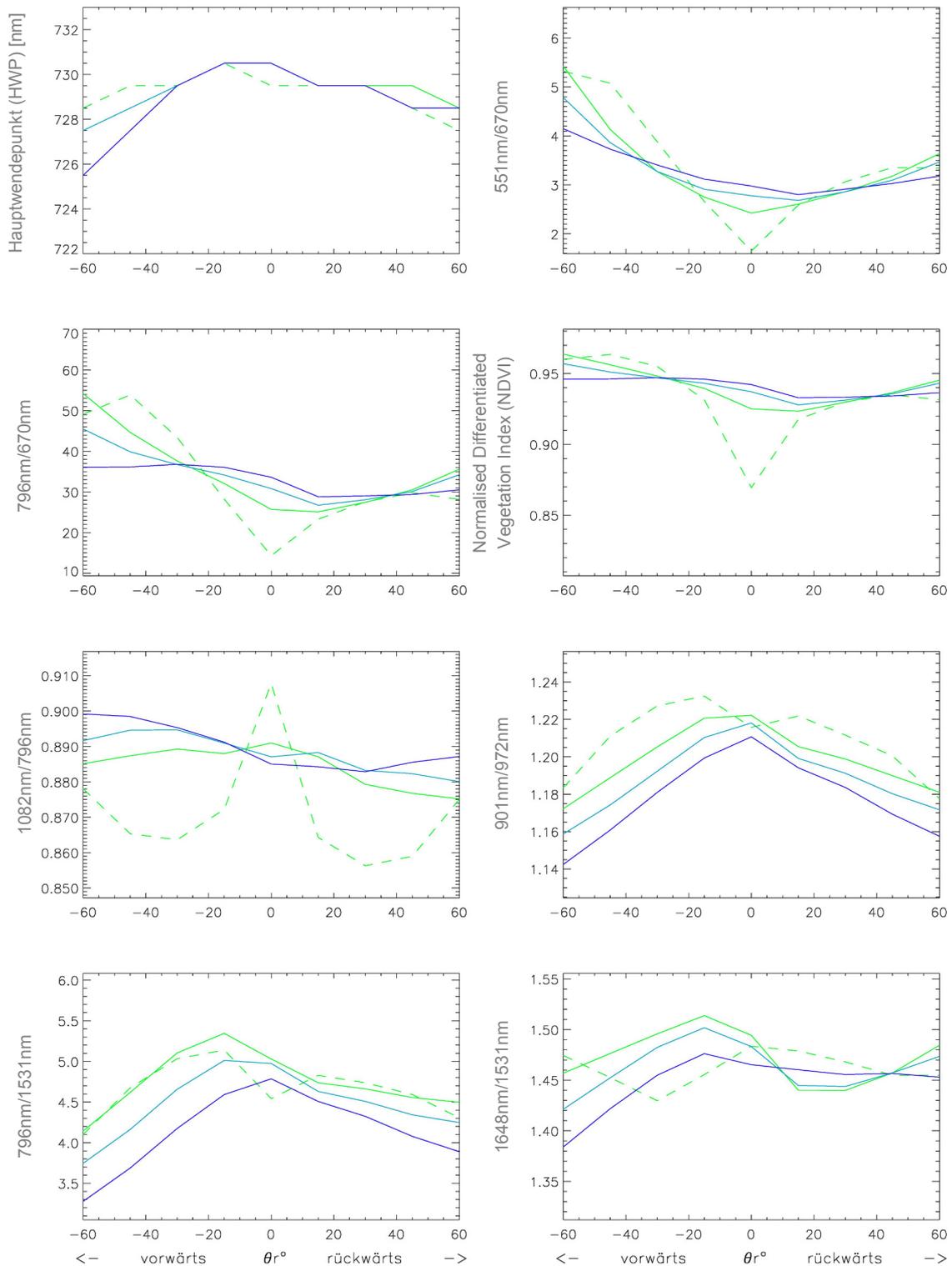
**Abbildung 117.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC30 in der Vegetationsperiode 2000.



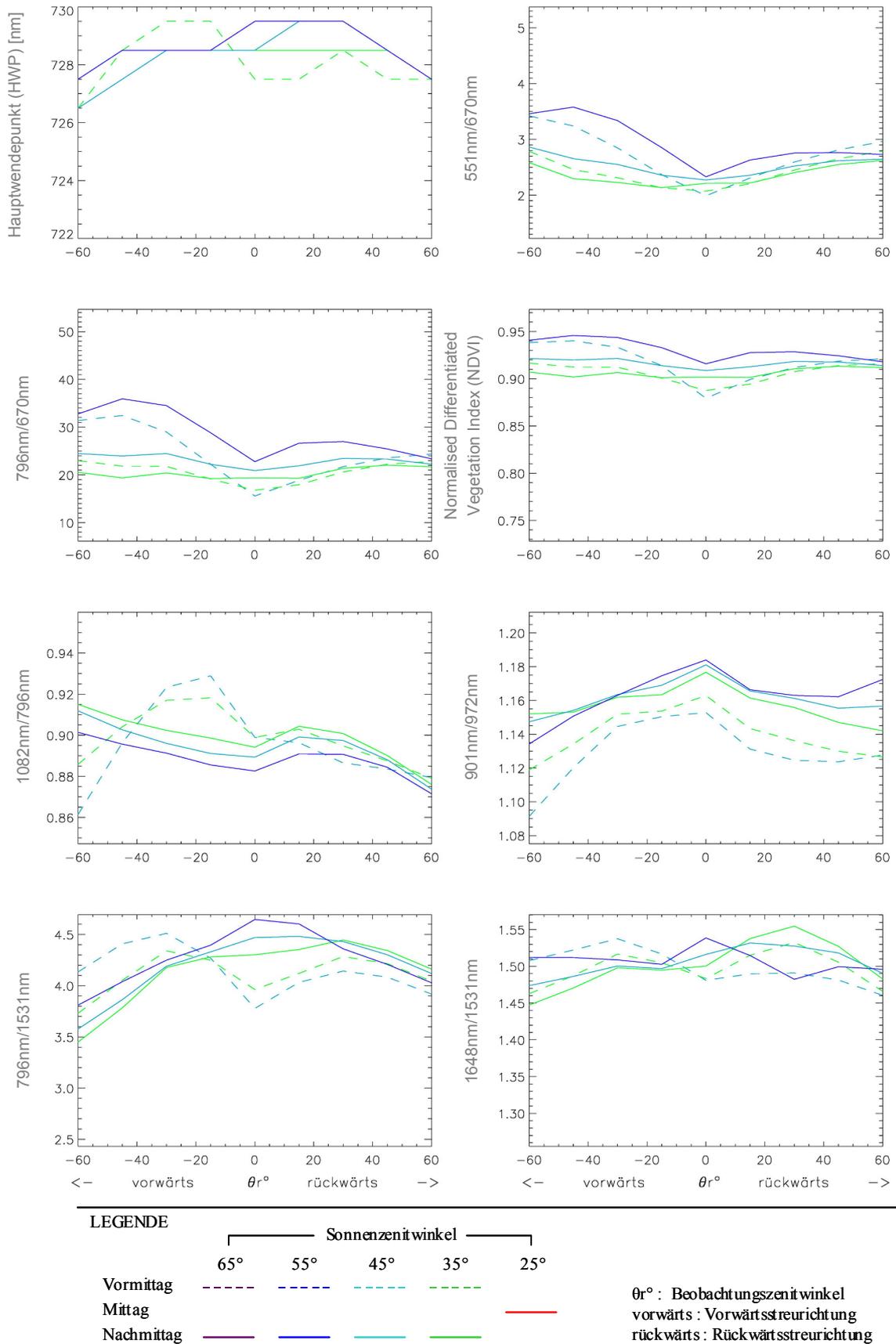
LEGENDE



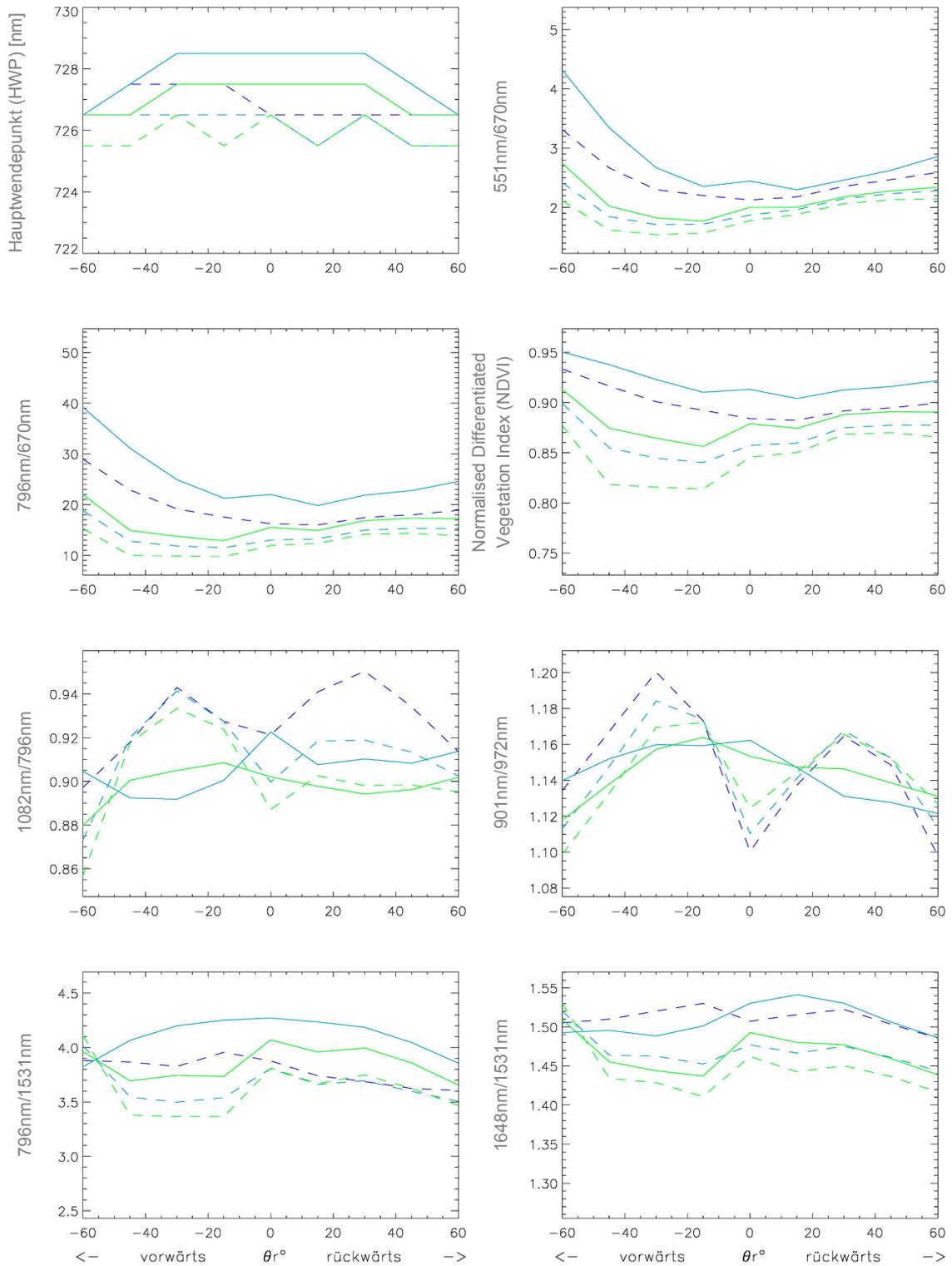
**Abbildung 118.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC32 in der Vegetationsperiode 2000.



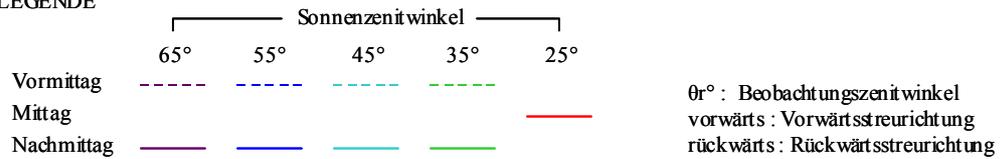
**Abbildung 119.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC32 in der Vegetationsperiode 2000.



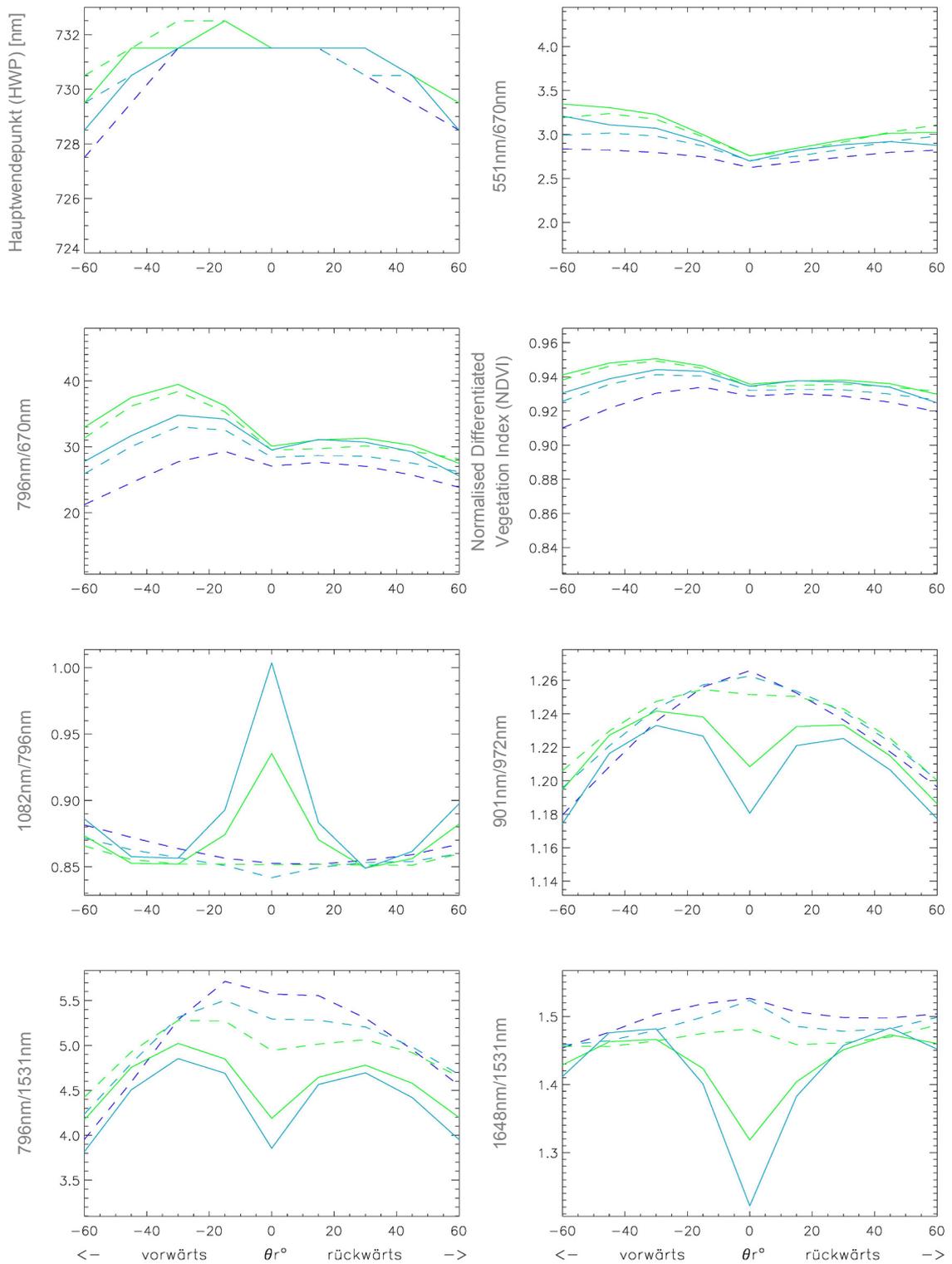
**Abbildung 120.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszentwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC32 in der Vegetationsperiode 2001.



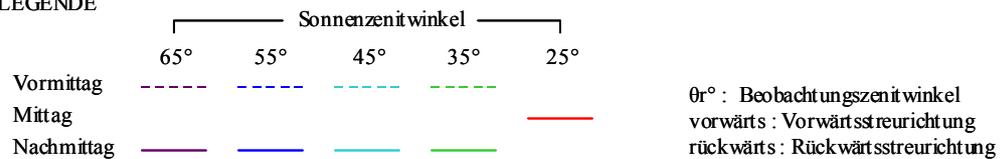
LEGENDE



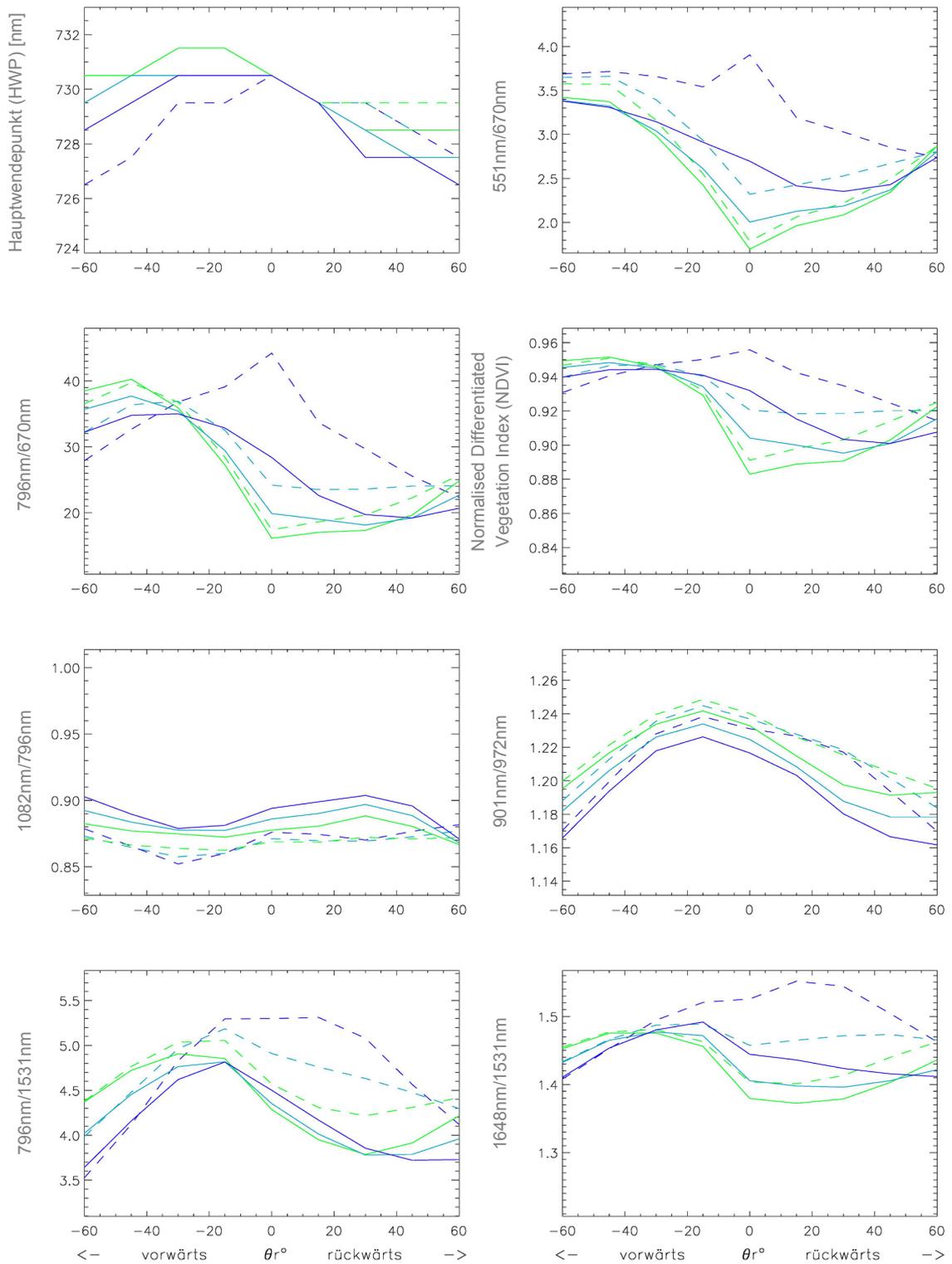
**Abbildung 121.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC32 in der Vegetationsperiode 2001.



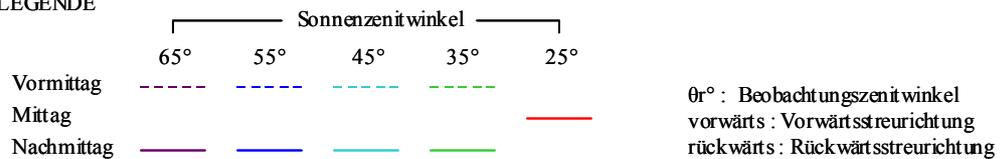
LEGENDE



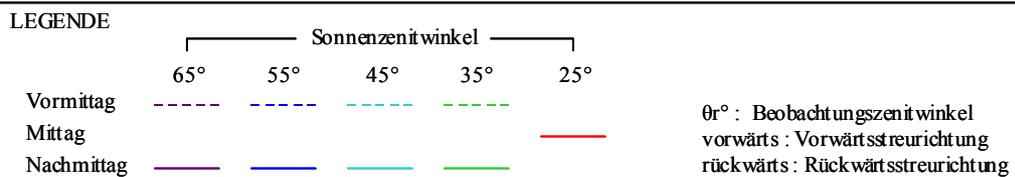
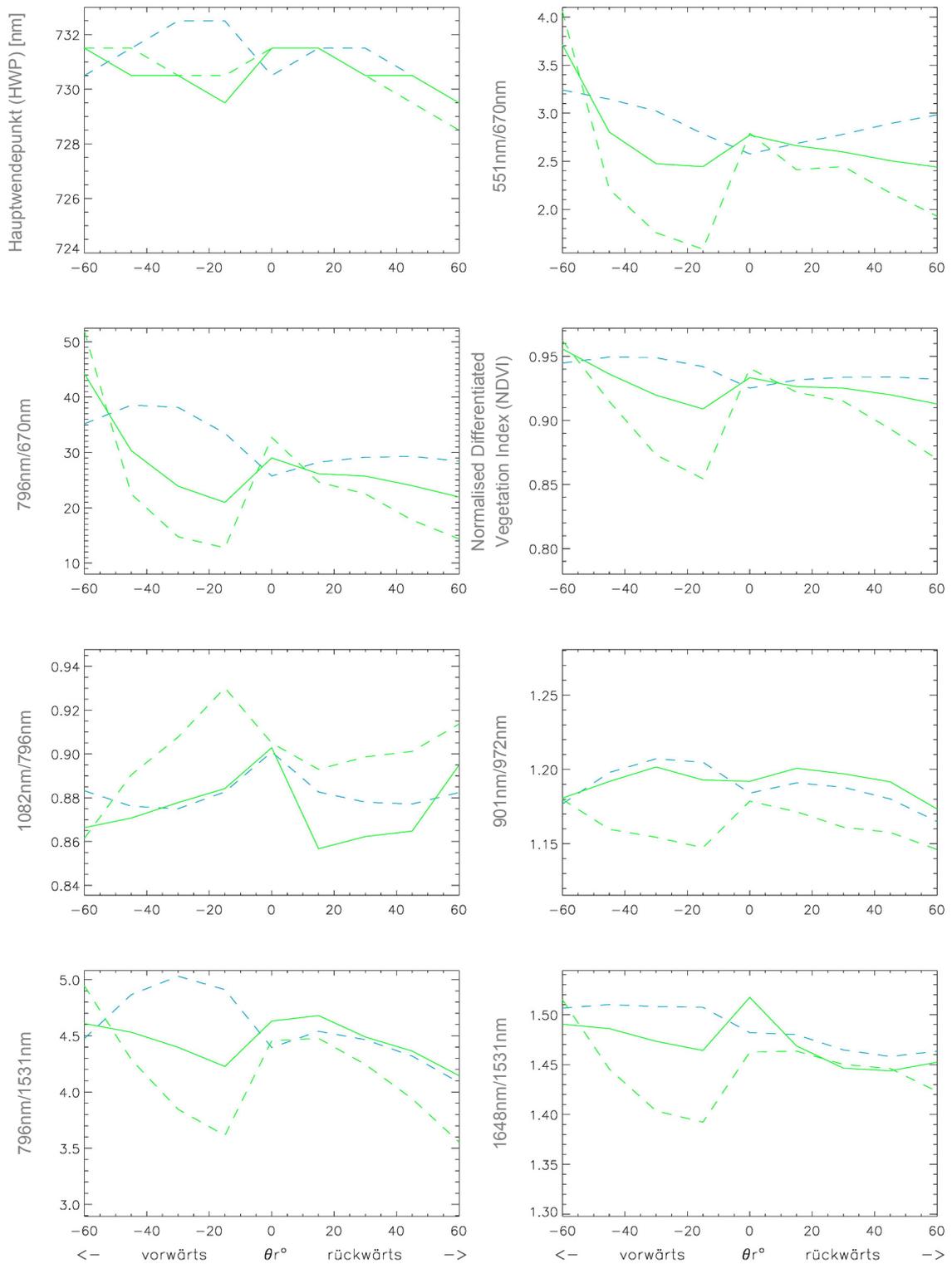
**Abbildung 122.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC39 in der Vegetationsperiode 2000.



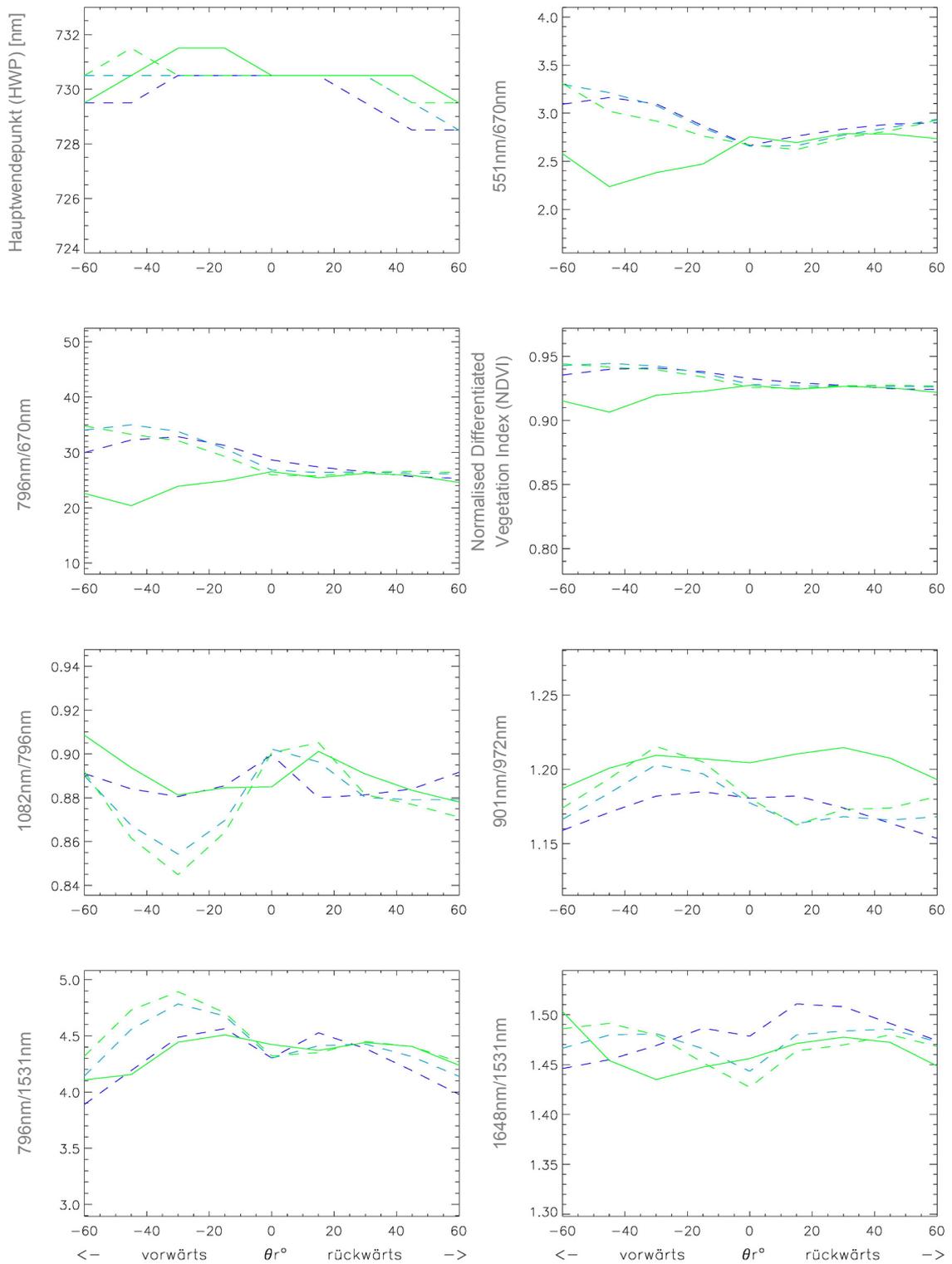
LEGENDE



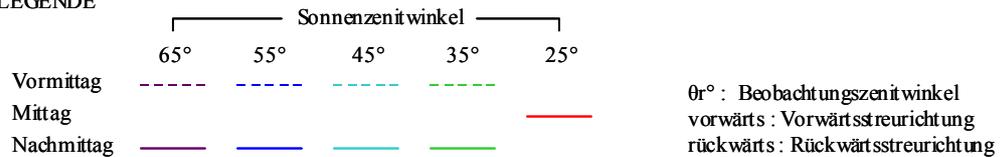
**Abbildung 123.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC39 in der Vegetationsperiode 2000.



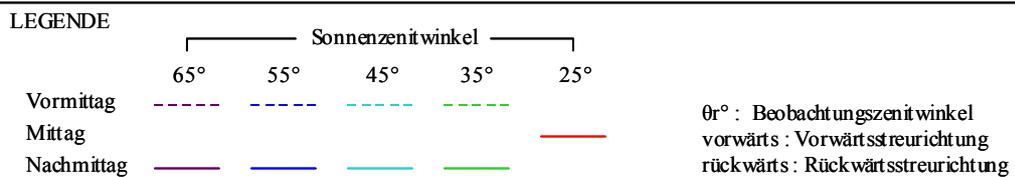
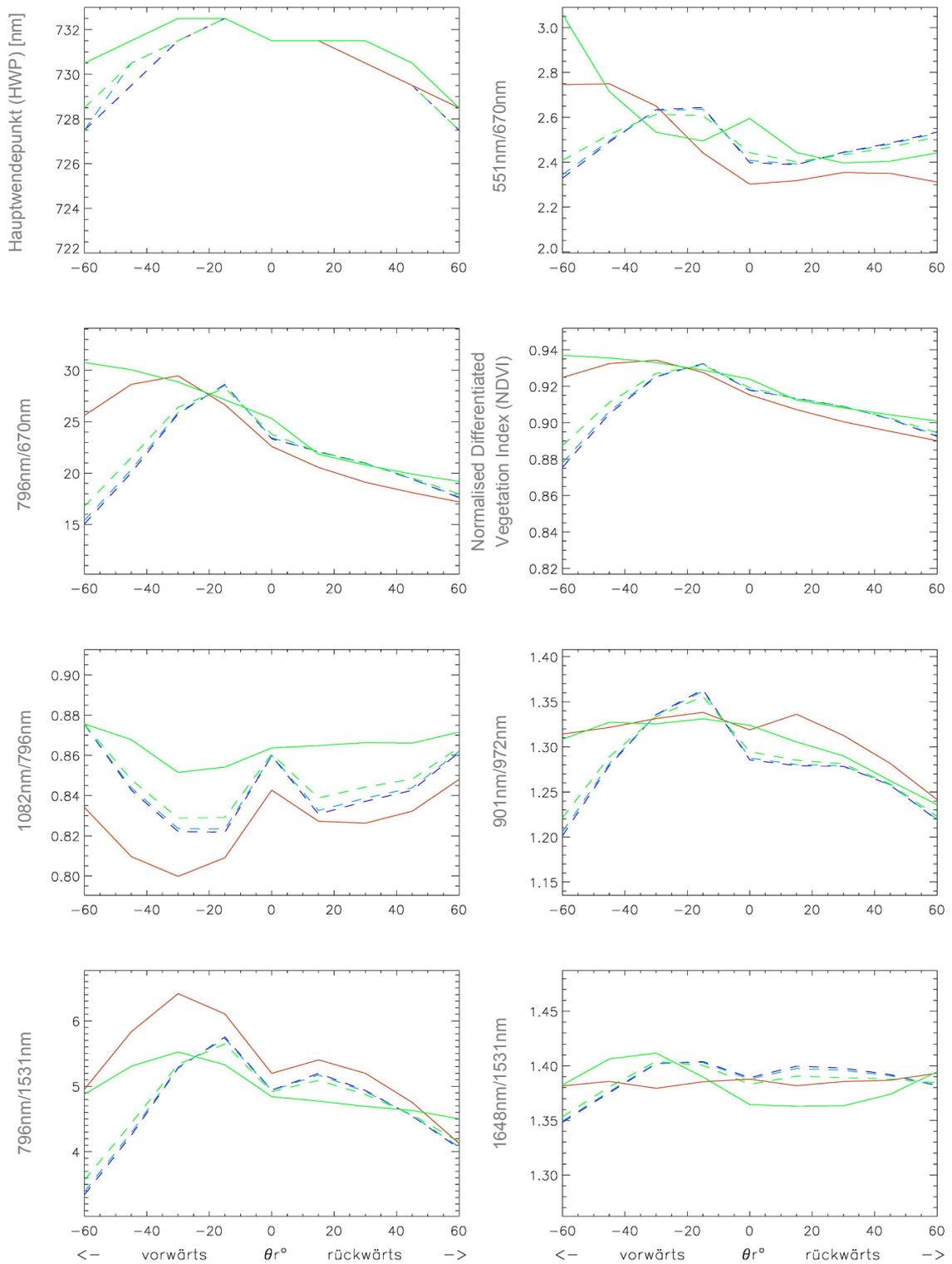
**Abbildung 124.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC39 in der Vegetationsperiode 2001.



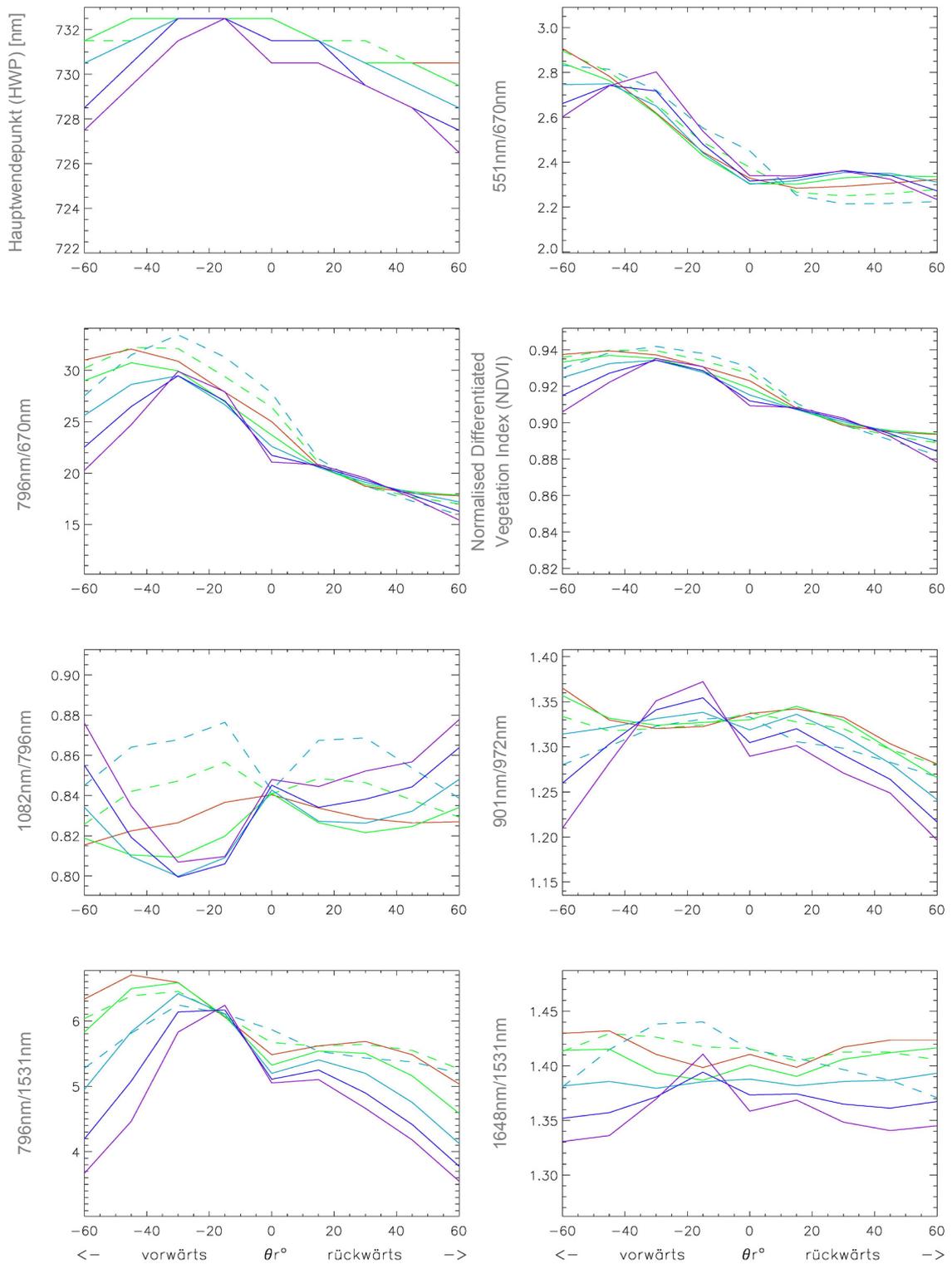
LEGENDE



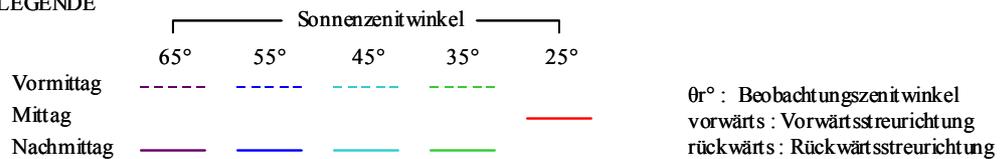
**Abbildung 125.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC39 in der Vegetationsperiode 2001.



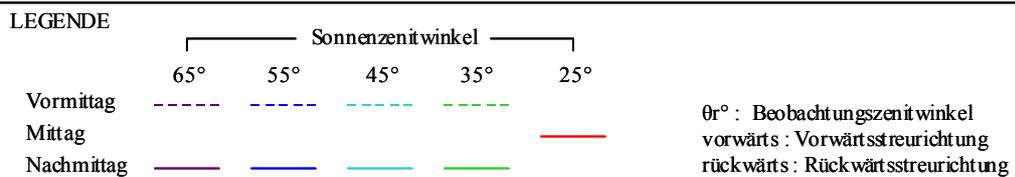
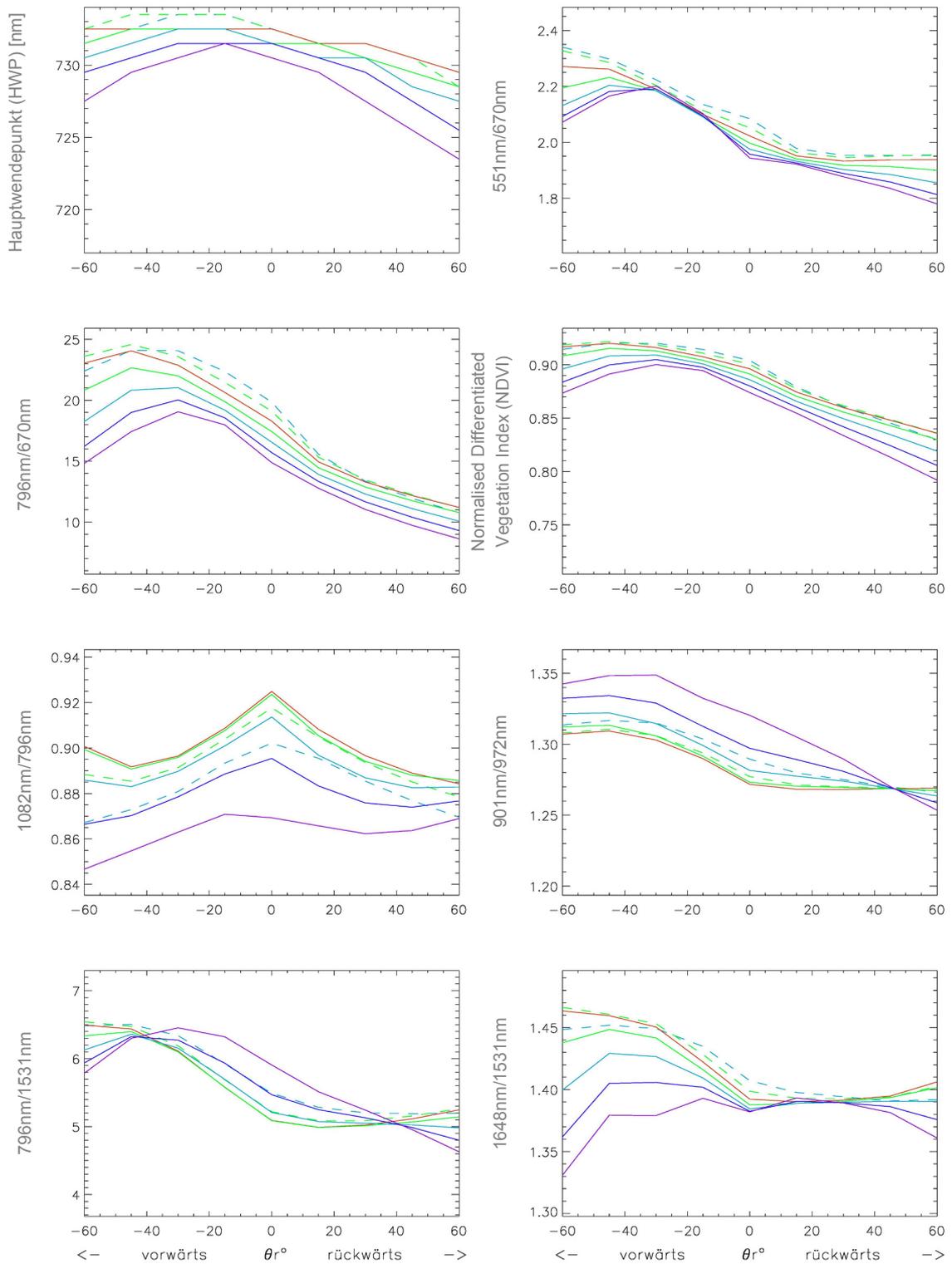
**Abbildung 126.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC51 in der Vegetationsperiode 2000.



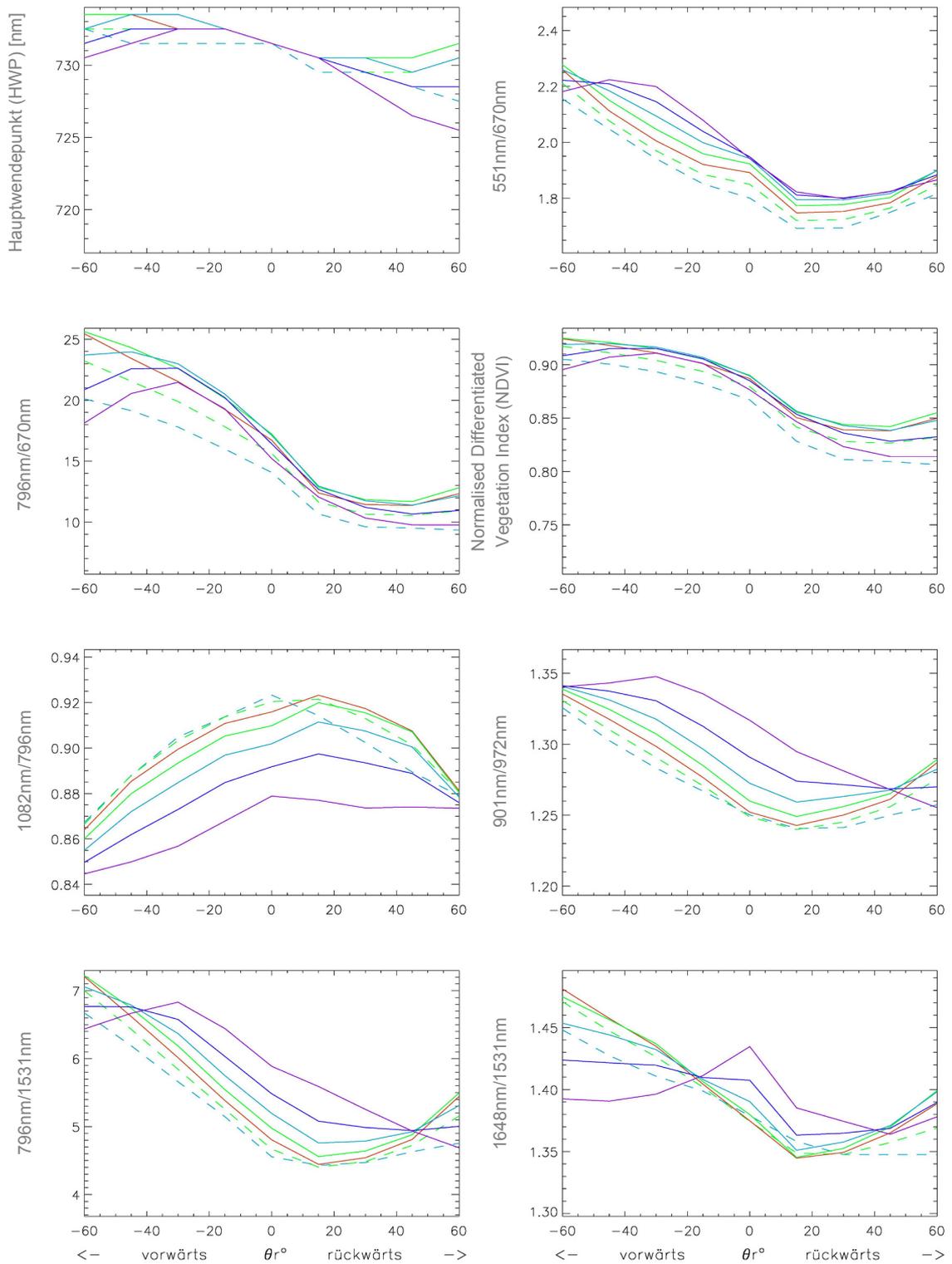
LEGENDE



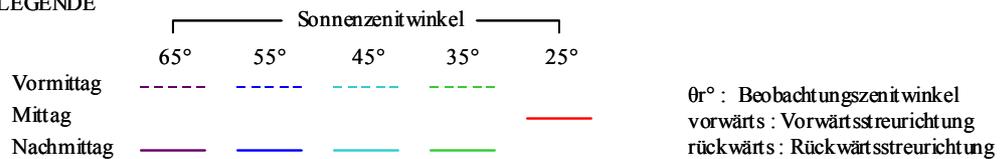
**Abbildung 127.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungswinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC51 in der Vegetationsperiode 2000.



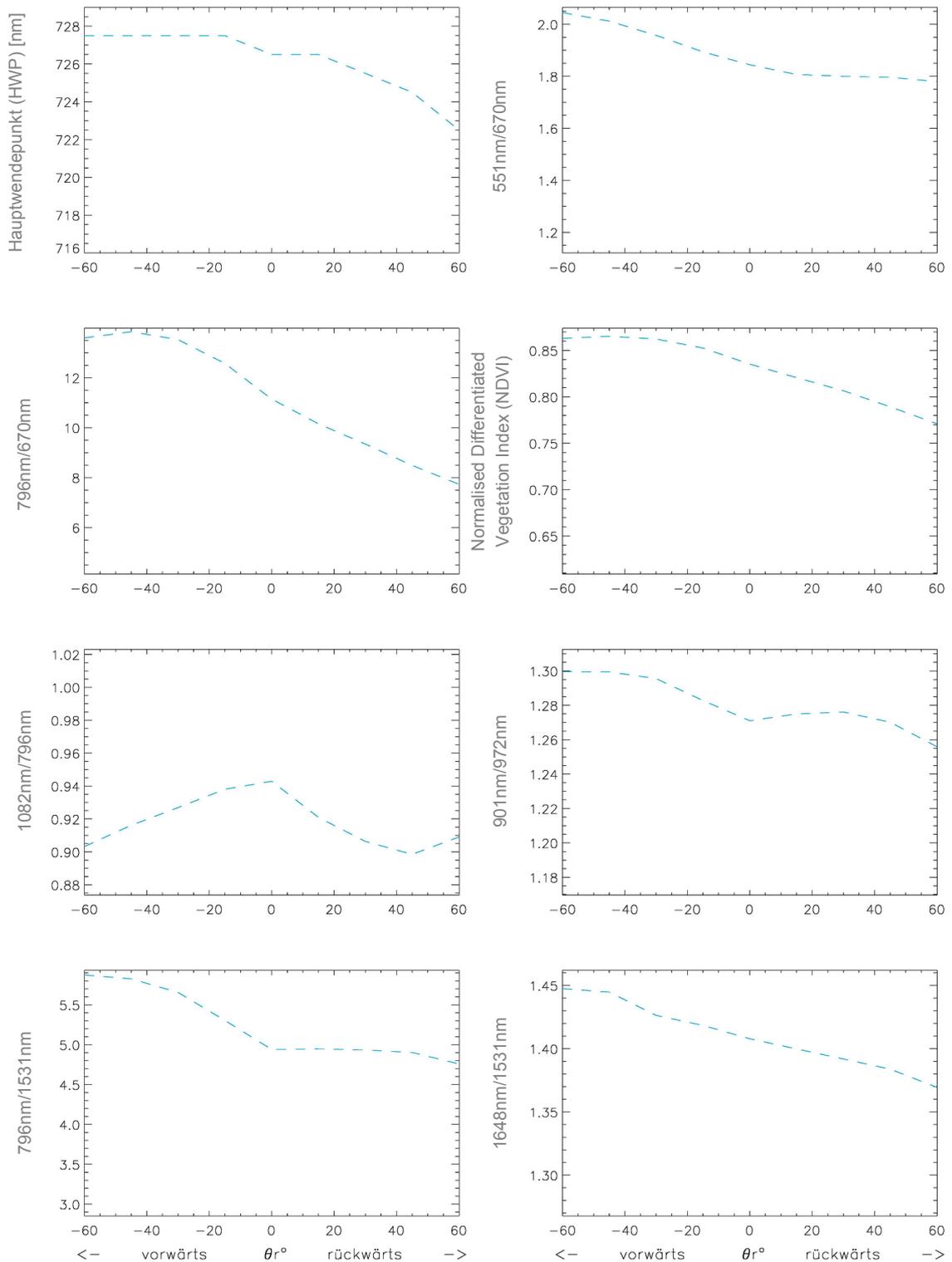
**Abbildung 128.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC65 in der Vegetationsperiode 2000.



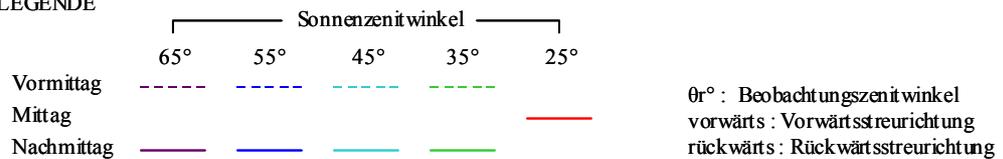
LEGENDE



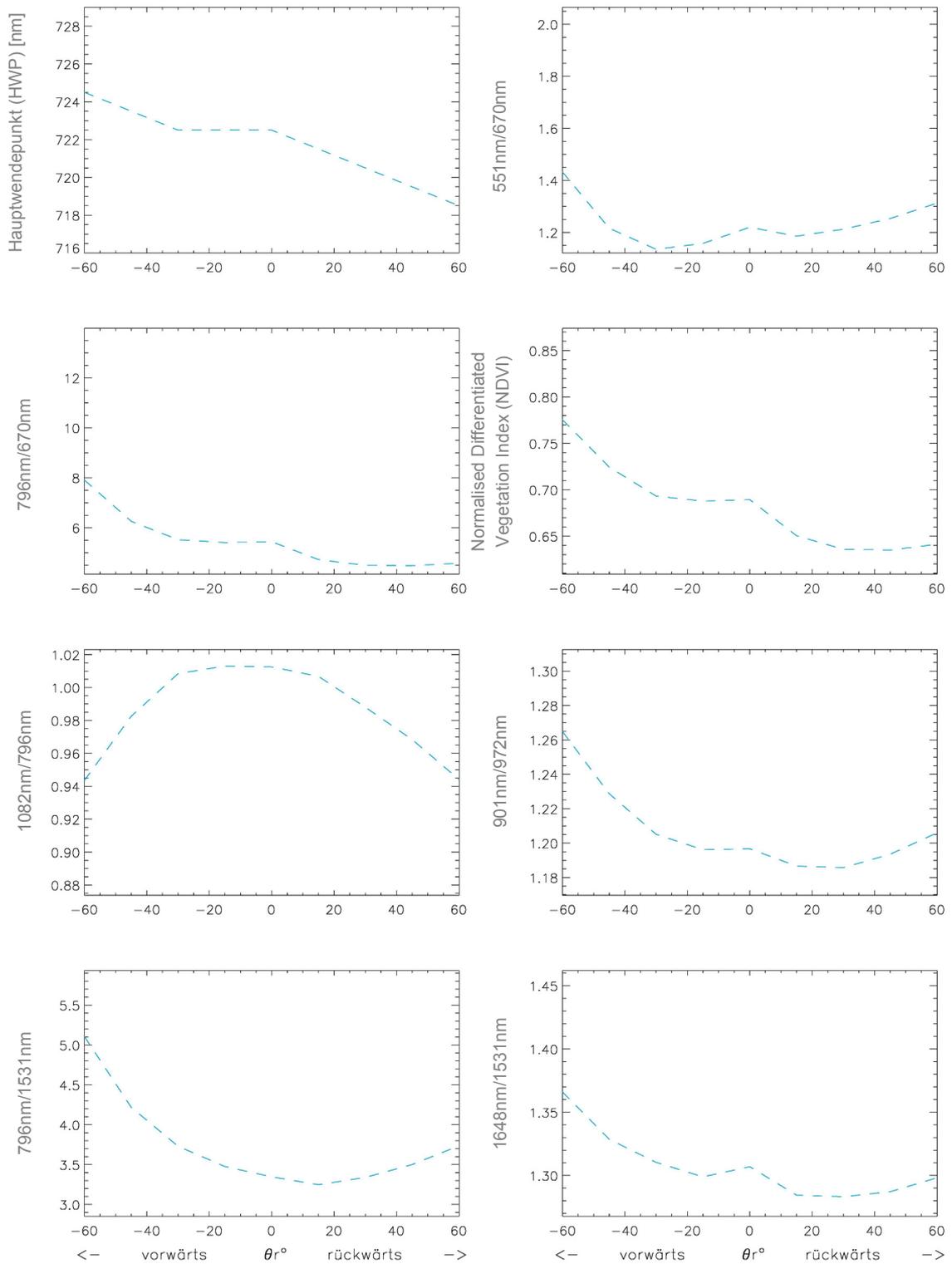
**Abbildung 129.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC65 in der Vegetationsperiode 2000.



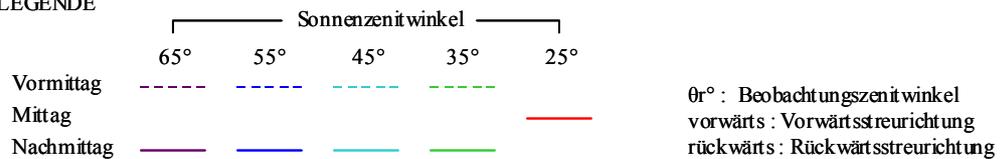
LEGENDE



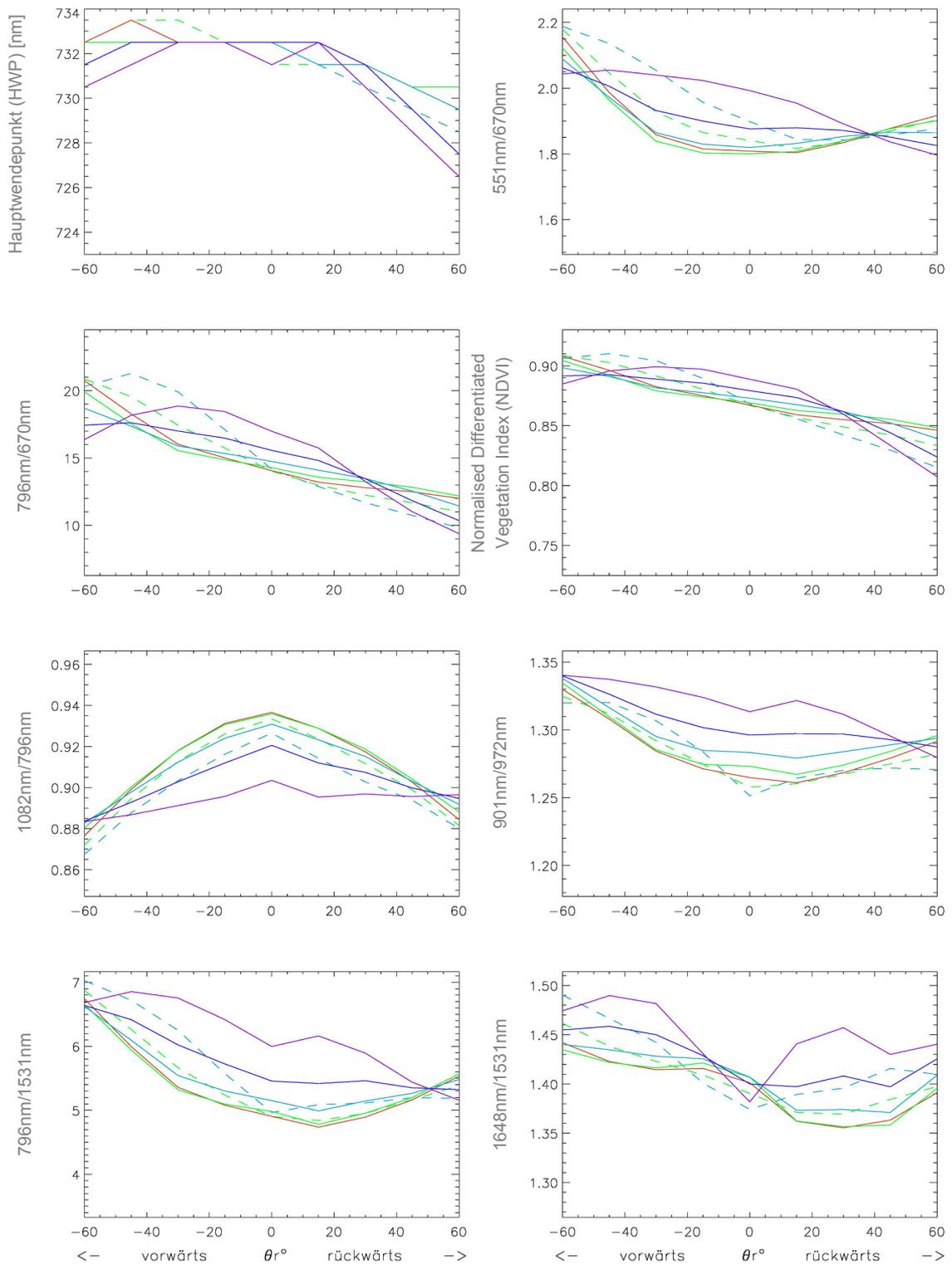
**Abbildung 130.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungsenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC71 in der Vegetationsperiode 2000.



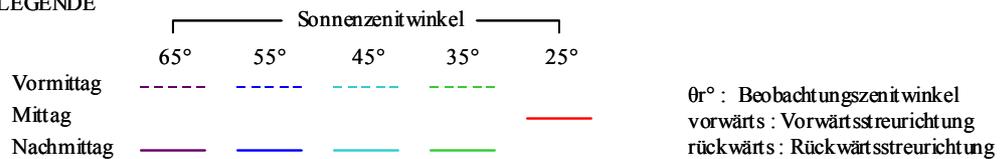
LEGENDE



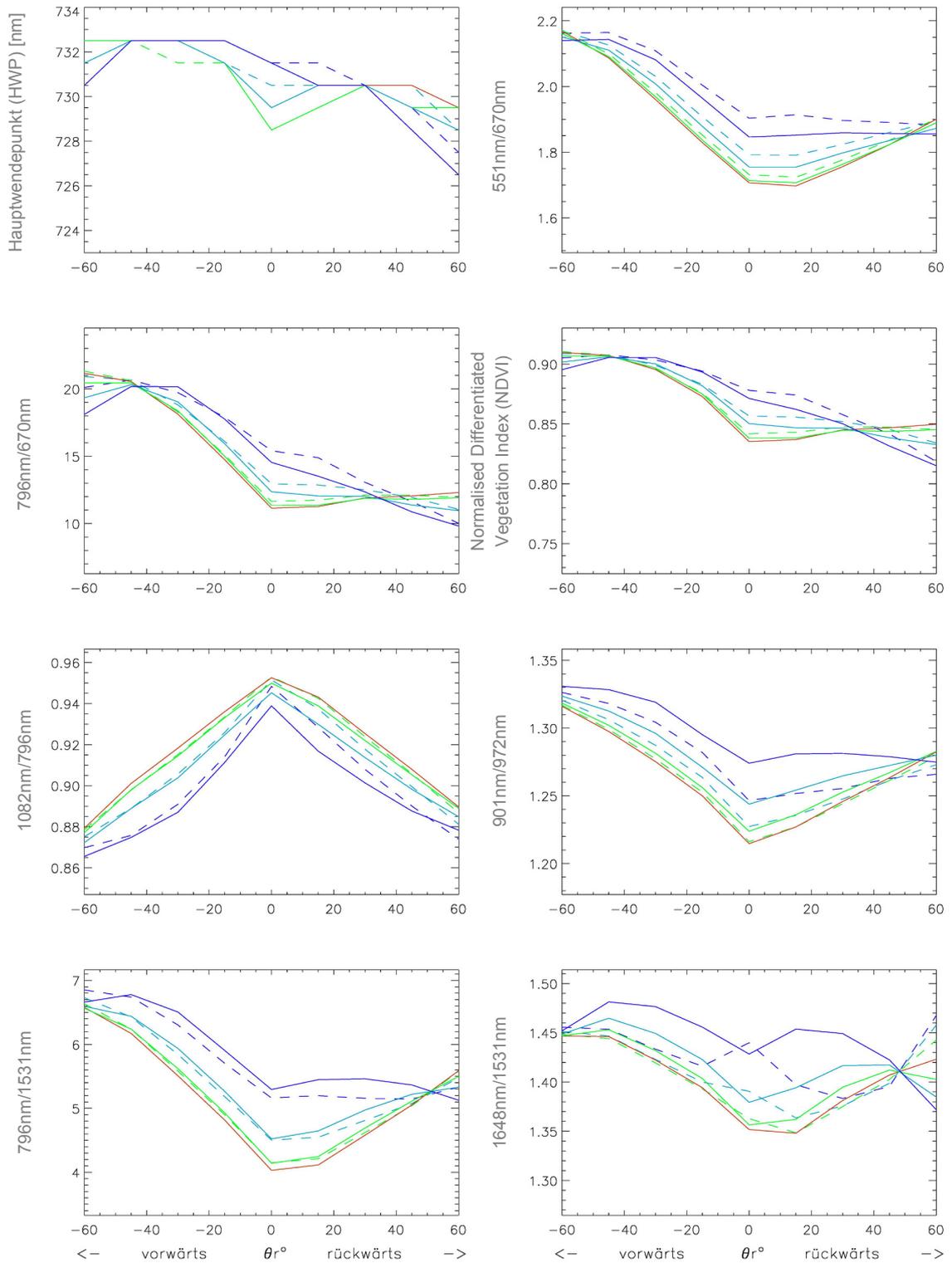
**Abbildung 131.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC71 in der Vegetationsperiode 2000.



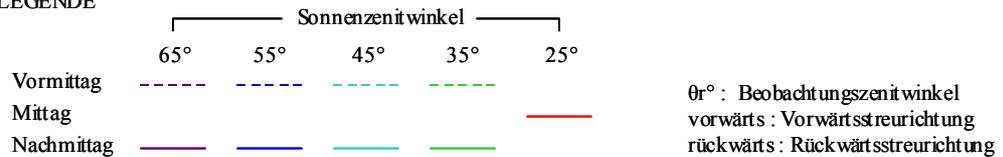
LEGENDE



**Abbildung 132.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC71 in der Vegetationsperiode 2001.

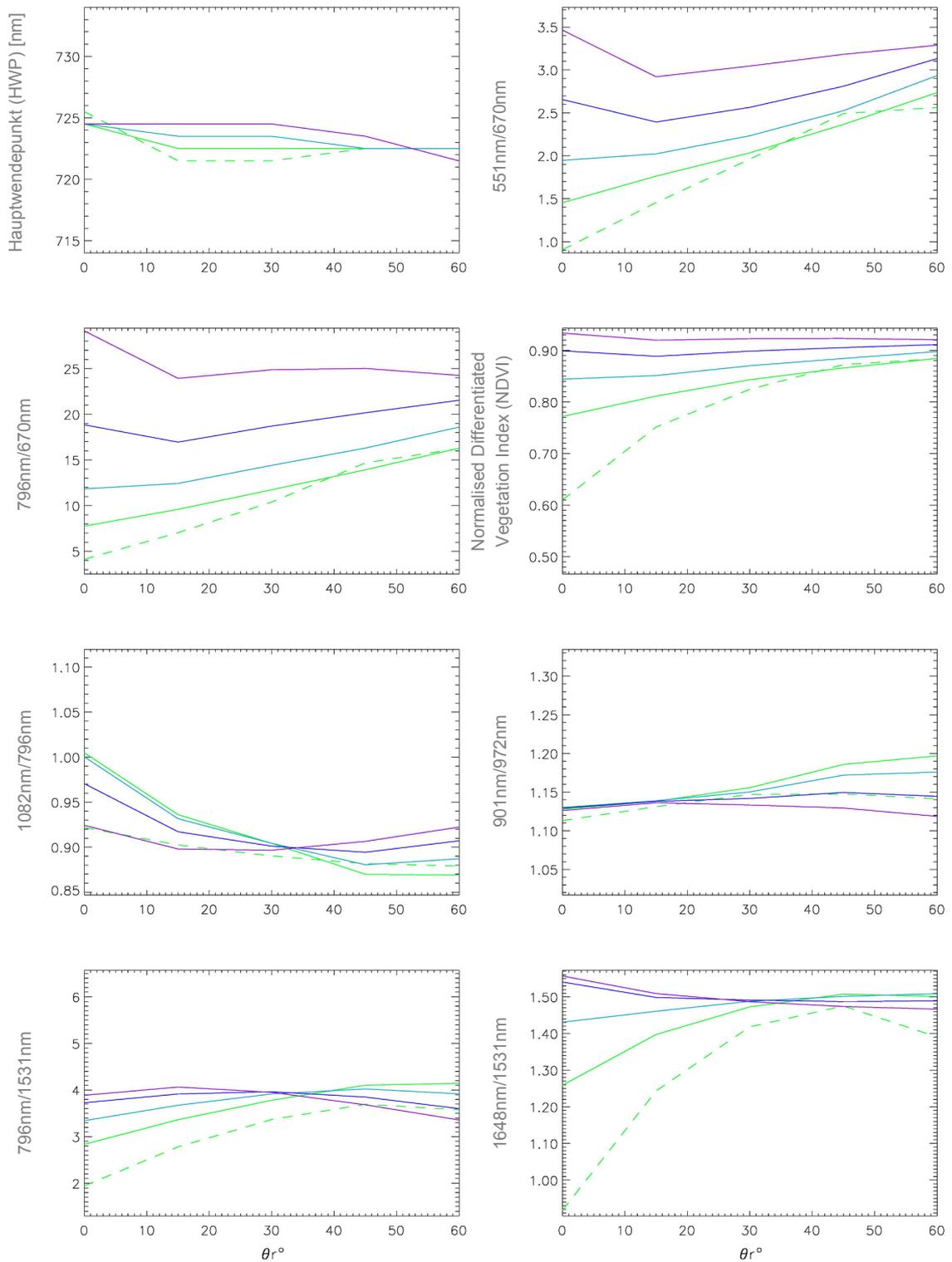


LEGENDE

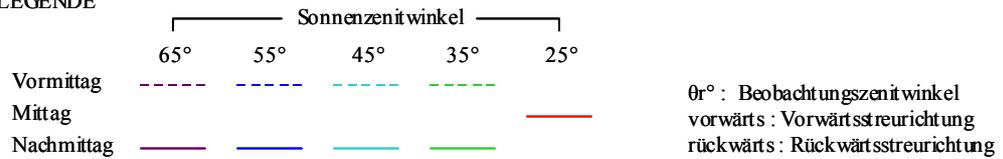


**Abbildung 133.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC71 in der Vegetationsperiode 2001.

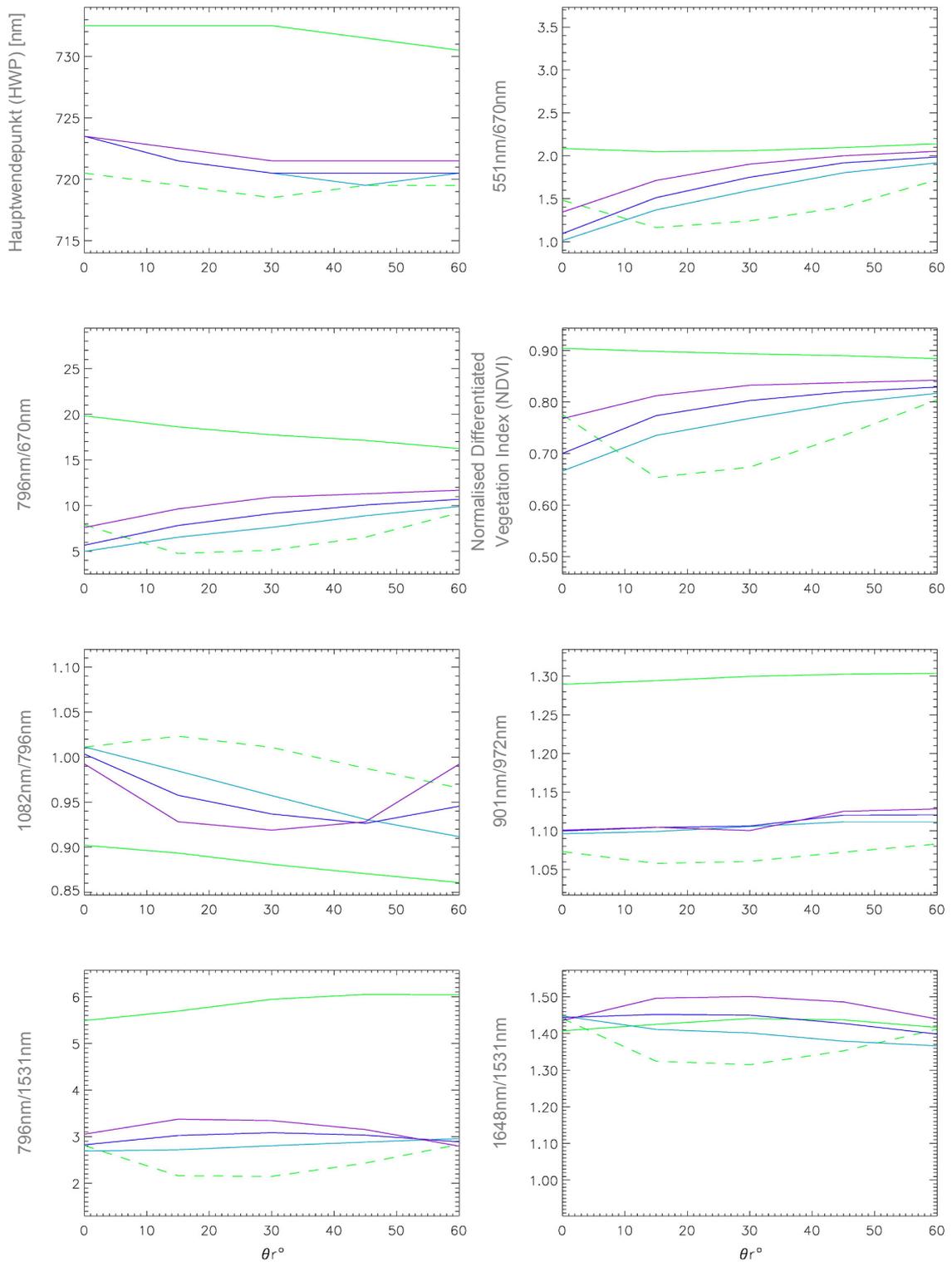
**B3 Berechnung der ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion in der um 90° zur Sonnenhauptebene gedrehte Beobachtungszimutebene ( $\varphi^\circ$ : 90°/270°)**



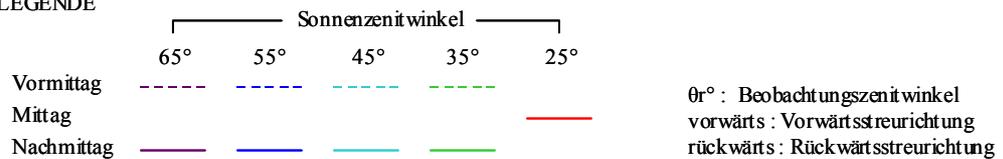
LEGENDE



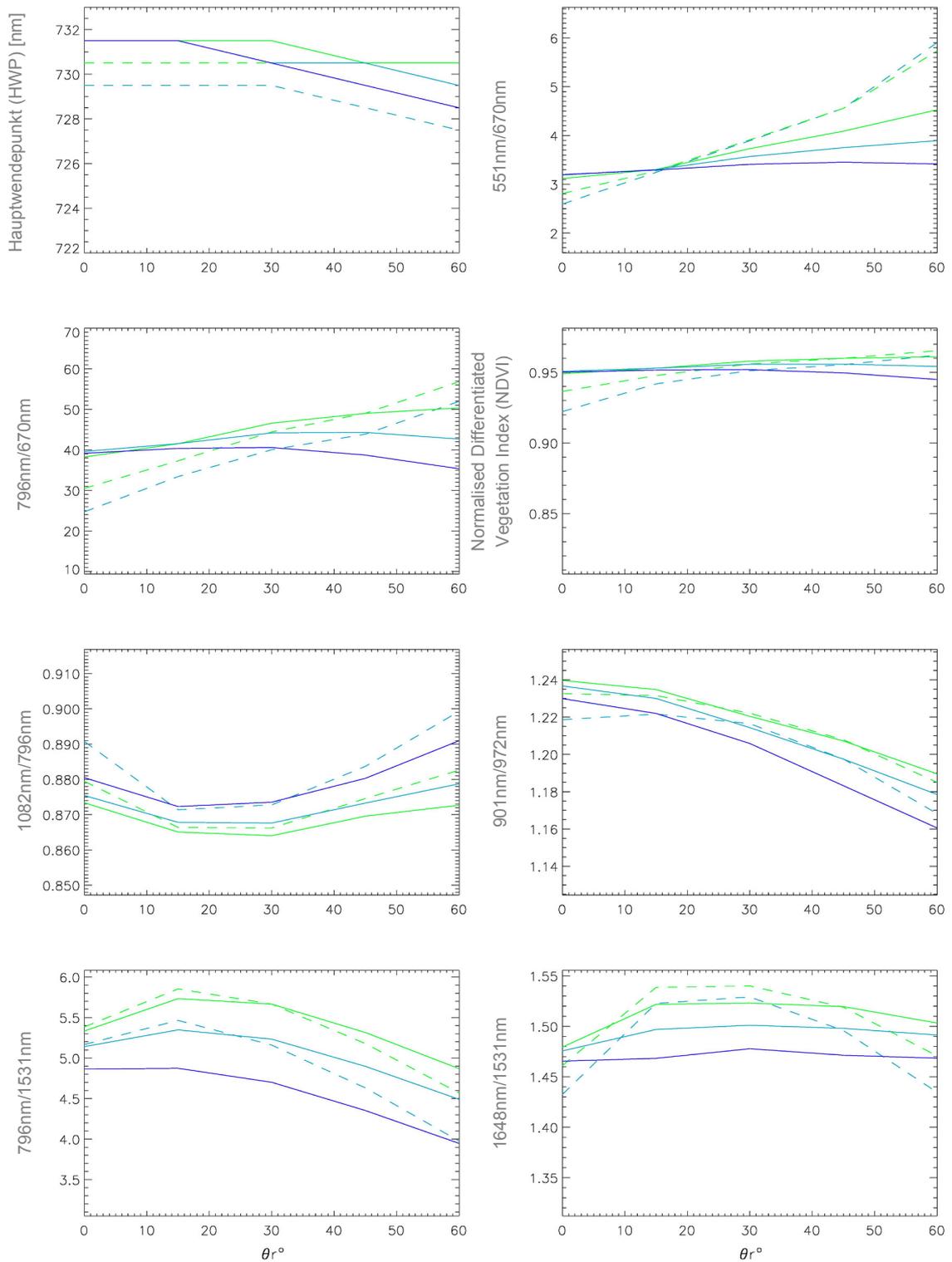
**Abbildung 134.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungswinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC30 in der Vegetationsperiode 2000.



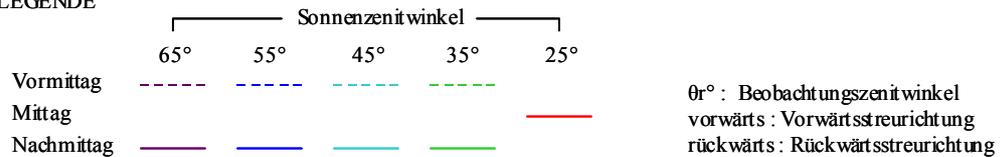
LEGENDE



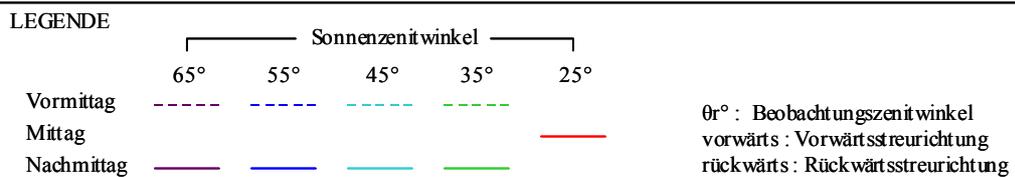
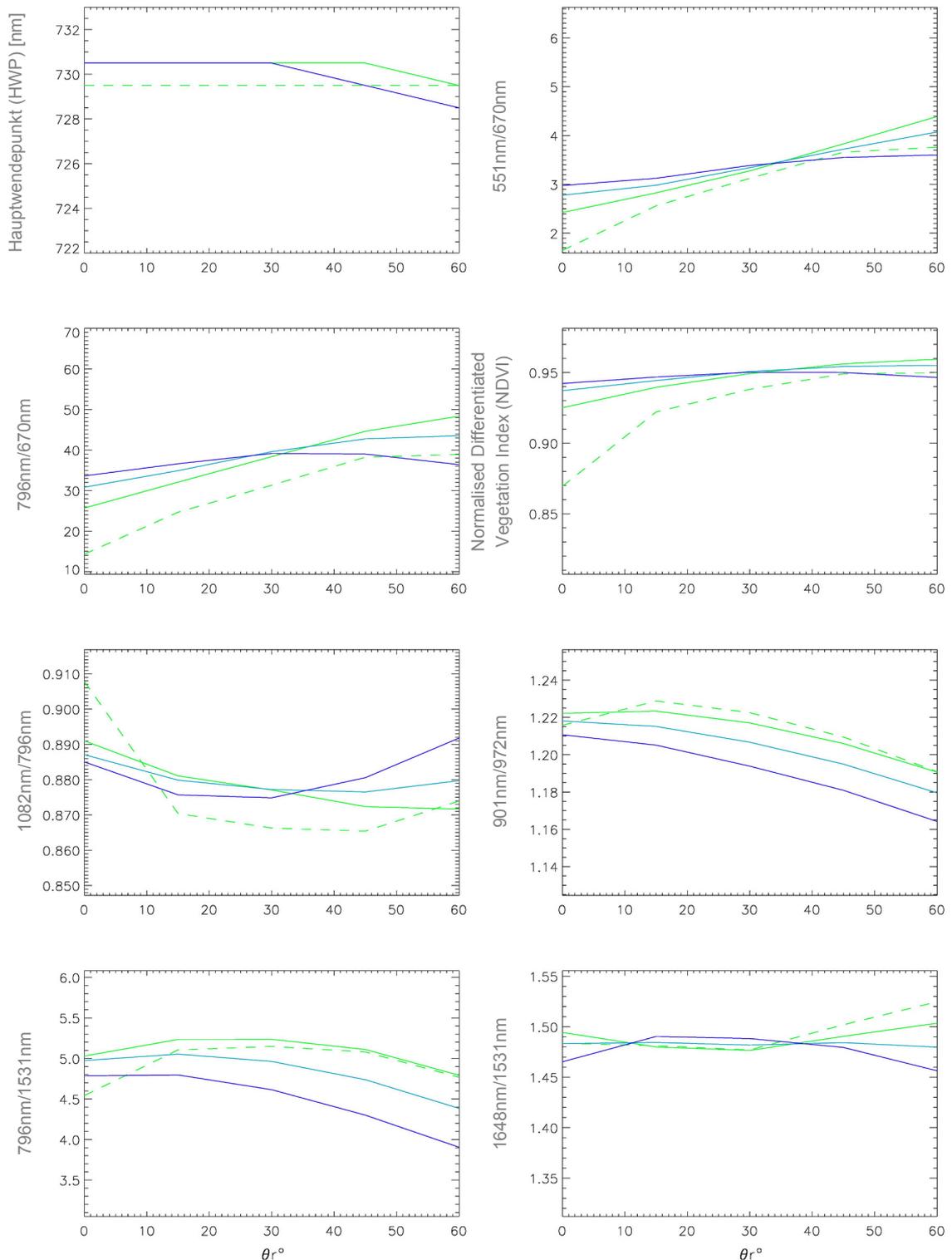
**Abbildung 135.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszentwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC30 in der Vegetationsperiode 2000.



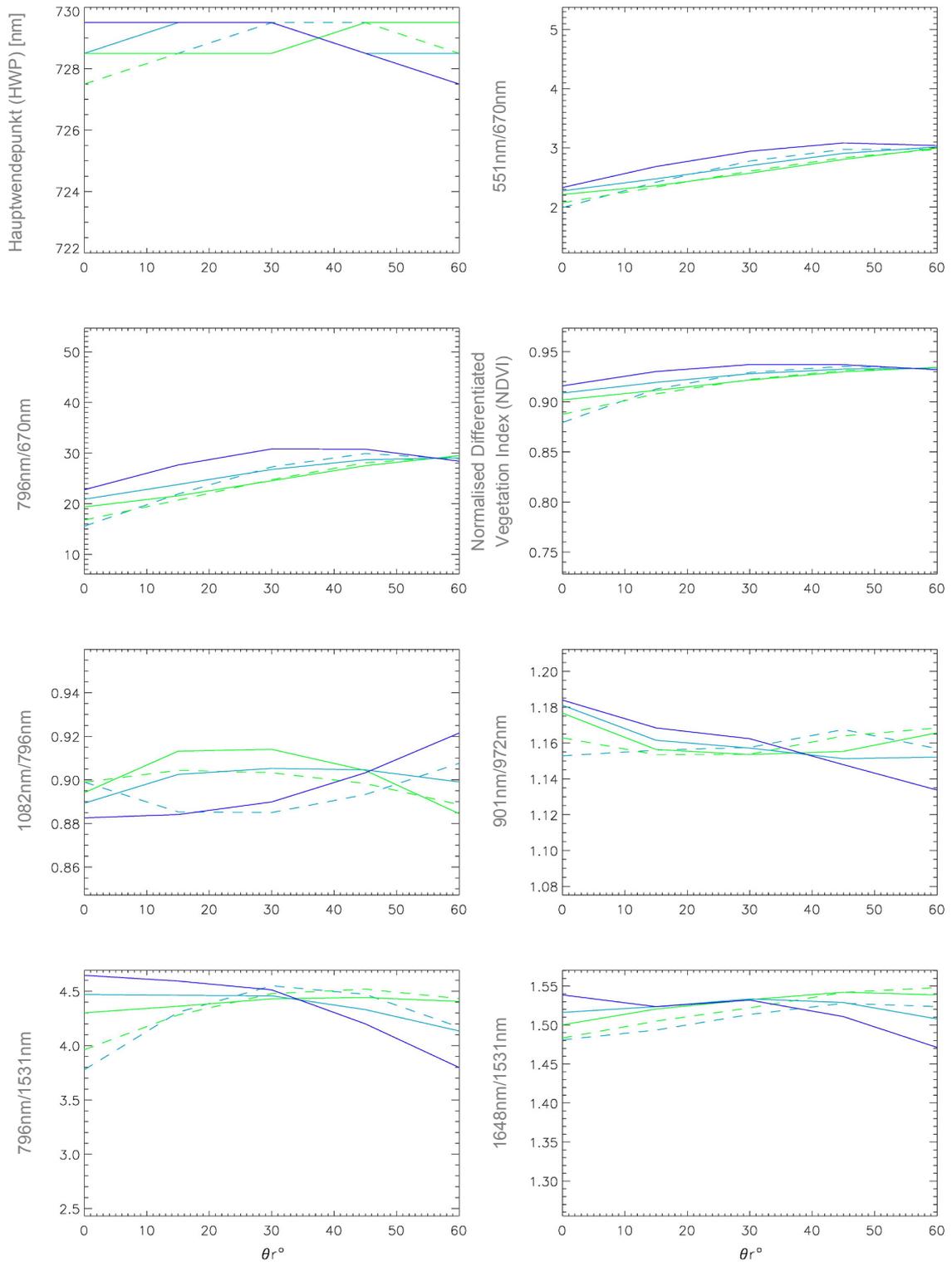
LEGENDE



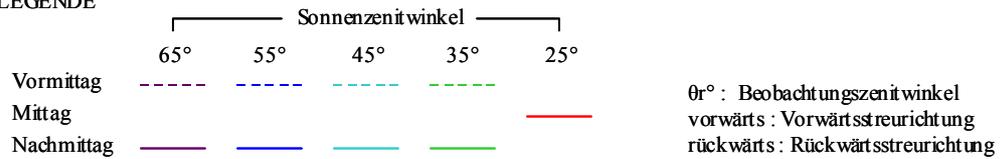
**Abbildung 136.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC32 in der Vegetationsperiode 2000.



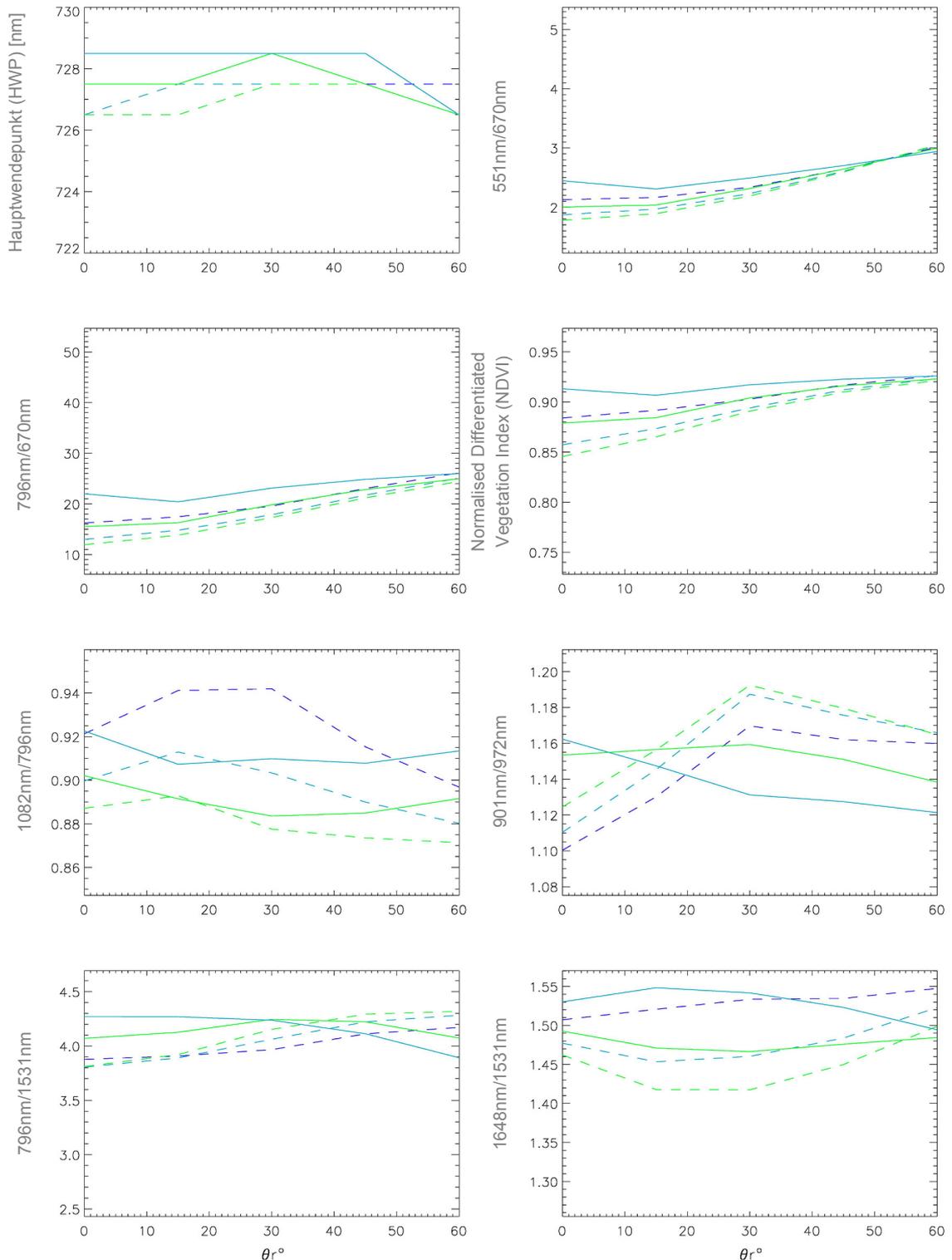
**Abbildung 137.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC32 in der Vegetationsperiode 2000.



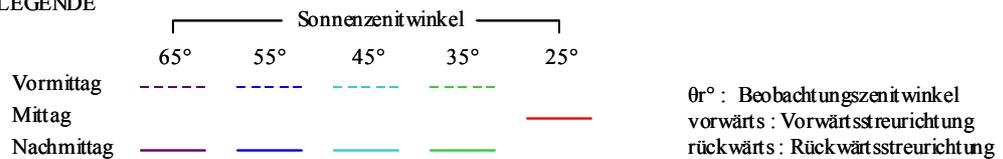
LEGENDE



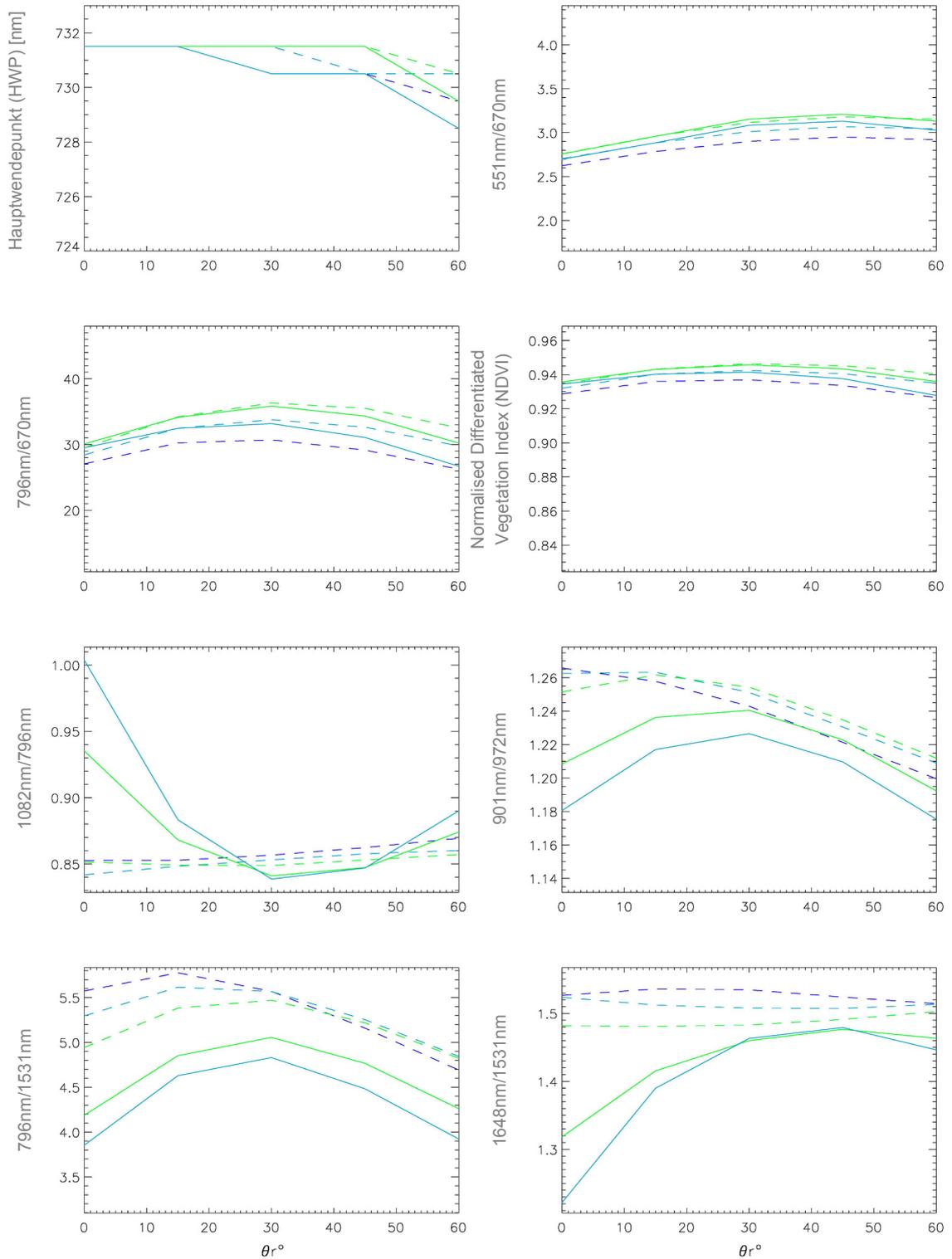
**Abbildung 138.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszentwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC32 in der Vegetationsperiode 2001.



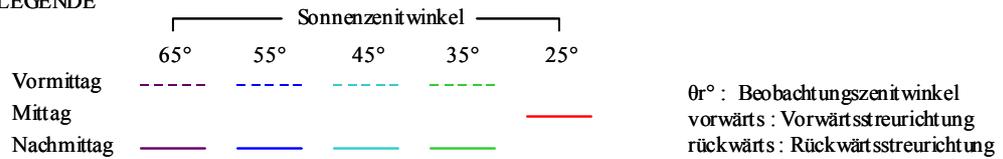
LEGENDE



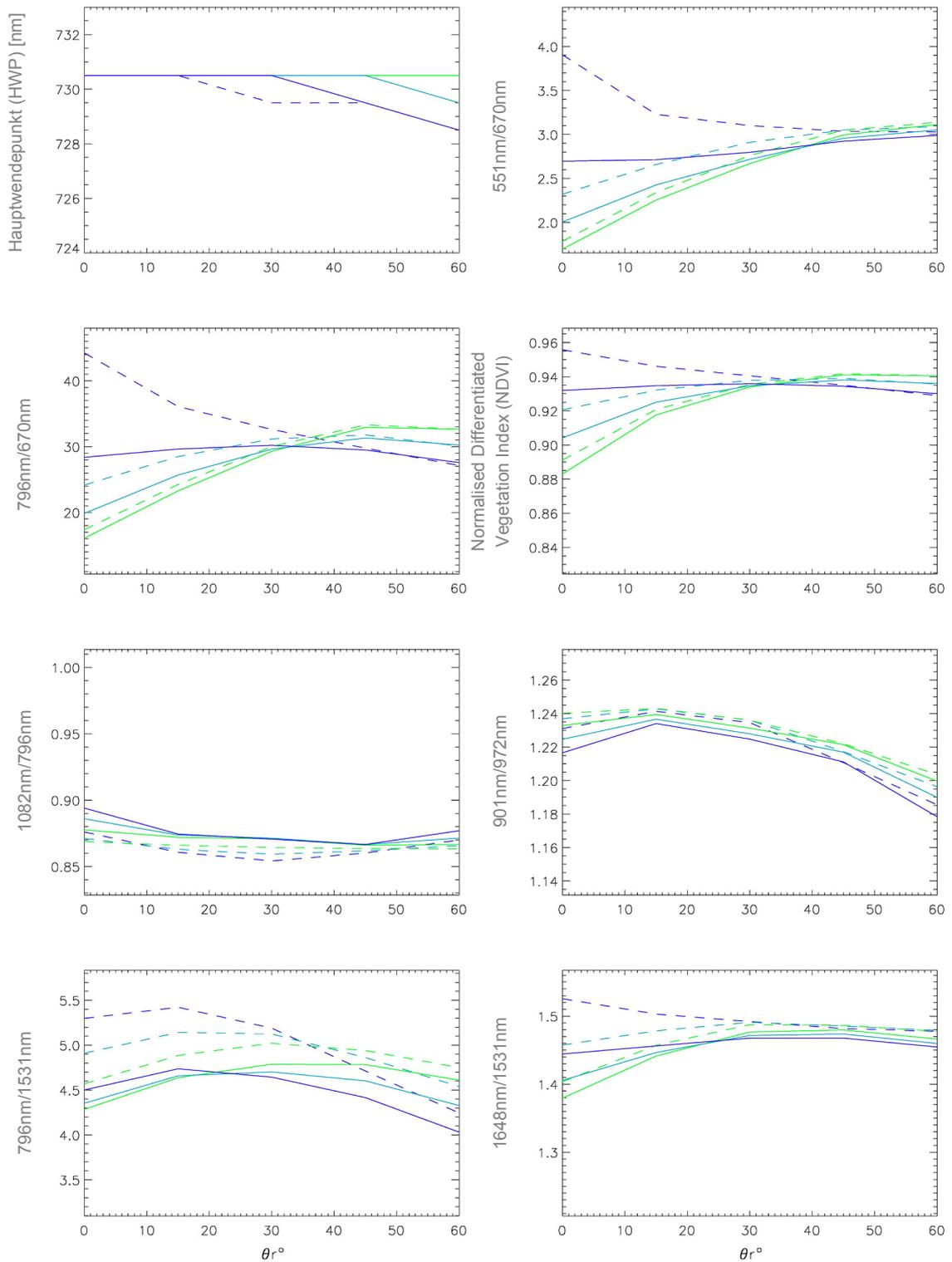
**Abbildung 139.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC32 in der Vegetationsperiode 2001.



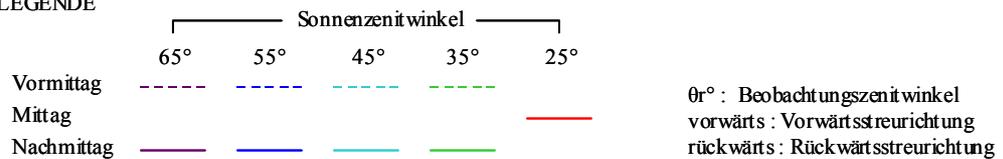
LEGENDE



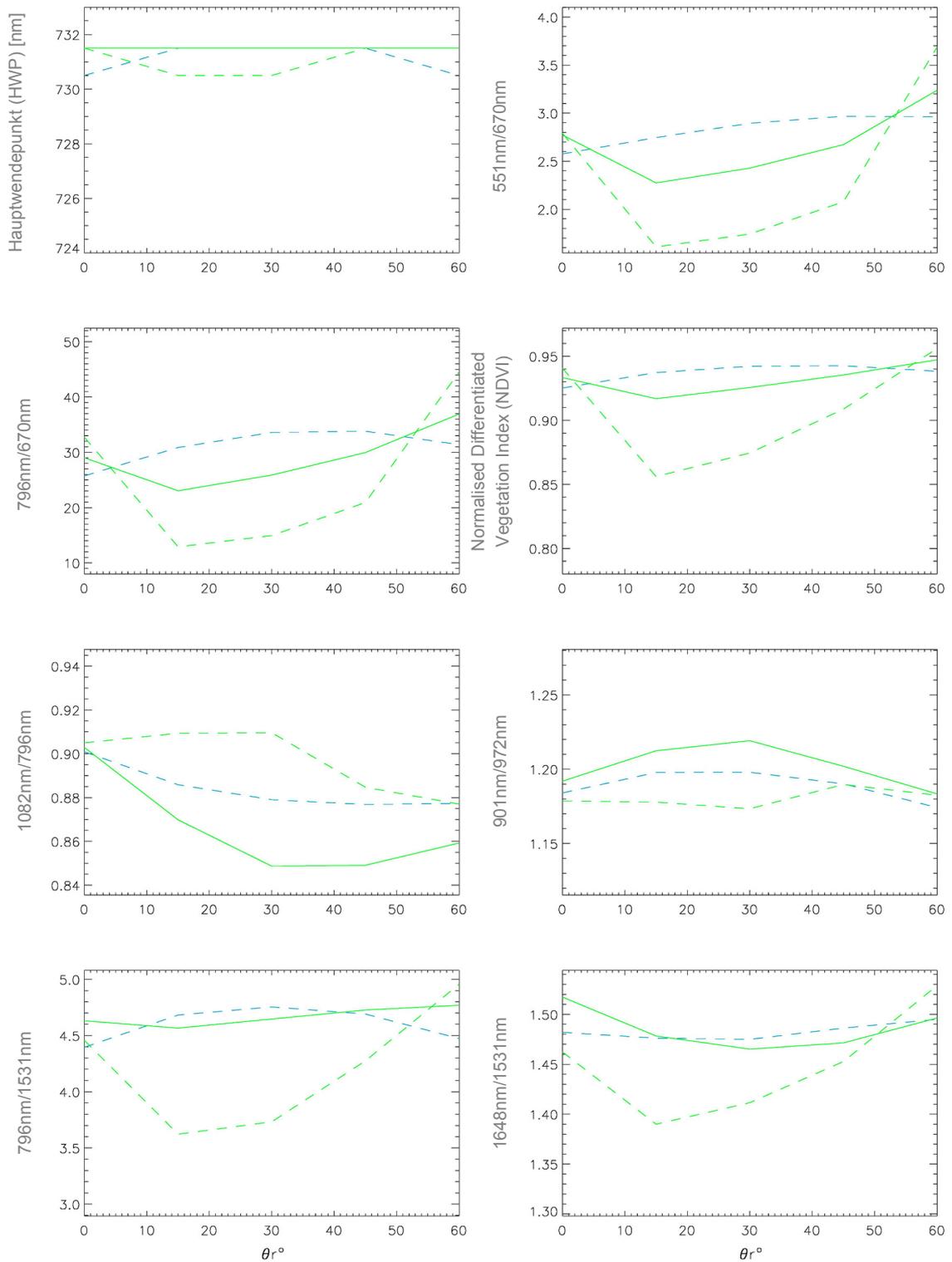
**Abbildung 140.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszentwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC39 in der Vegetationsperiode 2000.



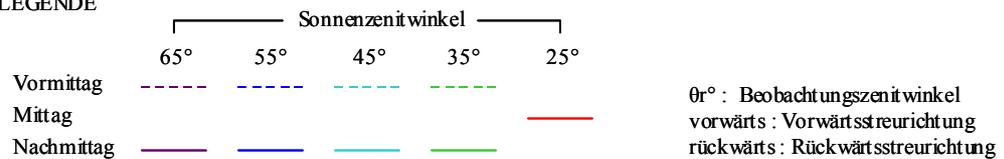
LEGENDE



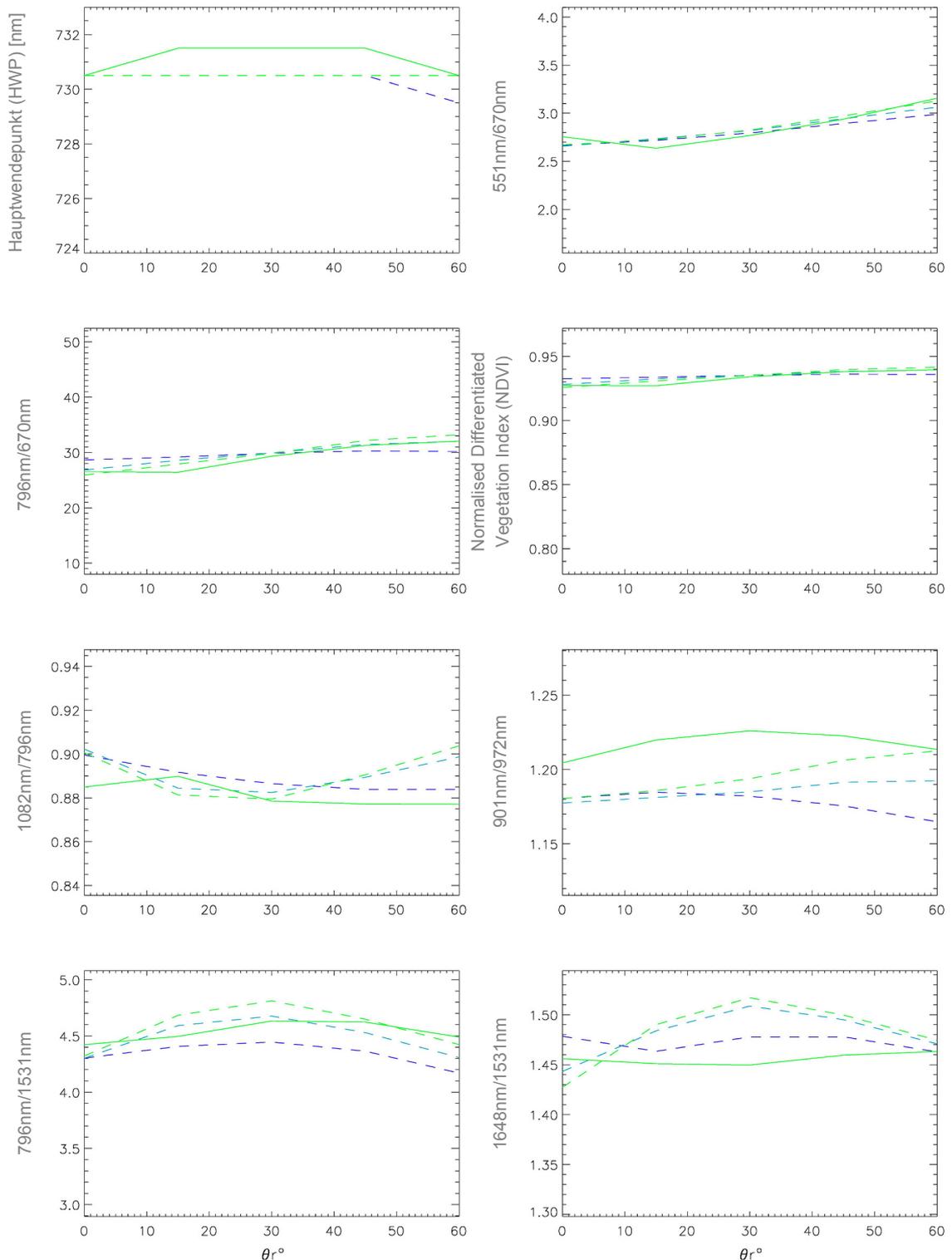
**Abbildung 141.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungswinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC39 in der Vegetationsperiode 2000.



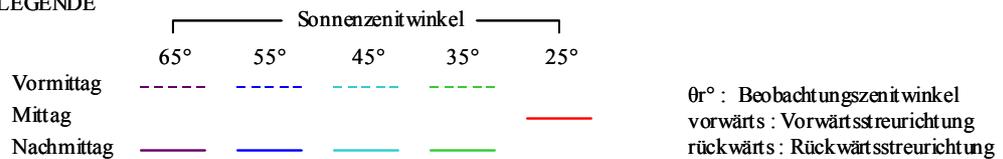
LEGENDE



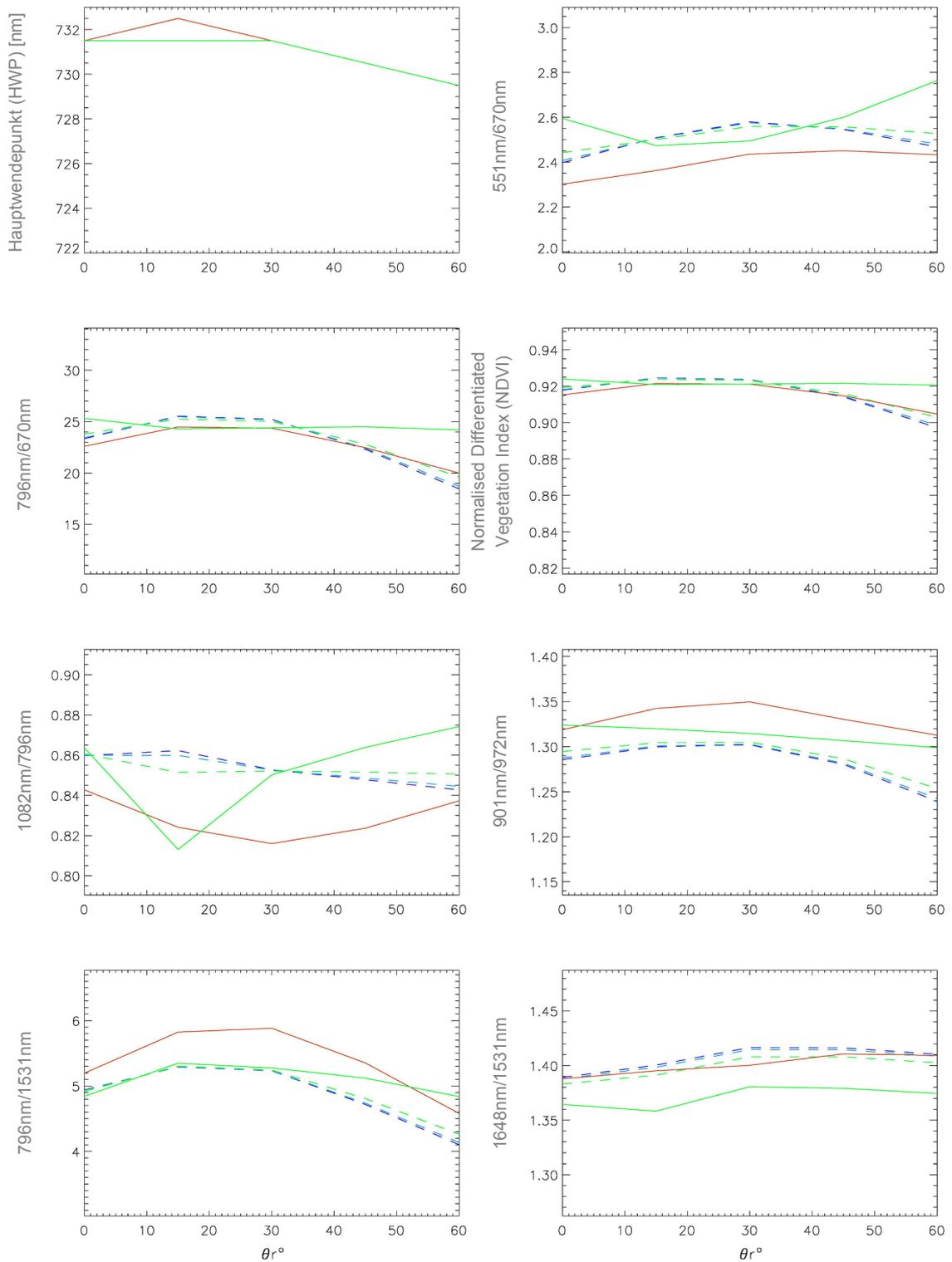
**Abbildung 142.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungswinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC39 in der Vegetationsperiode 2001.



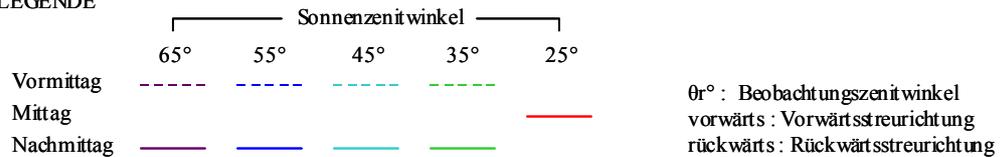
LEGENDE



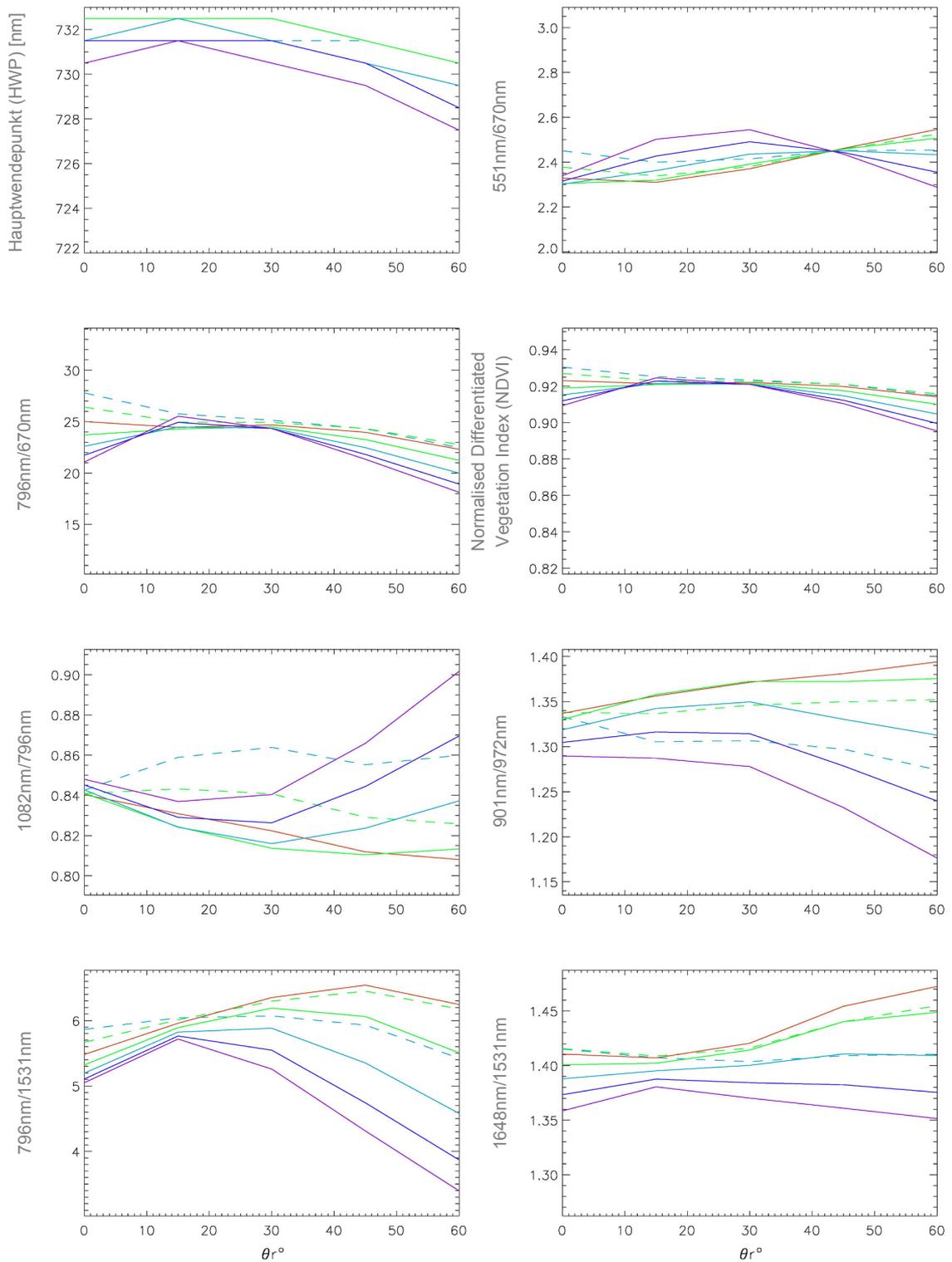
**Abbildung 143.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungsenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC39 in der Vegetationsperiode 2001.



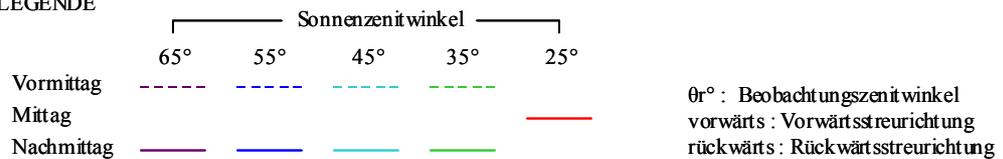
LEGENDE



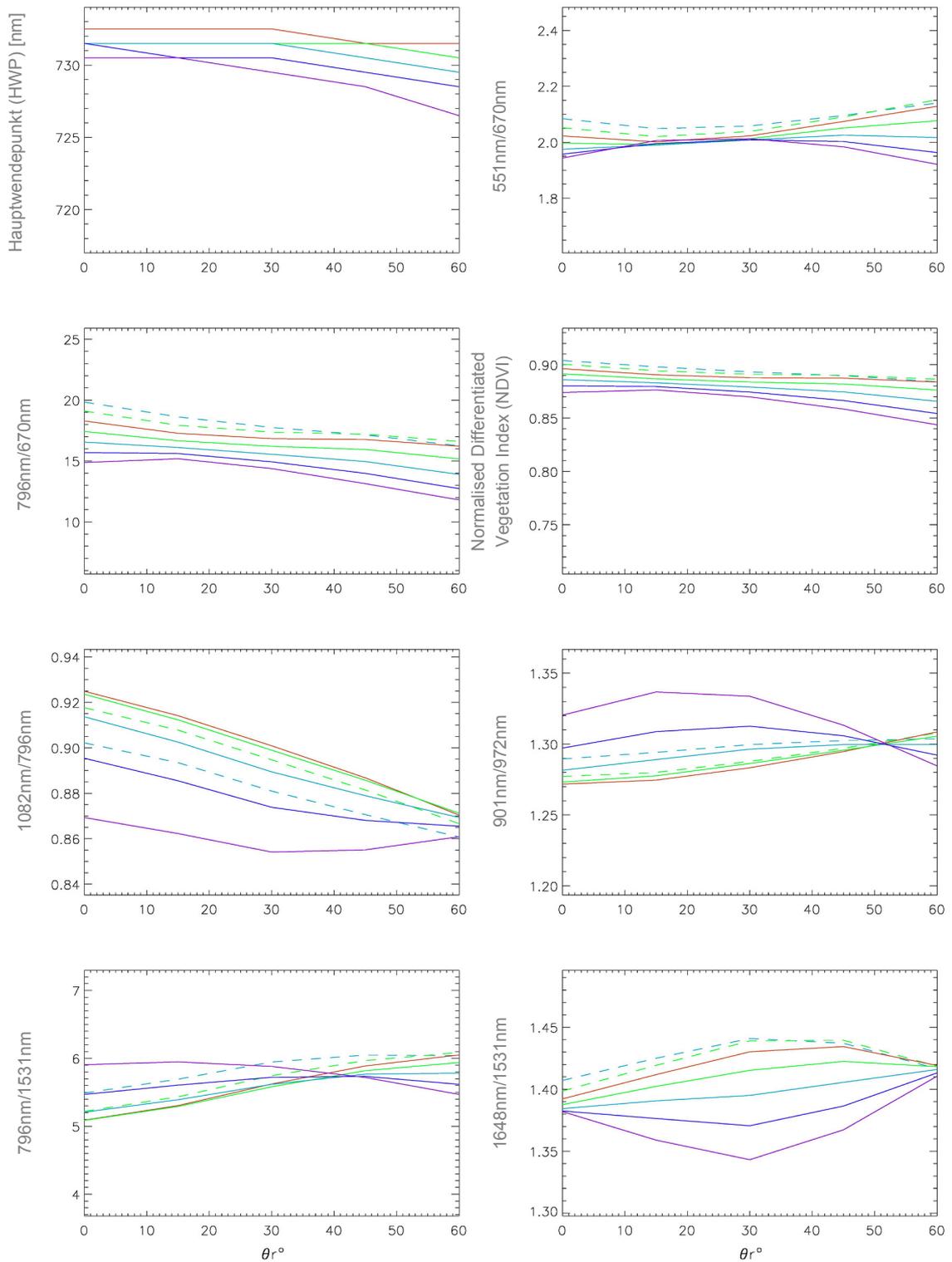
**Abbildung 144.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungswinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC51 in der Vegetationsperiode 2000.



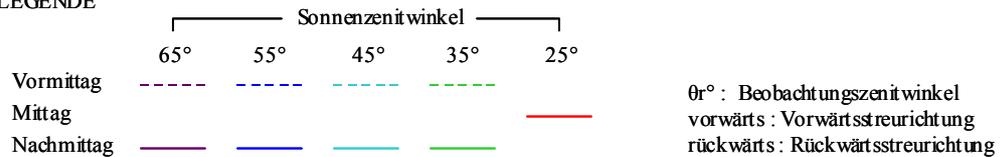
LEGENDE



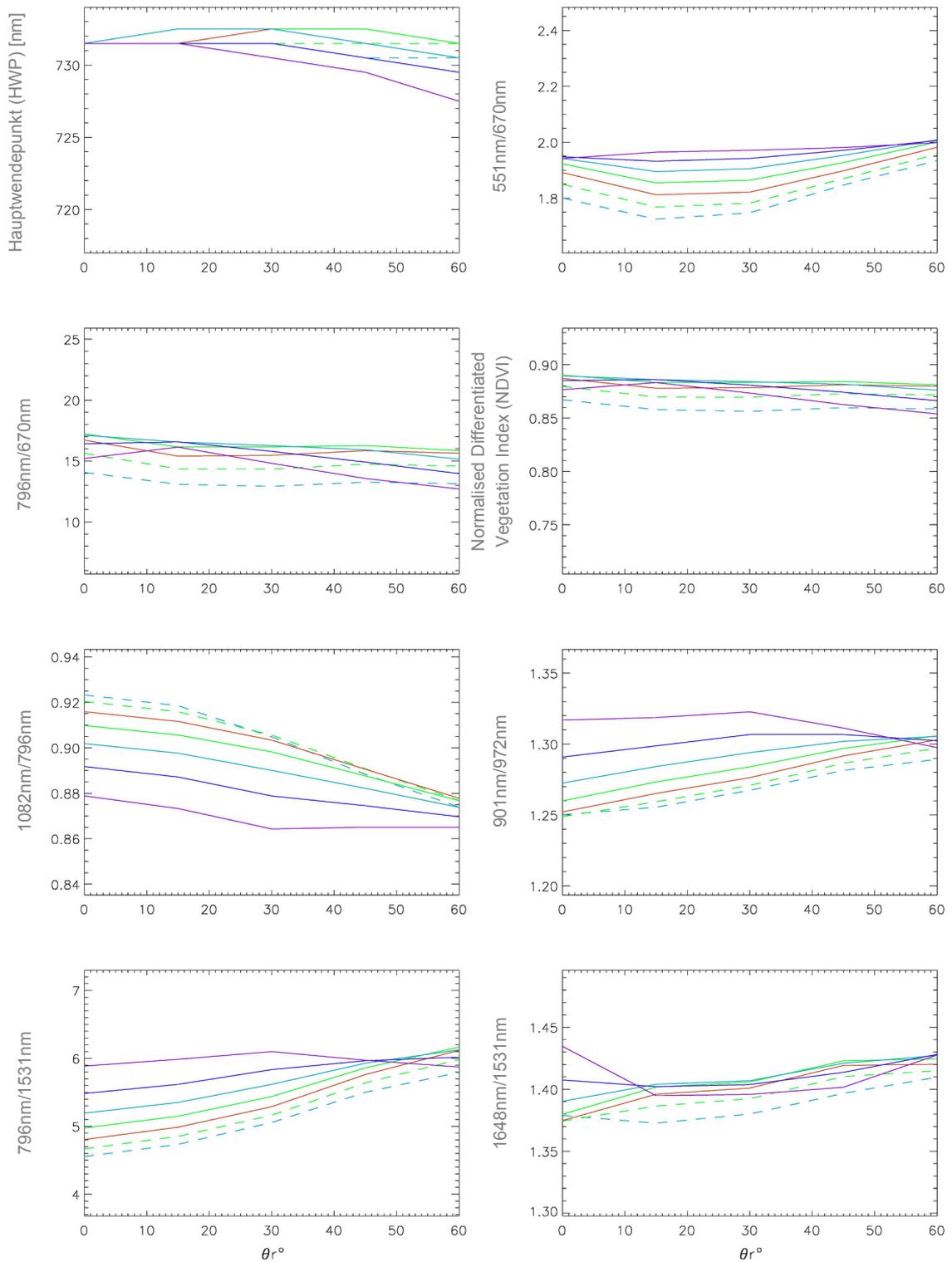
**Abbildung 145.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC51 in der Vegetationsperiode 2000.



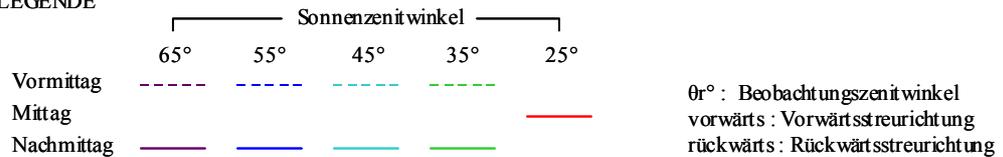
LEGENDE



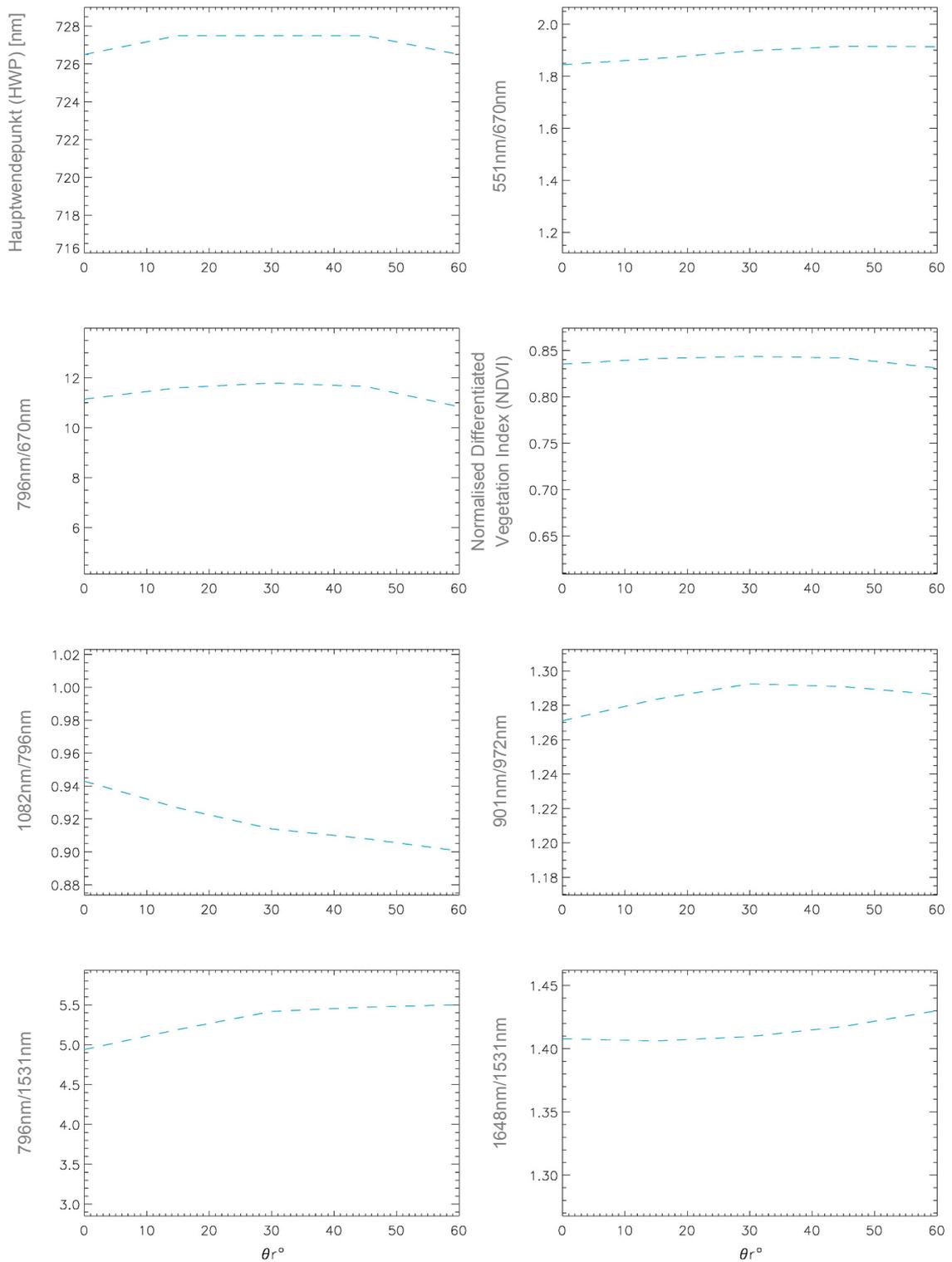
**Abbildung 146.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungsenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC65 in der Vegetationsperiode 2000.



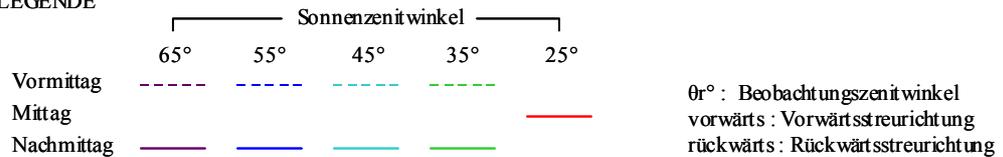
LEGENDE



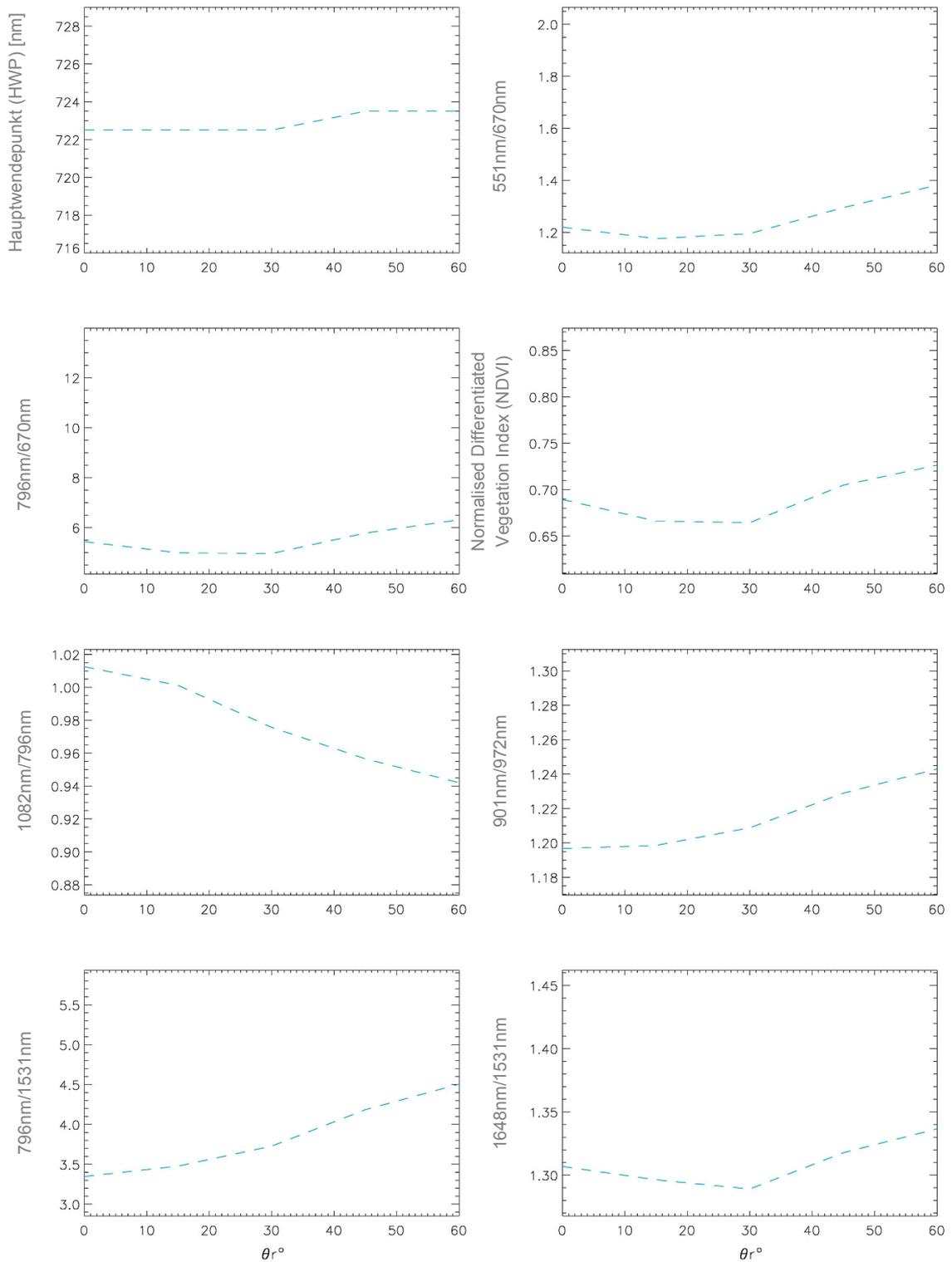
**Abbildung 147.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszentwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC65 in der Vegetationsperiode 2000.



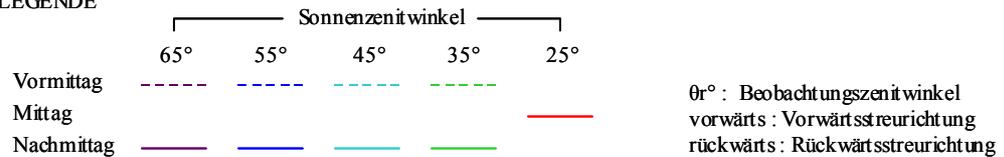
LEGENDE



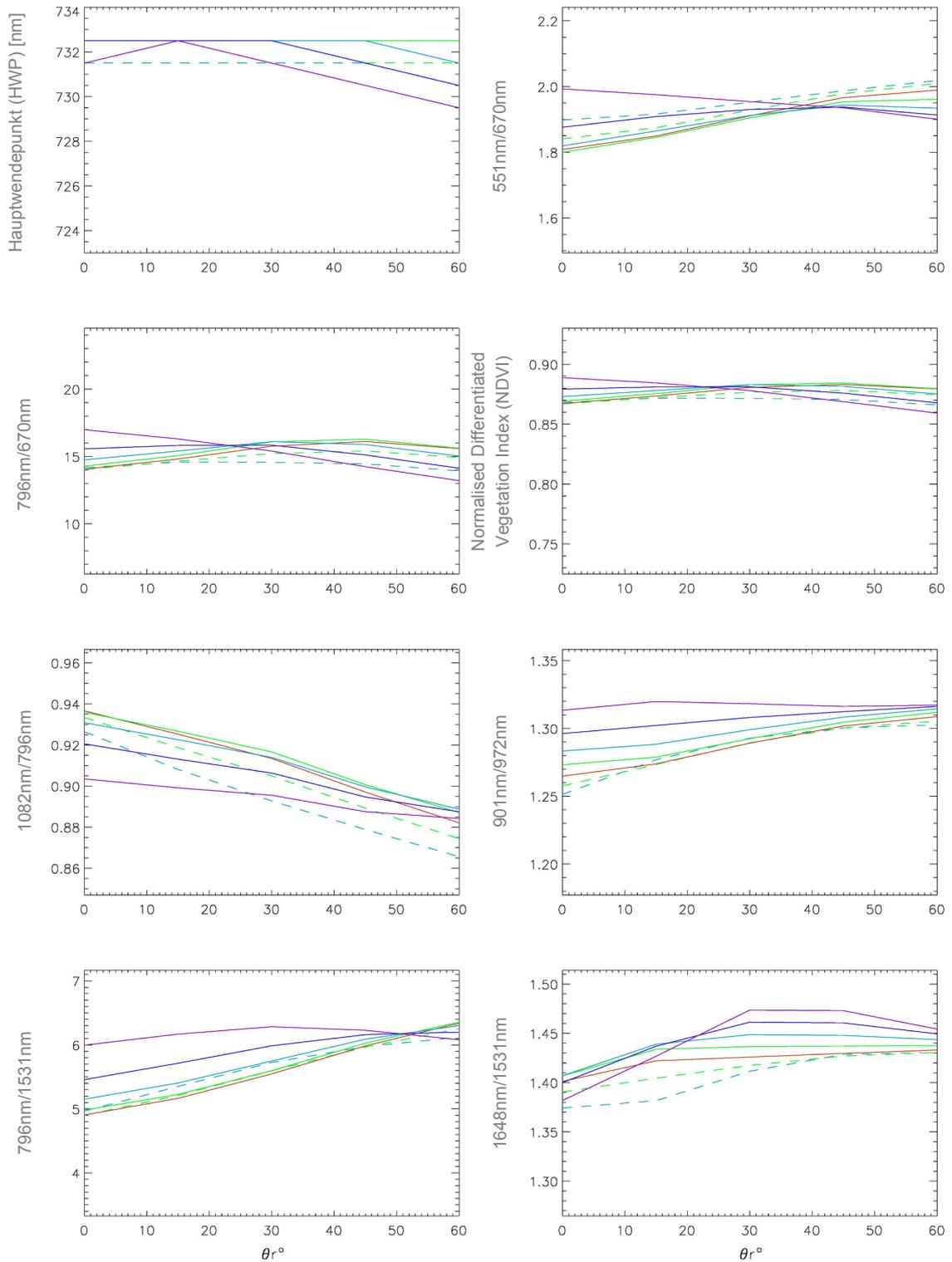
**Abbildung 148.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszenitwinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC71 in der Vegetationsperiode 2000.



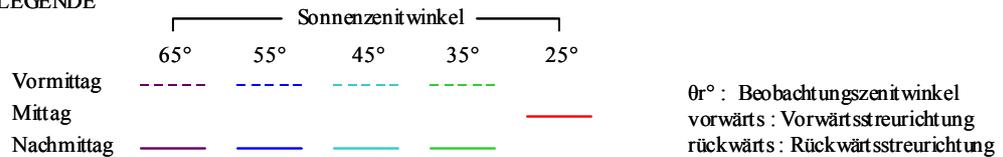
LEGENDE



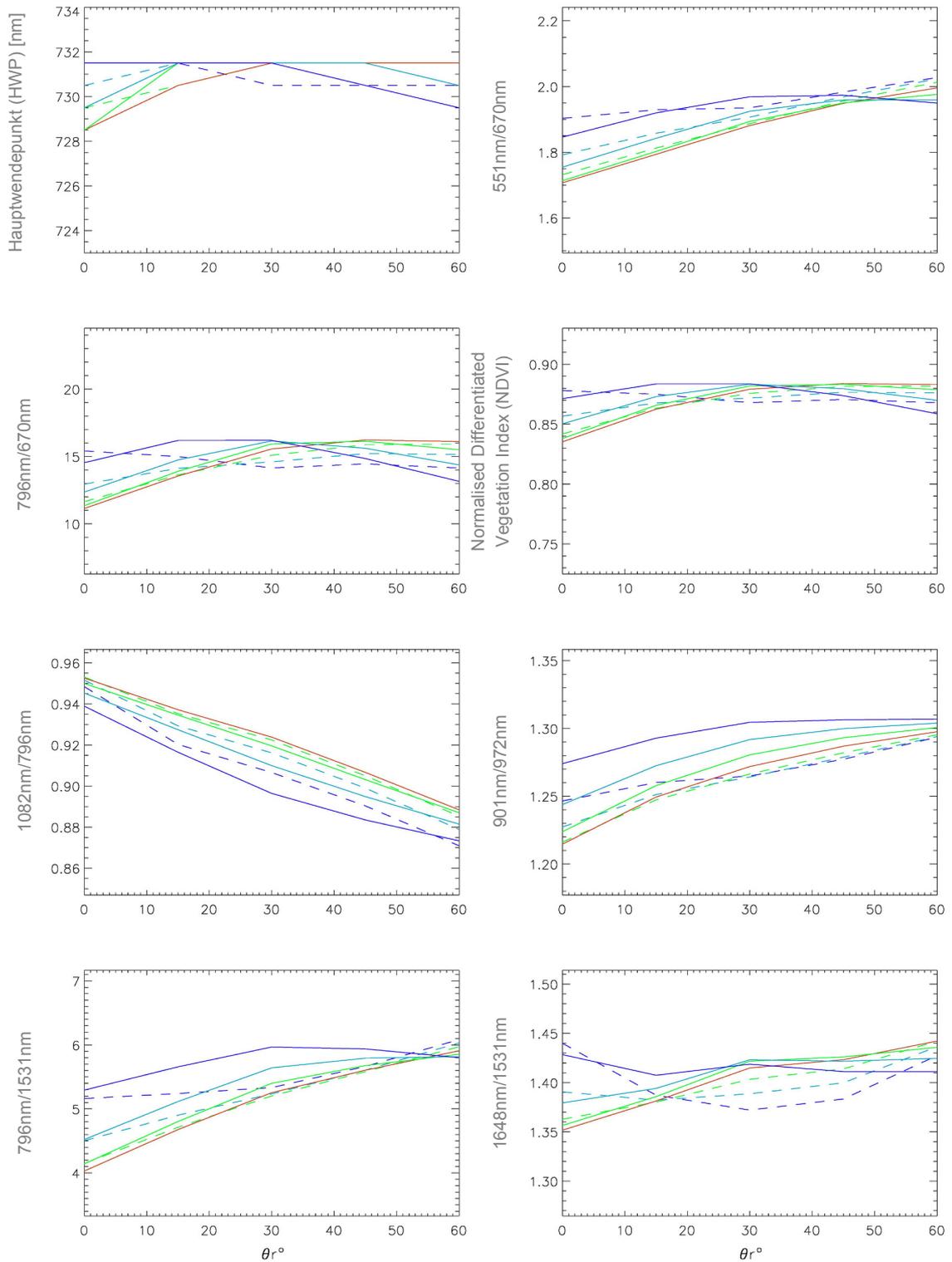
**Abbildung 149.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungszentwinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC71 in der Vegetationsperiode 2000.



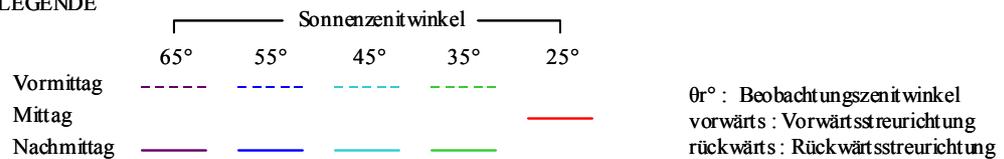
LEGENDE



**Abbildung 150.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungswinkeln im Tagesverlauf am Standort hohen Ertrags bei EC71 in der Vegetationsperiode 2001.



LEGENDE



**Abbildung 151.** Berechnung der im Kapitel 4.4.3 ausgewählten Vegetationsindizes aus der „Off Nadir“-Reflexion bei unterschiedlichen Sonnen- und Beobachtungswinkeln im Tagesverlauf am Standort niedrigen Ertrags bei EC71 in der Vegetationsperiode 2001.



Dr. Ioannis Manakos

geboren am 31.07.1973 in Athen, Griechenland



Er ist Diplomeologe und hat sich im Rahmen seiner Diplomarbeit in die Geographischen Informationssysteme (GIS) und Fernerkundung vertieft (1991-1995). Während seines Studiums war er für ein Jahr Stipendiat der griechischen Anstalt für Staatliche Stipendien (1992-1993).

Nach dem Abschluss seines Studiums war er im Januar 1996 als Gast-Wissenschaftler zur Weiterbildung bei der DLR (Institut für Optoelektronik) in Oberpfaffenhofen eingeladen.

Durch ein Prüfungsverfahren mit Diplomanden aus ganz Griechenland gelang es ihm im Jahr 1996 ein Stipendium für sein "Master of Science"-Aufbaustudium von der griechischen Anstalt für Staatliche Stipendien zu erhalten. Er hat sich mit folgender Thematik beschäftigt: „Die Anwendung der Empirischen Systeme der Fernerkundung und der Geographischen Informationssysteme für die Lösung der landwirtschaftlichen Probleme im Bereich Bodenerosion“ (1996-1998).

Während seiner Studienzeit war er in den Lehrveranstaltungen des jeweiligen Lehrstuhls tätig. Zusätzlich lehrte er GIS bei der griechischen Organization für Berufliche Ausbildung und Berufsförderung (1998) und gewann Erfahrungen im privaten Bereich aufgrund seiner Beschäftigung in einer GIS-Firma (1996).

Im Laufe seines Studiums in Griechenland war er Mitarbeiter bei folgenden Projekten (Zeitraumen 1993 –1998):

- Subprojekt „Landklassifizierung und laufende Registrierung des Vulkans der Insel Santorini durch die Anwendung von sichtbaren, nahen und thermischen infraroten Satellitenaufnahmen (LANDSAT 5 /TM) und Feldbetrachtungen“ des Projekts mit dem Titel „Vulkanische Gefahr, Santorini Vulkanisches Labor“. EU-Projekt von „EEC/DXXII-Environment“.
- Projekt „Schätzung der Schäden an landwirtschaftlichen Kulturen durch die Verwendung der Weltraumtechnologie und der Geographischen Informationssysteme (GIS)“, Aristoteles Universitaet von Thessaloniki, Griechische Landwirtschaftlichen Versicherungen.
- Projekt „Restauration des Mavrouda Sees“ unter der Leitung des Griechischen Zentrums für Feuchtgebiete.
- Projekt "ASTERISMOS" (Application of Space Technology to Environmental aspects of suRface mIning: a Surface Mining decisiOn support System) (ENV4-CT96-373), Aristoteles Universität von Thessaloniki.

Durch seine vielfältige Tätigkeit in unterschiedlichen Projekten und die Zusammenarbeit mit zahlreichen wissenschaftlichen Gruppen ergaben sich Veröffentlichungen in Nationalen und Internationalen Workshops und Symposien.

Seit Dezember 1998 ist er in Deutschland ansässig und als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Projektes „Informationssystem Kleinräumige Bestandesführung - Dürnast (IKB-Dürnast)“ (Technische Universität München, Deutsche Forschungsgemeinschaft) tätig. Das Produkt seiner vierjährigen Beschäftigung beim Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz sind zahlreiche (elf) Veröffentlichungen in Internationalen Workshops und „Proceedings“ sowie die vorliegende Doktorarbeit.