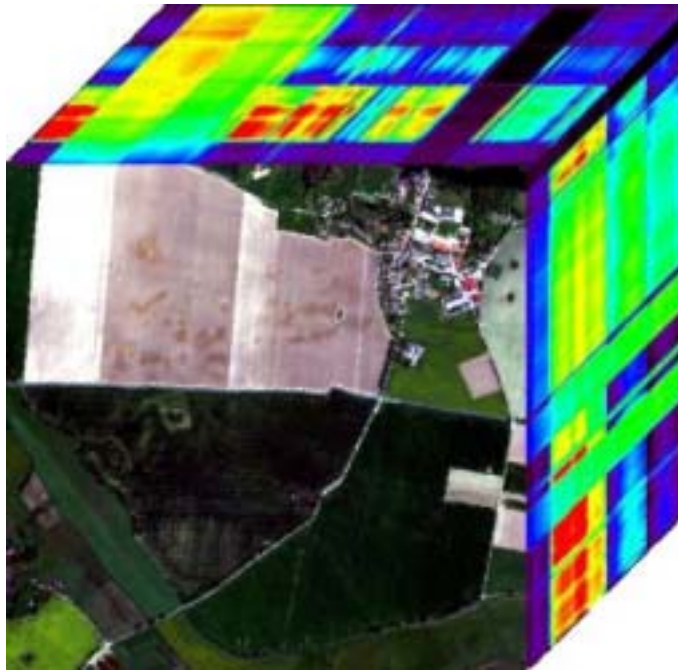


---

**Analyse spektroradiometrischer *in situ* Messungen als  
Datenquelle für die teilflächenspezifische  
Zustandsbeschreibung von Winterweizenbeständen**

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten  
der Georg-August-Universität zu Göttingen



vorgelegt von

**Stefan Erasmi**

aus Bremen

Göttingen im Mai 2002

---

D 7

Referentin/Referent: Prof. Dr. M. Kappas

Korreferentin/Korreferent: Prof. Dr. G. Gerold

Tag der mündlichen Prüfung: 17.06.2002

---

## VORWORT

Die vorliegende Arbeit ist als eigenständige Forschungsarbeit im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Geographischen Institut der Georg-August-Universität Göttingen entstanden. Sie befasst sich mit den Möglichkeiten und Grenzen der Erkennung und quantitativen Schätzung von biochemischen Pflanzenparametern aus spektralen Aufnahmen von Pflanzenbeständen durch direkte Bestandsmessungen im Gelände (*in situ* Spektroskopie).

Die Idee zu der Aufnahme des Themas kam im Frühjahr 1999, im Rahmen meiner Mitarbeit im Projekt ProSmart (DLR / Astrium) zur Evaluierung des Potenzials von Hyperspektraldaten zur Abbildung des Pflanzenzustands landwirtschaftlicher Flächen (ProSmart STICK) auf.

Zu diesem Zeitpunkt erklärte sich Herr Prof. Dr. Spönemann bereit, die Betreuung meiner Arbeit zu übernehmen, wofür ich mich herzlich bedanken möchte.

Seit der Neubesetzung der C3-Professur Kartographie und Fernerkundung am Geographischen Institut im Herbst 2000 hat mich Herr Prof. Dr. Kappas mit sehr viel Schwung und Motivation in meiner Arbeit vorangetrieben und die Betreuung meines Dissertationsvorhabens übernommen. Hierfür möchte ich Ihm und auch Prof. Dr. Gerold, der das Korreferat übernahm, an dieser Stelle ganz besonders danken.

Der Großteil der Datenerhebungen und auch der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit basiert auf Untersuchungen im Untersuchungsgebiet "Imbshausen", im südniedersächsischen Landkreis Northeim. Die Auswahl dieses Testgebiets habe ich der Fa. GEG (Herr Bernd Schieche) zu verdanken, deren enge Zusammenarbeit mit dem Betriebsführer der Ländereien mir die Möglichkeit bot, hier tätig zu werden. An dieser Stelle möchte ich mich deshalb auch sehr herzlich bei Herrn Carl-Christian von Plate Freiherr von Strahlenheim bedanken, der mir nicht nur seine Getreideschläge zur freien "Wilderung" zur Verfügung stellte, sondern mit großem Interesse meine Arbeiten verfolgte und mir in vielen Gesprächen einen Einblick in die Sichtweise eines Praktikers bezüglich des Sinns (oder Unsinns) neuer Technologien in der Landwirtschaft gab.

Die Laboruntersuchungen der Pflanzen- und Bodenproben für die Arbeiten in Imbshausen wurden durch die Universitätsstiftung der Georg-August-Universität finanziert. Für die Durchführung der Arbeiten danke ich der gesamten Laborbesetzung des Geographischen Instituts. Die digitalen Höhendaten wurden vom Landesamt für Landesvermessung und Geobasisinformation, Hannover (LGN) zur Verfügung gestellt, die digitalen Bodendaten stammen vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (NLfB). Die Luftbildbefliegung wurde von Lars Gleitsmann durchgeführt.

Die Daten der Hyperspektralbefliegungen (HyMap<sup>®</sup>) im Testgebiet "Neetzow" wurden mir freundlicherweise von Frau Edith Haveresch (Fa. Astrium) für meine weiterführenden Auswertungen zur Verfügung gestellt.

Schließlich gilt mein Dank einer großen Anzahl von Freunden und Bekannten, die mir in jeder Situation behilflich waren, und ohne die diese Arbeit in dieser Form nicht zustande gekommen wäre. Bei den Feldarbeiten konnte ich jederzeit auf die Unterstützung der studentischen Mitarbeiter setzen (Kathi Feiden, Michael Härtel, Ortwin Kessels, Eva Nather und Gerald Steilen), die mit viel persönlichem Engagement die Geländearbeiten begleitet haben. Henning Hoffmann und Norbert Etzrodt möchte ich für die anregenden Diskussionsrunden zur Terminologie in der Fernerkundung danken. Für die kritische Durchsicht des Manuskripts bin ich Jens-Peter Krüger, Elke Fischer, Anke Brötje und Holger Schmidt, sowie ganz besonders Annette Dathe dankbar.

---

Am Ende einer langen Reihe von Helfern, die sich für mich und das Fortkommen meiner Arbeit eingesetzt haben, stehen die Menschen, die sich nicht einreihen lassen, da Sie über alledem stehen. Meine Eltern, Johann und Annelore Erasmi, haben mich während des Studiums der Geographie großzügig und uneigennützig unterstützt und mir so erst die Tür zu meiner weiteren Forschungstätigkeit geöffnet. Hierfür werde ich Ihnen immer dankbar sein. Mein allergrößter Dank gilt meiner Lebensgefährtin, Tanja Lange, die mich mit unglaublich viel Geduld, Vertrauen und Zuversicht immer wieder motiviert und vorangetrieben hat und in jeder Phase der Arbeit nicht nur für mich da war, sondern unersetzlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat und uns das schönste Geschenk unseres Lebens gemacht hat:

HANNAH.

Göttingen, im Mai 2002

## INHALTSVERZEICHNIS

I.	VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN .....	IV
II.	VERZEICHNIS DER TABELLEN .....	VII
III.	VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN.....	IX
IV.	VERZEICHNIS DER VARIABLEN .....	X
<b>1</b>	<b>EINFÜHRUNG UND ZIELSETZUNG.....</b>	<b>1</b>
1.1	<b>Entwicklungstrends im Kulturpflanzenbau .....</b>	<b>2</b>
1.2	<b>Fernerkundung für den teilflächenspezifischen Pflanzenbau.....</b>	<b>6</b>
1.3	<b>Aufbau und Ziel der Arbeit.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>SPEKTROSKOPIE NATÜRLICHER OBERFLÄCHEN .....</b>	<b>13</b>
2.1	<b>Begriffseingrenzung / Definitionen.....</b>	<b>13</b>
2.1.1	Strahlungsphysikalische Größen .....	14
2.1.2	Spektrale Reflexion .....	17
2.2	<b>Ursachen spektraler Absorption in flüssigen und festen Körpern.....</b>	<b>20</b>
2.3	<b>Informationsgehalt optischer Strahlung.....</b>	<b>27</b>
2.3.1	Interaktion optischer Strahlung mit Vegetation.....	28
2.3.1.1	Absorptionsprozesse.....	28
2.3.1.2	Reflexionsprozesse .....	32
2.3.2	Sonstige natürliche Faktoren .....	35
2.3.2.1	Interaktion optischer Strahlung mit Böden.....	35
2.3.2.2	Interaktion solarer Strahlung in der Atmosphäre .....	38
<b>3</b>	<b>UNTERSUCHUNGSGEBIETE UND TESTFLÄCHEN.....</b>	<b>41</b>
3.1	<b>Beschreibung der Untersuchungsgebiete.....</b>	<b>41</b>
3.1.1	Das Untersuchungsgebiet "Imbshausen" (Niedersachsen).....	41
3.1.2	Das Untersuchungsgebiet "Neetzow" (Mecklenburg-Vorpommern).....	45
3.2	<b>Auswahl und Beschreibung der Testflächen .....</b>	<b>46</b>
3.2.1	Anbaufrüchte .....	46
3.2.2	Pflanzenzusammensetzung und -ernährung .....	47
<b>4</b>	<b>SPEKTRALSENSOREN UND ANDERE AUFNAHMESYSTEME.....</b>	<b>51</b>
4.1	<b>ASD FieldSpec® Pro JR Spektrometer .....</b>	<b>51</b>
4.1.1	Technische Beschreibung .....	52
4.1.2	Zubehör.....	53
4.1.2.1	Spectralon®-Referenzstandard.....	53
4.1.2.2	Quartz-Tungsten-Halogen-Lampe.....	54
4.1.3	Systemspezifische Kalibrierung .....	55
4.2	<b>HyMap®-Hyperspektralscanner .....</b>	<b>59</b>
4.3	<b>Sonstige Datenerfassungsgeräte.....</b>	<b>60</b>
4.3.1	Luftbildaufnahmen .....	60
4.3.2	Elektrische Leitfähigkeit.....	62

<b>5</b>	<b>KONZEPT ZUR DATENERFASSUNG.....</b>	<b>65</b>
<b>5.1</b>	<b>Referenzdatenerhebung .....</b>	<b>65</b>
5.1.1	Verfahren der Probenahme .....	65
5.1.2	Pflanzenparameter.....	67
5.1.3	Bodenparameter .....	69
5.1.4	Sonstige Standortparameter .....	71
5.1.5	Beurteilung der Referenzdaten.....	74
<b>5.2</b>	<b>Spektroradiometrische Messungen.....</b>	<b>76</b>
5.2.1	Vorüberlegungen zur Reflexionsmessung .....	76
5.2.2	Messaufbau für die Reflexionsmessungen.....	77
5.2.2.1	Allgemeine Aufnahmekonfiguration .....	77
5.2.2.2	<i>in situ</i> Messungen .....	78
5.2.2.3	Labormessungen .....	80
<b>6</b>	<b>STANDARDISIERUNG SPEKTRORADIOMETRISCHER MESSWERTE .....</b>	<b>83</b>
<b>6.1</b>	<b>Qualitative Analyse der Spektralsignaturen.....</b>	<b>86</b>
<b>6.2</b>	<b>Adaptive Glättung der Funktionskurve .....</b>	<b>88</b>
<b>6.3</b>	<b>Kalibrierung der Messdaten.....</b>	<b>90</b>
6.3.1	Vorüberlegungen zur Kalibrierung .....	90
6.3.2	Sonnenstands- und Reliefkorrektur.....	93
6.3.3	Entmischung spektraler Komponenten .....	95
<b>6.4</b>	<b>Deskriptive Auswertung der kalibrierten Messdaten .....</b>	<b>97</b>
<b>6.5</b>	<b>Parametrisierung der Reflexionsmessungen.....</b>	<b>101</b>
6.5.1	Duale Spektralindizes zur Abbildung natürlicher Oberflächen .....	101
6.5.2	Parametrisierung des Rot-Infrarot-Anstiegs .....	102
<b>6.6</b>	<b>Funktionsanalyse der Spektralsignatur.....</b>	<b>105</b>
6.6.1	Ableitung lokaler Extrema .....	106
6.6.2	Skalierung durch Frequenztransformationen .....	111
6.6.2.1	Kontinuumtransformation.....	111
6.6.2.2	Normierung auf die Absorptionstiefe .....	114
6.6.2.3	Normierung auf die Steigung.....	114
6.6.2.4	Sonstige Skalierungsansätze im Frequenzbereich .....	116
6.6.3	Skalierung durch Ortstransformationen .....	119
<b>6.7</b>	<b>Zusammenfassung und Bewertung der Standardisierungsansätze .....</b>	<b>122</b>
<b>7</b>	<b>MULTIVARIATE ANALYSE SPEKTRORADIOMETRISCHER MESSUNGEN ZUR ABLEITUNG BIOCHEMISCHER ZUSTANDSPARAMETER.....</b>	<b>123</b>
<b>7.1</b>	<b>Vorüberlegungen zur multivariaten Datenauswertung.....</b>	<b>125</b>
<b>7.2</b>	<b>Dimensionsreduktion der Eingangsdaten .....</b>	<b>127</b>
7.2.1	Kausale und funktionale Zusammenhänge .....	127
7.2.2	Resampling.....	128
<b>7.3</b>	<b>Modellbildung für die Spektralanalyse von Winterweizenbeständen.....</b>	<b>130</b>
7.3.1	Korrelationsanalyse.....	130
7.3.1.1	Multikollinearitäten der Spektralvariablen .....	130
7.3.1.2	Korrelationsspektren .....	132
7.3.2	Multiple Regressionsanalyse.....	135

---

7.3.3	Anwendung der Regressionsmodelle .....	137
<b>7.4</b>	<b>Modellierungsergebnisse und ihre Diskussion .....</b>	<b>139</b>
7.4.1	Regressionsanalyse spektraler Merkmale im sichtbaren Bereich und im nahen Infrarot (VNIR).....	139
7.4.1.1	Einfache Regression auf Basis der Spektralindizes.....	139
7.4.1.2	Multiple Regression auf Basis der Spektralvariablen .....	142
7.4.2	Regressionsanalyse spektraler Merkmale im kurzwelligen Infrarot (SWIR).....	145
7.4.3	Regressionsanalyse spektraler Merkmale im gesamten Bereich der solaren Reflexion (VNIR/SWIR).....	147
7.4.4	Regressionsanalyse unterschiedlicher simulierter Bandbreiten.....	150
7.4.5	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Regressionsanalyse.....	152
7.4.6	Übertragbarkeit der Modelle.....	156
<b>7.5</b>	<b>Abschließende Beurteilung der Verfahren zur Zustandsbeschreibung von Pflanzenbeständen aus Spektraldaten.....</b>	<b>159</b>
<b>8</b>	<b>INTEGRATION DER MODELLIERUNGSERGEBNISSE IN EINEN VERFAHRENSABLAUF FÜR DAS TEILSCHLAGMANAGEMENT .....</b>	<b>163</b>
8.1	Regionalisierung der Pflanzen- und Standortparameter .....	163
8.2	Verfahren zur Abschätzung des Düngerbedarfs.....	166
8.3	Spektrale Information zur Beschreibung der teilschlagspezifischen Nährstoffmobilität und Standortvariabilität im Rahmen der Düngbedarfsermittlung.....	168
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND AUSBLICK .....</b>	<b>171</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>I</b>

## I. Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1:	Anteil einzelner Produkte am Produktionswert der pflanzlichen Erzeugnisse .....	3
Abb. 2:	Auswahl optischer Fernerkundungssysteme und ihrer geometrischen, zeitlichen und spektralen Auflösung (Kreisgröße) .....	7
Abb. 3:	Taxonomie von Fernerkundungsaufnahmen und deren Potenzial (von außen nach innen zunehmend) für <i>precision farming</i> Anwendungen .....	8
Abb. 4:	Konzept des Hydro N-Sensors .....	9
Abb. 5:	Radiometrische Strahlungsgrößen: (a) Bestrahlungsstärke $E$ , (b) spezifische Ausstrahlung $M$ , (c) Strahlstärke $I$ , (d) Strahldichte $L$ .....	16
Abb. 6:	Reflexionsgeometrie einer ebenen Oberfläche (verändert nach MILTON 1987) ...	18
Abb. 7:	Energieniveauschemata von Atomen (links) und Molekülen (rechts) .....	22
Abb. 8:	Schwingungsbanden (Grundschwingungen) und Elektronenenergieniveaus des Wassermoleküls .....	24
Abb. 9:	Absorptionsspektrum von Chlorophyllkomponenten .....	27
Abb. 10:	Schematischer Blattaufbau und mögliche Interaktionen elektromagnetischer Strahlung .....	29
Abb. 11:	Spektrale Reflexion ausgewählter organischer Bestandteile von Pflanzen im SWIR .....	30
Abb. 12:	Typische spektrale Reflexionskurve für Winterweizen und Spektralkanäle (Bandbreiten) ausgewählter Erderkundungssatelliten .....	33
Abb. 13:	Spektralsignaturen unterschiedlicher Bodenarten und deren Hauptmerkmale ....	37
Abb. 14:	Das solare Spektrum mit den atmosphärischen Absorptionsbanden .....	39
Abb. 15:	Geologie im Untersuchungsgebiet Imbshausen .....	42
Abb. 16:	Lage der Testflächen und Bodenartenkartierung im Untersuchungsgebiet Imbshausen .....	44
Abb. 17:	Lage der Testflächen und Bodenartenkartierung im Untersuchungsgebiet Neetzow .....	45
Abb. 18:	Entwicklungsstadien und Maßnahmen der Bestandsführung bei Getreide .....	47
Abb. 19:	Typische Spektralsignaturen einer Spectralon <sup>®</sup> und einer BaSO <sub>4</sub> -Oberfläche ....	54
Abb. 20:	Signal-to-Noise-Ratio (SNR) des ASD FieldSpec <sup>®</sup> Pro JR ( $n=120$ ; $\Delta t=10$ s) .....	56
Abb. 21:	Spektrale Merkmale einer Funktionssignatur am Beispiel einer Gaußschen Resonanzfunktion .....	58
Abb. 22:	Empfindlichkeitsschwankungen des ASD FieldSpec Pro JR ( $n=120$ , $\Delta t=30$ s) ...	58
Abb. 23:	Ausschnitt aus der HyMap <sup>®</sup> -Befliegung, dargestellt als Bildwürfel .....	59
Abb. 24:	Entzerrte Luftbildaufnahme der Luftbildbefliegung am 16.07.2001 im Untersuchungsgebiet Imbshausen (Schlag: "Unter dem Echter Wege") .....	61
Abb. 25:	Messprinzip der Elektromagnetik .....	62
Abb. 26:	Messanordnung für die Kartierung der elektrischen Leitfähigkeit (EM-38, ATB-Bornim e. V.) .....	63
Abb. 27:	Spektroradiometrische und pflanzenbauliche Erhebungen in den Untersuchungsgebieten .....	65
Abb. 28:	Stichprobenverteilung im Testgebiet Imbshausen .....	66
Abb. 29:	Aufbau der Klimaloggerstation im Untersuchungsgebiet Imbshausen .....	71
Abb. 30:	Witterungsverlauf im Untersuchungsgebiet Imbshausen für den Erhebungszeitraum 2001 (Niederschlag: Summe 0-24 Uhr, Temperatur: Mittelwert 0-24 Uhr) .....	72
Abb. 31:	Witterungsparameter Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit während der ASD FieldSpec <sup>®</sup> Messungen im Untersuchungsgebiet Imbshausen .....	73
Abb. 32:	Häufigkeitsverteilung ausgewählter Konzentrationen von Pflanzenproben (Datensatz: IH_1, $n=42$ ) .....	74



Abb. 33:	Geometrische Konstellation des Sichtfelds für das ASD FieldSpec <sup>®</sup> Pro (Standardkonfiguration mit FOV=25°) .....	77
Abb. 34:	Messanordnung und Durchführung der <i>in situ</i> Messungen (ASD FieldSpec <sup>®</sup> Pro).. .....	78
Abb. 35:	Versuchsaufbau für die Labormessungen mit dem ASD FieldSpec <sup>®</sup> Pro.....	80
Abb. 36:	Ablaufschema der Datenprozessierung für die ASD FieldSpec <sup>®</sup> -Messungen .....	85
Abb. 37:	Mittlere spektrale Variationskoeffizienten der Parallelmessungen ( $n=4$ ) eines Getreidebestands mit dem ASD FieldSpec <sup>®</sup> Pro JR.....	87
Abb. 38:	Glättung der Spektralsignaturkurve mit unterschiedlichen Filtern (11-Punkt-Mittelwertfilter, 11-Punkt-Gaußfilter, 11-Punkt-Savitzky-Golay-Filter).....	89
Abb. 39:	Morphologie eines Winterweizenbestands (Senkrechtaufnahme) zum Zeitpunkt der spektroradiometrischen <i>in situ</i> Messungen (10.05.2001).....	91
Abb. 40:	Spektrale Reflexionskurve im NIR für das kalibrierte Originalspektrum und das "entmischte" Weizenspektrum.....	96
Abb. 41:	Graphische Darstellung der deskriptiv statistischen Merkmale der <i>in situ</i> Messungen von Weizenbeständen ("Contur") zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien (EC) .....	98
Abb. 42:	Graphische Darstellung der deskriptiv statistischen Merkmale der Labormessungen von Winterweizen ("Contur") zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien .....	99
Abb. 43:	Parametrisierung des REI durch Linearisierung (die Gleichungsparameter gehen aus Gl. 25 und Gl. 26 hervor) .....	103
Abb. 44:	Lage des Hauptwendepunkts nach unterschiedlichen Interpolationsmethoden ..	104
Abb. 45:	Deskriptive Merkmale einer Spektralsignatur .....	105
Abb. 46:	Bestimmung lokaler Minima durch Differentialanalyse .....	107
Abb. 47:	Lage lokaler Extrema (Durchschnittswerte) spektroradiometrischer <i>in situ</i> (a) und Labormessungen (b) von Winterweizenbeständen bzw. -proben.....	108
Abb. 48:	Lage lokaler Minima (x) der Funktionskurven sowie die Variationskoeffizienten (orange) spektroradiometrischer <i>in situ</i> Messungen für alle Messpunkte (Weizen, $n=74$ ) .....	110
Abb. 49:	Skalierung spektraler Reflexionswerte durch Kontinuum-Transformation .....	111
Abb. 50:	Funktionsparameter für die Skalierung der Kontinuum-transformierten Absorptionsspektren durch Normierung auf die Bandtiefe ( <i>BNC</i> ) und auf die Steigung ( <i>SNC</i> ) .....	115
Abb. 51:	Vergleich der Kontinuum-basierten Skalierungsverfahren .....	116
Abb. 52:	Skalierung der <i>in situ</i> Messungen durch lineare Frequenztransformation .....	118
Abb. 53:	Häufigkeitsverteilung der Reflexionsfaktoren ( <i>in situ</i> Messungen) in Abhängigkeit vom Skalierungsverfahren (Frequenzbereich, $n=42$ ).....	118
Abb. 54:	Skalierung durch lineare Ortstransformation.....	121
Abb. 55:	Häufigkeitsverteilung der Reflexionsfaktoren in Abhängigkeit vom Skalierungsverfahren (Ortsbereich, $n=26$ ) .....	121
Abb. 56:	Wesentliche Elemente des Verfahrensablaufs zur Modellierung von Pflanzenkomponenten aus spektraler Information .....	124
Abb. 57:	Dimensionsreduktion durch Resampling im Wellenlängenbereich .....	129
Abb. 58:	Häufigkeitsverteilung spektraler Merkmale, (a) Reflexionsfaktor bei $\lambda_{670}$ , (b) 1. Ableitung bei $\lambda_{670}$ , (c) RedEdge-Index ( $n=42$ ).....	130
Abb. 59:	Korrelogramme für Makronährelemente von Winterweizen und deren skalierten Reflexionsfaktoren ( $R_{FV}$ ), (a) <i>in situ</i> Messungen, (b) Labormessungen ( $n = 35$ )	133
Abb. 60:	Korrelationspektren für $P_{tot}$ -Gehalt und spektrale Merkmale von <i>in situ</i> Messungen .....	134
Abb. 61:	Ablaufschema für die Regressionsanalyse .....	137

---

Abb. 62:	Streudiagramme für den Zusammenhang zwischen Vegetationsindizes ( <i>NDVI</i> ) und Nährelementgehalten (N, P, K).....	141
Abb. 64:	Spektralindizes (links: <i>REI</i> ; rechts: <i>NDVI</i> ) von Winterweizenbeständen im Untersuchungsgebiet "Neetzow" .....	142
Abb. 65:	Faktorladungen (Korrelationskoeffizienten) der ersten drei Hauptkomponenten für einen Datensatz skaliertes Winterweizenspektren ( $R_{FV}$ ) (Imbshausen, Schlag: Unter dem Echter Wege).....	154
Abb. 66:	Lage der Wellenlängenkanäle mit der höchsten erklärten Varianz der Nährelementkonzentrationen von Winterweizenbeständen ( <i>in situ</i> Messungen)	155
Abb. 67:	Streudiagramme der vorhergesagten ( $c_{pred}$ ) und gemessenen ( $c_{meas}$ ) Konzentrationen ausgewählter Nährelemente (N, P, K) durch interne Validierung. ....	157
Abb. 68:	Interpolation der Hauptnährelementkonzentrationen (N-, P-, K-Pflanze) aus den vorhergesagten ( $c_{pred}$ ) und den gemessenen ( $c_{meas}$ ) Werten für einen Ausschnitt des Schlags "Unter dem Echter Wege" (Imbshausen) .....	164
Abb. 69:	Vergleich der flächenhaften Verbreitung der N- und K- Konzentrationen im Boden und in der Pflanze auf Basis der gemessenen Werte ( $c_{meas}$ ) für einen Ausschnitt des Schlags "Unter dem Echter Wege" (Imbshausen).....	165
Abb. 70:	Ertrags- und Leitfähigkeitskartierung (ECa-Boden) für einen Ausschnitt des Schlags "Unter dem Echter Wege" (Imbshausen) .....	166
Abb. 71:	Mehrebenen-Konzept zur Bewertung der Standortvariabilität von Winterweizenschlägen .....	169
Abb. 72:	Flächenhafte Schätzung des pflanzenverfügbaren $N_{min}$ -Gehalts aus der multivariaten Analyse von <i>in situ</i> Spektralmessungen (EC-32, Schlag: "Unter dem Echter Wege") .....	170

## II. Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1:	Der optische Bereich des elektromagnetischen Spektrums .....	13
Tab. 2:	Größen und Einheiten der Spektroradiometrie (nach ERB 1989, SCHMIDT 2000, u.a.) .....	17
Tab. 3:	Schwingungsprozesse und Absorptionsbanden von flüssigem Wasser .....	25
Tab. 4:	Absorptionsmerkmale biochemischer Pflanzenbestandteile im VNIR/SWIR-Bereich (nach CURRAN 1989) .....	31
Tab. 5:	Spektrale Schwingungsabsorptionsmerkmale ausgewählter Molekülbindungen und Ionen im NIR/SWIR-Bereich .....	36
Tab. 6:	Übersicht über die untersuchten Winterweizenschläge .....	46
Tab. 7:	Elementarzusammensetzung von Weizenbestandteilen .....	48
Tab. 8:	Standard-Spezifikationen des ASD FieldSpec <sup>®</sup> Pro JR .....	52
Tab. 9:	Physikalische Eigenschaften des Spectralon <sup>®</sup> -Reflexionsstandards SRT-99-100 .....	53
Tab. 10:	Technische Daten und überflugspezifische Systemkonfiguration des HyMap <sup>®</sup> -Sensors .....	60
Tab. 11:	Referenzdatenerhebung (Pflanze) während der Feldkampagnen .....	67
Tab. 12:	Deskriptive Statistik der erhobenen Pflanzendaten (Imbshausen) .....	68
Tab. 13:	Deskriptive Statistik der erhobenen Pflanzendaten (Neetzow) .....	68
Tab. 14:	Deskriptive Statistik der erhobenen Bodendaten (Imbshausen_I) .....	70
Tab. 15:	Interkorrelationen (Korrelationskoeffizient $r$ nach PEARSON) ausgewählter Pflanzenparameter (Datensatz: IH_I) .....	75
Tab. 16:	Interkorrelationen (Korrelationskoeffizient $r$ nach PEARSON) ausgewählter Bodenparameter (Datensatz: IH_I) .....	75
Tab. 17:	Kovarianzmatrix ausgewählter Boden- und Pflanzenparameter (Datensatz: IH_I, $n=40$ ) .....	75
Tab. 18:	Abundanzen der spektral relevanten Bestandskomponenten für die spektrale Entmischung .....	95
Tab. 19:	Übersicht ausgewählter dualer Spektralindizes .....	101
Tab. 20:	Lokale Extrema der Signaturkurven von Winterweizen .....	109
Tab. 21:	Lokale Minima der Feldspektren und daraus abgeleitete Referenzwellenlängen für die Kontinuumtransformation von Vegetationsspektren (Frischmasse) .....	112
Tab. 22:	Lokale Minima der Laborspektren und daraus abgeleitete Referenzwellenlängen für die Kontinuumtransformation von Vegetationsspektren (Trockenmasse) .....	113
Tab. 23:	Kontinuumbereiche für die Vegetationsspektroskopie zur Schätzung biochemischer Komponentenkonzentrationen .....	113
Tab. 24:	Spektraldatensatz für die multivariate Analyse .....	128
Tab. 25:	Charakteristika der durch Resampling simulierten Spektralbänder für unterschiedliche Hyperspektralsensoren .....	129
Tab. 26:	Multikollinearitäten der Spektralvariablen (580 – 1280 nm) .....	131
Tab. 27:	Zustandsform ausgewählter Nährelemente in der Frischmasse höherer Pflanzen ... ..	132
Tab. 28:	Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ) für die einfache lineare Regression von Pflanzenparametern aus Spektralindizes für verschiedene Wachstumsstadien ...	140
Tab. 29:	Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ) für die einfache lineare Regression von Pflanzenparametern aus Spektralindizes für verschiedene simulierte Bandbreiten (EC-32) .....	141
Tab. 30:	MLR- bzw. PCR-Regressionsparameter für Makronährelemente und Trockenmasse in Abhängigkeit von der Spektraltransformation ( <i>in situ</i> und Labor-Messungen im VNIR-Bereich) .....	144

---

Tab. 31:	PCR- bzw. MLR- Regressionsparameter für Makronährelemente und Trockenmasse in Abhängigkeit von der Spektraltransformation ( <i>in situ</i> und Labor-Messungen im SWIR-Bereich) .....	146
Tab. 32:	MLR- bzw. PCR- Regressionsparameter für Makronährelemente und Trockenmasse in Abhängigkeit von der Spektraltransformation ( <i>in situ</i> und Labor-Messungen im VNIR/SWIR-Bereich) .....	148
Tab. 33:	PCR- bzw. MLR- Regressionsparameter für Mikronährelemente in Abhängigkeit von der Spektraltransformation ( <i>in situ</i> und Labor-Messungen im VNIR/SWIR-Bereich) .....	150
Tab. 34:	Güte der Regressionsmodellierung ausgewählter Pflanzenparameter in Abhängigkeit von der spektralen Bandbreite .....	151
Tab. 35:	Konzentrations-Schätzungen der Makronährelemente und der Trockenmasse aus der Regressionsanalyse für das jeweils beste Spektralderivat ( <i>in situ</i> Messungen). .....	152
Tab. 36:	Konzentrations-Schätzungen der Mikronährelemente aus der Regressionsanalyse für das jeweils beste Spektralderivat ( <i>in situ</i> und Labormessungen) .....	153
Tab. 37:	Regressionsparameter ausgewählter Schätzmodelle für den VNIR und den SWIR-Bereich (EC-32) .....	155
Tab. 38:	Ergebnisse der Kreuzvalidierung für ausgewählte Nährelemente und unterschiedliche Wachstumsstadien von Winterweizen (VNIR/SWIR-Bereich) .....	157
Tab. 39:	Multiple lineare Regression mit Hilfe von Ableitungsspektren für die Untersuchungsgebiete "Imbshausen" (HyMap <sup>®</sup> simuliert) und "Neetzow" (HyMap <sup>®</sup> -Kampagne 1999) .....	158
Tab. 40:	Vergleich der Regressionsparameter verschiedener Schätzmodelle (MLR <sub>S</sub> ) zur Vorhersage des Stickstoffgehalts frischer und getrockneter Biomasse (VNIR/SWIR-Bereich) .....	161

### III. Verzeichnis der Abkürzungen

ACCP	Accelerated Chemistry Canopy Program
ASD	Analytical Spectral Devices, Inc.
BaSO <sub>4</sub>	Bariumsulfat
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
BRF	Bidirectional Reflectance Factor
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DWD	Deutscher Wetterdienst
dm	Trockenmasse (dry matter)
DOY	Day of Year (Kalendertag)
EC	European Code
ECa	korrigierte Elektrische Leitfähigkeit (electric conductivity adjusted)
EL-SOL	correction of <b>e</b> levation and <b>s</b> olar inclination for spectroscopic measurements
FOV	Field of View (Sichtfeld)
FWHM	Halbwertsbreite (full width at half maximum)
GPS	Global Positioning System
HK	Hauptkomponente/n
HWP	Hauptwendepunkt (des Rot-Infrarot-Anstiegs der spektralen Reflexion)
HyMap	Hyperspectral Mapper
OES -ICP	Optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma
InGaAs	Indium-Gallium-Arsenid
IR	Infrarot
LGN	Landesamt für Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen
MIR	Mittleres Infrarot
MLR	multiple lineare Regression (multiple linear regression)
MLR <sub>E</sub>	multiple lineare Regression (Einschlussverfahren)
MLR <sub>S</sub>	schrittweise multiple lineare Regression
mtw	Mittelwert
NASA	National Institute for Space Applications
NIR	Near Infrared
NIST	National Institute of Standards and Technology
NLfB	Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
PAR	photosynthetisch aktive Strahlung (photosynthetic active radiation)
PCA	Hauptkomponentenanalyse (principal component analysis)
PCL	Faktorladungen (principal component loadings)
PCR	Hauptkopponentenregression (principal component regression)
PTFE	Polytetrafluoroethylen
SI	Système International (d' Unités)
SLR	einfache lineare Regression (simple linear regression)
SWIR-1	Short Wave Infrared / kurzwelliges Infrarot, Teil 1 (1000 – 1800 nm)
SWIR-2	Short Wave Infrared / kurzwelliges Infrarot, Teil 2 (1800 – 2500 nm)
TIR	Thermales Infrarot
UG	Untersuchungsgebiet
UV	Ultraviolett
VIS	Visible / sichtbares Licht
VNIR	Visible-Infrared (sichtbares Licht und Infrarot)
WL	Wellenlänge/n

#### IV. Verzeichnis der Variablen

##### Anmerkungen:

⇒ sortiert nach kleinen und großen, griechischen und lateinischen Zeichen

⇒  $i, j, n, m$  werden allgemein als Laufvariablen verwendet

##### griechisch, kleine Zeichen:

$\beta$	Neigung der Ebene
$\beta_i$	partieller Regressionskoeffizient der Variablen $X_i$ ( $i=1, \dots, m$ )
$\delta$	Deklination der Sonne
$\varepsilon$	Zufallsfehler (Residuum)
$\gamma$	Exposition der Ebene
$\varphi$	geographische Breite
$\varphi_r$	Azimutwinkel der gerichteten solaren Reflexion
$\varphi_t$	Azimutwinkel Referenzmessung
$\lambda$	Wellenlänge
$\lambda_{REI}$	berechnete Wellenlänge des HWP
$\mu$	Extinktionskoeffizient
$\theta$	Zenitwinkel
$\theta_\beta$	Sonneneinfallswinkel
$\theta_f$	Öffnungswinkel des Sichtfelds
$\theta_r$	Zenitwinkel der gerichteten solaren Reflexion
$\theta_t$	Zenitwinkel Referenzmessung
$\rho$	Reflexionsgrad
$\rho(\theta_r, \varphi_r)$	richtungsabhängiger Reflexionsgrad
$\sigma$	Standardabweichung
$\sigma^2$	Varianz
$\omega$	Stundenwinkel (Sonnenhöchststand = $0^\circ$ , jede Stunde entspricht $15^\circ$ )
$\beta$	Neigung der Ebene
$\delta$	Deklination der Sonne

##### griechisch, große Zeichen:

$\Phi$	Strahlungsfluss Normalen auf die Ebene)
$\Phi(x, c)$	transmittierter Strahlungsfluss
$\Phi_0$	in ein Medium eindringender Strahlungsfluss
$\Phi_r$	reflektierter Strahlungsfluss
$\Phi_t$	einfallender Strahlungsfluss
$\Omega$	Raumwinkel

##### lateinisch, kleine Zeichen:

$c$	Lichtgeschwindigkeit [m/s]
$c$	Stoff-Konzentration
$c_{meas}$	gemessene Konzentration (Labor)
$c_{pred}$	geschätzte Konzentration (Spektrometer)
$c_0$	Normierungskoeffizient für den Bezugswinkel $\theta_0$
$c_i$	Filterkoeffizient für den Datenpunkt $i$
$cv$	Variationskoeffizient (coefficient of variation)
$h$	Planck'sches Wirkungsquantum [ $Ws^2$ ]

$h$	Stunde des Tages (wahre Sonnenzeit)
$h_M$	Aufnahmehöhe über dem Objekt (Messhöhe)
$k$	Maß für die Stärke des Korrekturfaktors
$k$	Regressionskonstante
$k_{P,B,S}$	Abundanz der Spektralkomponenten
$m$	Variable zur Festlegung der Filterbreite ( $=2m+1$ )
$min_{lok}$	lokales Minimum des Funktionsabschnitts
$min_{lok}$	lokales Minimum
$n$	Anzahl der Parallelmessungen
$r$	Korrelationskoeffizient (nach PEARSON)
$r^2$	Bestimmtheitsmaß
$r$	Radius
$r_O$	Radius der Objektfläche
$t$	Zeit
$x$	Eindringtiefe / Schichtdicke des Mediums

lateinisch, große Zeichen:

$BNC$	Absorption, normiert auf die Bandtiefe (band depth normalized to depth at absorption center)
$CR$	Kontinuum-tranformierter Absorptionswert
$D_a$	Absorptionstiefe an der Wellenlänge $\lambda_a$
$D_m$	Absorptionstiefe an der Zentrumswellenlänge $\lambda_m$
$DN$	Messwert (digital number)
$E$	Bestrahlungsstärke aus dem Halbraum
$F_O$	Fläche des Objektausschnitts
$L$	gerichtete reflektierte Strahldichte
$L_r$	gerichtete reflektierte Strahldichte (Objekt)
$L_t$	gerichtete reflektierte Strahldichte (Referenz)
$M$	spezifische Ausstrahlung
$N$	Normalisierungsfaktor, der sich aus der Summe der Koeffizienten $c_i$ ergibt
$NDVI$	Normalized Difference Vegetation Index
$NER$	Noise Equivalent Radiance
$NRI$	Nitrogen Reflectance Index
$PNSI$	Plant Nitrogen Spectral Index
$PSSR_{a,b}$	Pigment Specific Simple Ratio
$Q$	Strahlungsenergie
$\overline{R}_y$	Mittelwert der Reflexionsfaktoren für die Wellenlänge $\lambda_y$
$R$	Reflexionsfaktor
$R_\lambda$	spektraler Reflexionsfaktor
$R_C$	Reflexionswert der Kontinuumkurve
$R''_\lambda$	Krümmung der Reflexionsfunktion an der Wellenlängenposition $\lambda_i$ (2. Ableitung)
$R'_\lambda$	Steigung der Reflexionsfunktion an der Wellenlängenposition $\lambda_i$ (1. Ableitung)
$RARS_{a,b}$	Ratio Analysis of Reflectance Spectra
$REI$	Index zur Bestimmung des Hauptwendepunkts (red edge index)
$R_{FH}$	skaliertes Reflexionsfaktor, normiert auf die Extremwerte $R_{min}$ , $R_{max}$
$R_{FS}$	skaliertes Reflexionsfaktor, normiert auf die Standardabweichung $\sigma_x$
$R_{FV}$	skaliertes Reflexionsfaktor, normiert auf die Quadratsumme der Reflexionswerte $R_x$
$R_{FZ}$	zentrierter Reflexionsfaktor (Frequenzbereich)

---

$RMSE_a$ ,	absoluter mittlerer quadrierter Restfehler (absolute root mean square error)
$RMSE_n$ ,	normierter mittlerer quadrierter Restfehler (normalized root mean square error)
$R_{OH}$	skalierter Reflexionsfaktor, normiert auf die Extremwerte $R_y^{\min}$ , $R_y^{\max}$
$R_{OS}$	skalierter Reflexionsfaktor, normiert auf die Standardabweichung $\sigma_y$
$R_{OV}$	skalierter Reflexionsfaktor, normiert auf die Quadratsumme der Reflexionswerte $R_y$
$R_{OZ}$	zentrierter Reflexionsfaktor (Ortsbereich)
$R_P$	kalibrierter Reflexionsfaktor
$R_{P,B,S}$	Reflexionsfaktoren der spektralen Bestandskomponenten Pflanze, Boden, Schatten
$R_{Pi}$	Reflexionsfaktor $R$ der Parallelmessung $P_i$
$R_{SK}$	sonnenstandskorrigierter Reflexionsfaktor
$R_{REI}$	berechneter Reflexionsfaktor am HWP
$SNC$	Absorption, normiert auf die Steigung (band slope normalized to slope at absorption center)
$SNR$	Signal-Rausch-Verhältnis (signal to noise ratio)
$SR$	Simple Ratio
$TVI$	Transformed Vegetation Index
$X_i$	unabhängige Variable ( $i=1,\dots,m$ )
$Y$	abhängige Variable



## 1 Einführung und Zielsetzung

Die Landwirtschaft in Europa und speziell in Deutschland sieht sich seit Beginn der 90-er Jahre mit einem rapiden Anstieg des Anforderungsprofils bezüglich der Maßnahmenapplikation im Pflanzenbau konfrontiert. Die Einführung zahlreicher Richtlinien auf EU-Ebene<sup>1</sup> sowie der steigende Wettbewerb in einem zusammenwachsenden Europa, führen zu einem massiven Anstieg des ökonomischen Drucks, was sich in immer neuen Anstrengungen zur Steigerung der Produktivität des einzelnen Landwirts äußert. Ebenso steigt, bedingt durch das wachsende Qualitätsbewusstsein der Verbraucher, die Nachfrage nach Nahrungsmitteln, die nachweislich unter Einsatz von Maßnahmen zur nachhaltigen Bewirtschaftung produziert werden. Zusätzlich sind die Anforderungen an den Landwirt zur zeit- und mengenmäßigen Düngergabe auf Bundesebene bereits bindend in der Düngeverordnung des BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) festgehalten. Ein zentrales Ziel der neuen Düngeverordnung liegt in der Minimierung der Umweltbelastungen und damit in einer gezielteren Ermittlung des Nährstoffbedarfs und der im Boden verfügbaren Nährstoffmengen.

Die Kombination dieser Faktoren – Produktivität, Qualität, Nachhaltigkeit – hat zur Entwicklung zahlreicher neuer Technologien im Agrarsektor geführt, die auch in zunehmendem Maße auf Akzeptanz unter den Landbewirtschaftern stoßen. Diese neuen Technologien haben eine stärkere Kontrolle der Bewirtschaftungsmaßnahmen zum Ziel und betrachten in den meisten Fällen einen Schlag einheitlicher Nutzung nicht mehr als Ganzes, sondern gehen davon aus, dass es innerhalb eines Schlages kleine homogene Teilflächen gibt, innerhalb derer individuelle Maßnahmen durchgeführt werden können (precision farming, site specific crop management, teilflächenspezifische Bewirtschaftung).

Zur Erkennung dieser Teilschlagvariabilitäten benötigt der Landwirt flächenhafte Informationen über die Verbreitung von Standortfaktoren und Bestandsparametern innerhalb der Anbaufläche.

Die Geographie als raumbezogene Wissenschaft verfolgt von Haus aus das Ziel, kontinuierliche und diskrete Informationen der Erdoberfläche in einem raumbezogenen Kontext durch eindeutige Lagebeziehungen zu erfassen und auszuwerten. Als Teilgebiet der Geographie bietet die Fernerkundung die Möglichkeit, solche Informationen berührungslos und flächenhaft zu erfassen und zur Verfügung zu stellen. Schon seit ca. 30 Jahren können so aus Satellitenaufzeichnungen Parameter der Erdoberfläche bestimmt werden und durch die kontinuierliche Wiederholung der Aufnahme eines Oberflächenausschnitts Veränderungen der Oberflächenparameter sichtbar gemacht werden.

Die traditionelle Fernerkundungsaufgabe ist hierbei das Monitoring, d. h. die Erfassung von Landnutzungseinheiten und deren Veränderungen, also eine qualitative Erfassung nominaler Objektklassen. Die Weiterentwicklung der Sensortechnik und der Auswertungsverfahren ermöglicht gegenwärtig darüber hinaus die Schätzung mengenmäßiger Parameter (Biomasse, LAI, Höhe) zur Berechnung quantitativer Objektgrößen natürlicher Oberflächen.

Forschungen in der Anwendung von Fernerkundungsmethoden zur Ableitung biochemischer Konzentrationen werden bereits seit über 20 Jahren betrieben und wurden in den 80er und 90er Jahren entscheidend vorangetrieben (z. B. CARD et al. 1988, CURRAN 1989, PETERSON et al. 1988). Der Schwerpunkt der Arbeiten in den 90er Jahren lag auf der Auswertung von flugzeuggestützten abbildenden Spektrometern zur Abschätzung der Konzentrationen biochemischer Inhaltsstoffe von Waldbeständen für die Ökosystemanalyse auf regionaler und globaler Ebene (Kohlenstoffbindung, Nährstoffkreislauf, Primärproduktion etc.) (siehe z. B.

---

<sup>1</sup> Die 2. Stufe der AGENDA 2000 ist ab 1.07.01 in Kraft. Darüber hinaus strebt die derzeitige Ministerin des BMVEL (R. Künast) für 2003 die Umsetzung eines Gesetzentwurfs zur Prämienkürzung im konventionellen Landbau und Ausgleichszahlung für nachhaltige Bewirtschaftungsmaßnahmen (Ökolandbau, Agrarumweltprogramme, etc.) an (Modulationsgesetz).

GASTELLU-ETCHEGORRY et al. 1995, WESSMAN 1994). Im Mittelpunkt stand hierbei das Verständnis der Interaktionen solarer Strahlung mit Blättern, sonstigen Pflanzenbestandteilen oder ganzen Pflanzen. Ein wesentlicher Teil des heutigen Verständnisses dieser Interaktionen beruht auf Modellierungen des Reflexionsverhaltens natürlicher Oberflächen unter Berücksichtigung biochemischer und biophysikalischer Komponenten (z. B. BARET & JACQUEMOUD 1994, DAWSON et al. 1998, JACQUEMOUD et al. 1996, FOURTY et al. 1996). Der überwiegende Teil dieser Untersuchungen basiert auf Auswertungen von unter Laborbedingungen gemessenen Spektralsignaturen im NIR/SWIR-Bereich.

Die vorliegende Arbeit soll an die Untersuchungen zur quantitativen Analyse von Spektralsignaturen zur Bestimmung biochemischer Komponenten anknüpfen und stellt die Ergebnisse von Untersuchungen zur Schätzung von Nährelementkonzentrationen von Kulturpflanzenbeständen am Beispiel von Winterweizenbeständen dar. Der Schwerpunkt der durchgeführten Arbeiten liegt hierbei – in Erweiterung der bisherigen Forschungen – auf der Analyse von *in situ* gemessenen Spektralsignaturen mit Hilfe eines nicht-abbildenden spektral hochauflösenden Sensors (ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro).

Den Hintergrund für die durchgeführten Untersuchungen bildet die Aussicht, dass die quantitative Ableitung von Bestandsparametern aus Fernerkundungsdaten einen bedeutenden Beitrag leisten kann zur zeitnahen Abbildung von Mangel- bzw. Überschusserscheinungen in Kulturpflanzenbeständen vor oder während der vegetativen Phase. Durch die Ableitung von Kenngrößen des Nährstoffhaushalts aus Spektraldaten besteht die Möglichkeit, direkt auf solche Variabilitäten zu reagieren, was bis heute, vor allem für die mobilen Nährstofffraktionen (v.a. Stickstoff) und deren Verfügbarkeit im Nährkörper Boden nicht möglich ist.

## 1.1 Entwicklungstrends im Kulturpflanzenbau

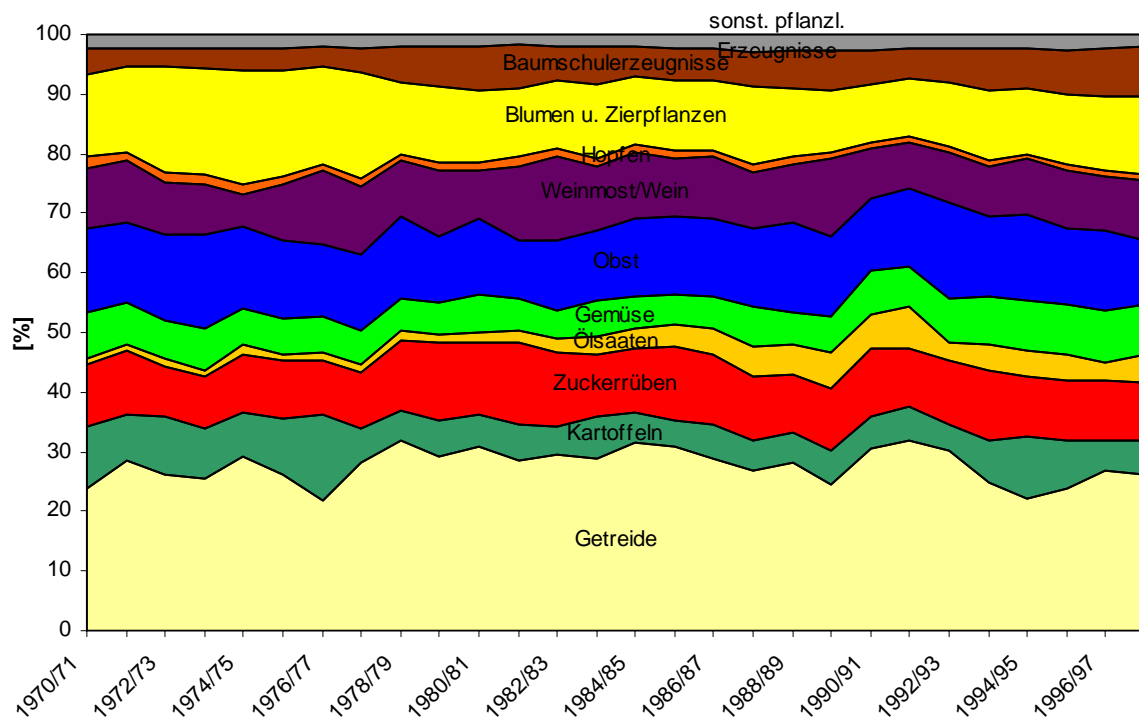
Die Nahrungsmittelproduktion steigt - abgesehen von einem sprunghaften Anstieg und darauf folgenden leichten Abfall im Zusammenhang mit der Wiedervereinigung – kontinuierlich an, wobei die pflanzliche Nahrungsmittelproduktion schneller ansteigt als die tierische. Die Zunahme der pflanzlichen Erzeugnisse wird zum überwiegenden Teil durch Steigerungen der ha-Erträge hervorgerufen, welche sich hauptsächlich durch die fortgesetzten Züchtungsschritte ergeben.

Das Ertragsniveau von Winterweizen hat sich innerhalb des Betrachtungszeitraumes annähernd verdoppelt, während sich das von Zuckerrüben nur um ca. ¼ erhöhte. Diese Produktivitätsunterschiede spielen neben den Abhängigkeiten und Verknüpfungen des globalen Agrarmarktes und der Veränderungen der Ernährungsgewohnheiten eine entscheidende Rolle bei den Verschiebungen im Anbauegefüge der wichtigsten Kulturpflanzenarten. Der Anteil des Ackerlandes an der gesamten Landnutzungsfläche hat, dem weltweiten Trend folgend, auf Kosten des Dauergrünlands stetig zugenommen (1995: 69% Ackerland). Lediglich zu Beginn der 90er Jahre wurde dieser Trend vorübergehend durch die Einführung der Flächenstillegungspolitik der Europäischen Agrarkommission aufgehalten.

Innerhalb der Ackerflächen ist im gleichen Zeitraum der Anteil des Getreideanbaus konstant geblieben (1995: 56 %), was einen weiteren Zuwachs der Anbauflächen bedeutet. Dieser ist das Resultat der stetig wachsenden Nachfrage nach Getreide v.a. für Futter und Industriezwecke (Schweinemast, Bierherstellung) (HENKEL 1999).

Der Produktionswert der Landwirtschaft ist, ebenso wie die Nahrungsmittelproduktion, innerhalb der letzten 30 Jahre stark angestiegen, ist jedoch während der letzten 10 Jahre leicht rückläufig, was auf die Wirkung der EU-Agrarreformpolitik und den damit verbundenen z. T. drastischen Produktpreissenkungen zurück zu führen ist. Dieser Verlust des Produktionswertes ging mit Strukturveränderungen innerhalb des Produktionsgefüges einher, d. h., der Anteil der pflanzlichen Produkte (v. a. Sonderkulturen) stieg zu Lasten der tierischen Produkte,

wobei das Getreide insgesamt mit einem gleichbleibenden Anteil von ca. 25 % zum Produktionswert der pflanzlichen Erzeugnisse beiträgt<sup>2</sup>.



**Abb. 1: Anteil einzelner Produkte am Produktionswert der pflanzlichen Erzeugnisse**

Der Weizenpreis hat gegenwärtig, wie auch der Preis aller übrigen Getreidearten, nach einem zwischenzeitlichen Hoch Anfang der 80er Jahre, wieder das Niveau von 1970 erreicht<sup>3</sup>. Eine ähnliche Entwicklung nahmen die Düngemittelpreise. Bei den Pflanzenschutzmitteln ist dieser Trend nur bedingt erkennbar, der Anstieg der Preise verlangsamte sich zwar im Laufe des Weizenpreisverfalls in der zweiten Hälfte der 80er Jahre, nahm jedoch mit der Einführung der Flächenprämien für Getreide Anfang der 90er Jahre wieder rapide zu.

Der aus diesen Faktoren resultierende Deckungsbeitrag je dt Winterweizen beträgt gegenwärtig (Stand: Anfang 2000) ca. 20 DM/dt, während er vor ca. 25 Jahren, trotz der heute gezahlten Flächenprämie, die mit ca. 40 % zum Deckungsbeitrag beiträgt, noch um ca. 50 % höher lag. Kompensiert werden diese Mindereinnahmen derzeit fast ausschließlich durch züchterische Fortschritte (Steigerung des mittleren Ertragsniveaus von 47 auf 70 dt/ha). Aus der geschilderten Entwicklung ergibt sich, dass der Deckungsbeitrag je Anbaufläche (ha) nach einem zwischenzeitlichen Hoch wieder auf dem gleichen Niveau liegt wie vor etwa 20 Jahren. Um die Wettbewerbsfähigkeit der Getreideproduktion auch in Zukunft zu gewährleisten, und um einem weiteren Verfall der landwirtschaftlichen Einkommen entgegenzuwirken, ist neben den beträchtlichen Steigerungen der mittleren Schlägerträge in Zukunft vor allem auch an den Einsatz von ertragsoptimierenden, teilschlaggenauen Technologien zu denken.

<sup>2</sup> Die Grundlage der Aussagen und Graphiken in Kap. 2.1. bis Kap. 2.4 bilden Daten des Statistischen Bundesamtes und des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Forsten. Die Zeitreihen wurden zum Teil in bereits aufgearbeiteter Form (bis 1997) vom Inst. für Marktforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL, Herr Manegold) zur Verfügung gestellt und bis 2000 aktualisiert (Quelle: BMVEL [Hrsg.]: STATISTISCHES JAHRBUCH ÜBER ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN).

<sup>3</sup> Einschließlich der auf den Ertrag umgerechneten Flächenprämie (1999 ca. €300,-/ha)

Der Rat der Europäischen Union hat mit dem Beschluss zur AGENDA 2000 (26. März 1999, Berlin) zentrale Rahmenbedingungen für die Agrar- und Ernährungspolitik für den Zeitraum von 2000 bis 2006 festgelegt. Diese umfassen die Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) mit einem Finanzrahmen von durchschnittlich ca. 42,5 Mrd. € pro Jahr für Marktmaßnahmen und Maßnahmen zur Entwicklung des ländlichen Raumes sowie die Reform der Strukturfonds und des Kohäsionsfonds mit einem Finanzvolumen von insgesamt 213 Mrd. € (BMVEL [Hrsg.] 2002).

Im Bereich der Ackerkulturen hatte dies eine Senkung des Getreidestützpreises in zwei Schritten ab 2000/01 um je 7,5 % zur Folge. Als Ausgleich werden die Direktzahlungen (Flächenprämien) von 54,34 €/t auf 63 €/t<sup>4</sup> angehoben. Die frühere Ölsaatenprämie wird in drei Jahresstufen auf das Niveau der Getreidesubventionen gesenkt. Über die weitere Entwicklung der Marktmaßnahmen und Ausgleichszahlungen wird in Abhängigkeit von der zukünftigen Marktentwicklung ab 2002 entschieden werden.

Die europäische und insbesondere die deutsche Landwirtschaft befindet sich insgesamt und v.a. im Bereich des Kulturpflanzenbaus in einer Phase des wirtschaftlichen und sozialen Umbruchs. Dieser ist gekennzeichnet durch kontinuierliche Produktivitätssteigerungen in der Pflanzenproduktion bei gleichzeitig stark rückläufigen Preisen und Gewinnen. Der landwirtschaftliche Strukturwandel führte indes, resultierend u.a. aus der Intensivierung der Produktion, zu einem durchschnittlichen Rückgang der Zahl der landwirtschaftlichen Betriebe um 29 % sowie zu einer Zunahme des Anteils der Großbetriebe (>50 ha).

Neben dem Status Quo ist für die Einführung neuer Technologien in der Landwirtschaft vor allem eine Prognose für deren zukünftige Entwicklung notwendig. Hier liegt durch die Beschlüsse im Rahmen der Agenda 2000 bereits ein Wegweiser für eine Ausrichtung der Landwirtschaft hin zu einer marktorientierten, wettbewerbsfähigen, qualitätssichernden und ökologischen Produktion vor.

Nach der jüngsten Veröffentlichung des BMVEL scheint sich in der Entwicklung der Einkommensverhältnisse in der Landwirtschaft bereits eine positive Trendwende abzuzeichnen (siehe BMVEL [Hrsg.] 2002). Der Erfolg der Landwirtschaft zu Beginn des 21. Jahrhunderts ist jedoch maßgeblich davon abhängig, wie schnell sich die Landwirte an die neuen Gegebenheiten anpassen werden, d. h., sich durch stärkere Ausrichtung auf den Markt auch der neuen Konkurrenz aus den künftigen Beitrittsländern stellen können. Voraussetzung für die Umsetzung der aufgezeigten Rahmenbedingungen für eine ökonomisch integrierte und ökologisch nachhaltige Landwirtschaft ist aber ebenso die Akzeptanz der agrarpolitischen Maßnahmen auf nationaler und internationaler Ebene durch Landwirtschaftsverbände, Öffentlichkeit und Handelspartner.

Unter dem Schlagwort *Precision Farming* wurden, primär vor dem Hintergrund der Wettbewerbsfähigkeit und Ertragsmaximierung, in den 90er Jahren zahlreiche technologische Verfahren zur effektiven Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen auf Teilschlagbasis eingeführt. Diese sind in der Lage, die kleinräumige Variabilität der Zustandsparameter eines Pflanzenbestands im Zuge der unterschiedlichen Maßnahmen der Bestandsführung zu berücksichtigen.

*Precision Farming* beruht auf der Aufteilung landwirtschaftlicher Raumeinheiten einheitlicher Nutzung in einzelne, geometrische, relativ homogene Zonen. Innerhalb dieser Zonen erfolgt eine einheitliche, benutzerdefinierte Anwendung der einzelnen Bewirtschaftungsgänge des Ackerbaus (Saatbettbereitung, Saat, Düngung, Pflanzenschutz, Bewässerung, etc.) auf Basis der gemittelten Eigenschaften der jeweiligen Zone (MULLA 1997). Die pflanzenbaulich

---

<sup>4</sup> Dies entspricht bei einem durchschnittlichen Ertrag von 60 dt/ha einer Flächenprämie von ca. 375,- €/ha.

relevanten Standorteigenschaften und Faktoren der Bestandsführung können hierzu auf verschiedenen Wegen erfasst werden.

Das technische Grundprinzip des *Precision Farming*-Konzepts ist die geo-referenzierte Erfassung und Analyse des Zustands landwirtschaftlicher Flächen. Ein *Precision Farming* System besteht in der Standardausführung derzeit aus folgenden Komponenten:

- ⇒ einer **GPS**-Ausstattung (**G**lobal **P**ositioning **S**ystem),
- ⇒ einem Verfahren zur **Ertragskartierung** und
- ⇒ einer Technik zur Umsetzung der digitalen Schlaginformation auf die Fläche (**V**RT, **V**ariable **R**ate Application **T**echnology).

Ausschlaggebend für die durchzuführenden Applikationsmaßnahmen (Düngung, Aussaatstärke, Pflanzenschutz) ist in diesem System zunächst ausschließlich die Erfassung der räumlichen Heterogenität innerhalb eines Schlages, wie sie aus der Ertragskartierung abgeleitet werden kann (z. B. teilschlagspezifische Düngung nach dem Prinzip "Düngung nach Entzug durch Ertrag").

Andere Systemlösungen basieren auf der Erfassung der räumlichen Inhomogenitäten aus langfristig stabilen Bodeninformationen (z. B. über die Reichsbodenschätzung, P-K-Rasterbeobachtung) oder zeitlich variablen Bestandsinformationen (z. B. N-Gehalt Pflanze). Auf diesem Sektor der Datenerfassung können Fernerkundungsinformationen in der Zukunft in zunehmendem Maße wertvolle Daten liefern.

Entscheidend für die Güte des jeweiligen Systems ist neben der uneingeschränkten Kompatibilität der einzelnen Komponenten vor allem die Qualität der verwendeten Daten sowie der Prozessierungs- und Analyseverfahren zur Umsetzung der Informationen in eine Applikationskarte.

Primäres Ziel der Einführung solcher Komponenten in den Verfahrensablauf der Applikationsmaßnahmen ist die Ertragsmaximierung bei gleichzeitiger Minimierung des Produktionsmitteleinsatzes. In der Theorie kann der Einsatz solcher *Precision Farming* Technologien daneben auch zu einer ressourcenschonenden Bewirtschaftung von Agrarflächen beitragen (WALLACE 1994).

Die nachhaltigen ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der Einführung der *Precision Farming* Technologie in der Landwirtschaft sind Gegenstand einer z. T. kontroversen Diskussion (siehe z. B. ASCOUGH et al. 1999, AUERNHAMMER 2001, BATTE 2000, GROFFMAN 1997, KUHLMANN & BRODERSEN 2001, PLANT 2001, WAGNER 2000, WOLF & WOOD 1997). Zu den ökonomischen Vorteilen könnten gehören eine Reduzierung des Pflanzenschutz- und Düngemittelaufwands, eine Kornertrags- und Qualitätserhöhung und insgesamt eine Reduzierung der Umweltkosten, wenn zukünftig Umweltbelastungseffekte durch Nähr- und Wirkstoffaustrag geltend gemacht werden sollten. Für die Umwelt könnte eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung in einer Reduzierung des N-Austrags (Versickerung, gasförmige Emission) bzw. Wirkstoffaustrags (Pflanzenschutz) sowie eine reduzierte Belastung der Mikroflora und -fauna zur Folge haben.

Nachteilig auf eine unvoreingenommene Bewertung der Auswirkungen wirkt sich oftmals jedoch eine zu enge Verflechtung von Forschungsförderung, Technologieentwicklung und der Agrarindustrie aus, welche dazu führt, dass innovative Technologien benutzt werden, um für den Anwender uneffiziente und ökologisch nicht nachhaltige Produkte zu etablieren (WOLF & WOOD, 1997, S. 186: "*Precision Farming is consistent with a productivist science, and it represents an attempt to rationalize and legitimate chemically dependent, thermodynamically inefficient, and ecologically destructive patterns of production in an era of increasing environmentalism.*")

## 1.2 Fernerkundung für den teilflächenspezifischen Pflanzenbau

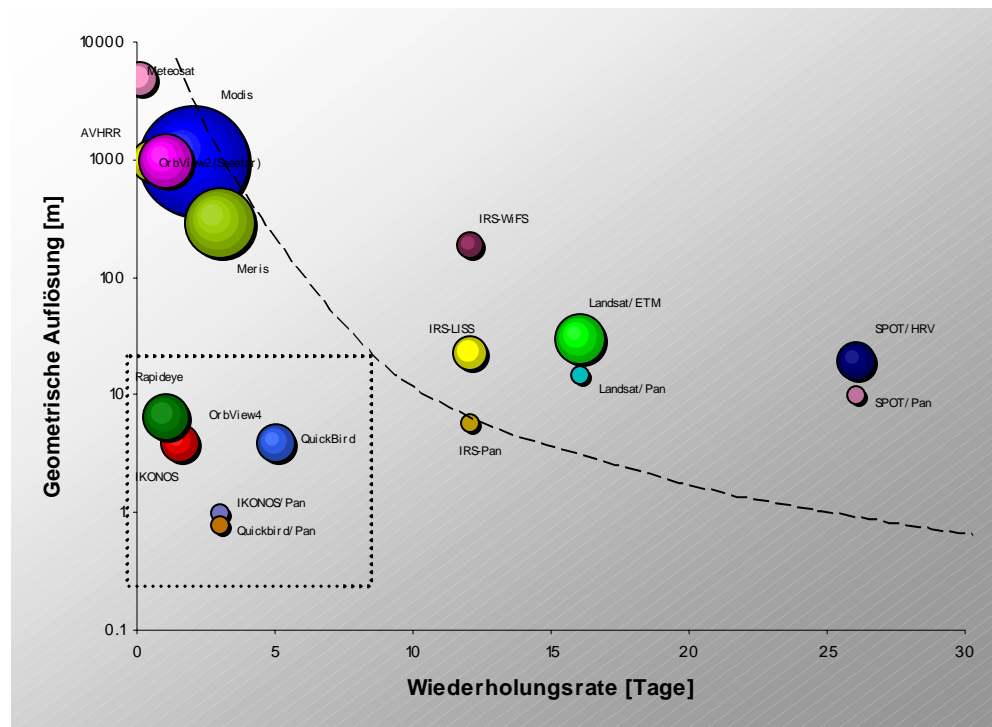
Der Einsatz von Sensoren, welche die spektrale Reflexion natürlicher Oberflächen erfassen hat sich bereits über einen langen Zeitraum für operationelle Anwendungen in der Landwirtschaft etabliert. Die im Zuge der EU-Agrarreform von 1992 notwendig gewordenen Kontrollen der Anträge zur flächenbezogenen Kulturpflanzenausgleichszahlung auf EU-Ebene (InVeKos) werden bereits seit 1993 mit Hilfe von Fernerkundungsdaten durchgeführt (siehe z. B. RELIN 1996). Unabhängig von den Witterungsbedingungen verfügbare Satelliten-daten (Radarbilder, z. B. ERS-1) ermöglichen die Beobachtung der Landoberfläche in festen Zeitabständen für eine kontinuierliche Erfassung der Anbauflächen (siehe z. B. SCHIECHE et al. 1999).

Den bisherigen satellitengestützten Fernerkundungsverfahren ist gemeinsam, dass sie bestenfalls den landwirtschaftlichen Schlag einheitlich betrachten und bewerten oder lediglich eine Aussage über ein zusammenhängendes Anbauggebiet machen. Der Einsatz von Luftbildern ermöglicht schon seit langer Zeit die Betrachtung der räumlichen Inhomogenitäten innerhalb eines Feldes, jedoch fehlte es bisher an der notwendigen Technologie und der Motivation, diese Informationen in einem raumbezogenen Informationssystem in für die Landbewirtschaftung nützliche Daten umzusetzen und verfügbar zu machen. Die technologischen Komponenten GPS, VRT und GIS stellen die Schlüsseltechnologien des modernen Precision Farming Konzeptes dar. Erst durch den Einsatz dieser Technologien in der Landwirtschaft eröffnete sich auch auf dem Fernerkundungssektor die Möglichkeit, hochauflösende Sensoren zu entwickeln, bzw. bestehende Systeme an den neuen Markt anzupassen und diese gewinnbringend für die teilschlaggenaue Bewirtschaftung von Ackerflächen einzusetzen (MORAN et al. 1997, BRISCO et al. 1998).

Zusätzlich ist durch die Einführung neuer Richtlinien auf dem Agrarsektor (z. B. "Modulationsgesetz", siehe Kap. 1) in den kommenden Jahren mit einer Zunahme des Bewusstseins für die teilflächenspezifische Betrachtung von Ackerflächen und damit mit einer Expansion des Absatzmarktes für teilflächenspezifische Informationen und Technologien zu rechnen.

Die bisherigen Satellitensensoren zeichnen sich durch die Abhängigkeit der räumlichen von der zeitlichen Auflösung aus. Geometrisch hochauflösende Sensoren können stets nur einen kleinen Oberflächenausschnitt erfassen, wodurch der Zeitraum bis zu einer erneuten Erfassung des identischen Ausschnittes (Repetitionsrate) gegenüber dem von niedrigauflösenden Sensoren erheblich länger ist (vgl. z. B. Repetitionsrate Landsat/TM ↔ Spot/HRV in Abb. 2).

Die Notwendigkeit der Verfügbarkeit zeitlich und räumlich hochauflösender Informationen über die Erdoberfläche, nicht nur in der Landwirtschaft, führte in den letzten Jahren zu massiv verstärkten Investitionen auf dem zivilen Raumfahrt-Sektor. Das Resultat sind zahlreiche geplante Satellitenmissionen, die sich z. T. auf kommerzielle Plattformen stützen, und seit April 2000 der erste operationell betriebene zivile Multispektralscanner mit einer geometrischen Auflösung von unter 5m bei einer möglichen Repetitionsrate von wenigen Tagen (z. B. IKONOS, vgl. Abb. 2). Damit können Satellitensensoren in der Zukunft eine Alternative zu bodengestützten Kartierungsverfahren darstellen, wenn neben der hohen räumlichen, zeitlichen und spektralen Auflösung auch eine reibungslose Verfügbarkeit der Daten (d. h. eine Bereitstellung innerhalb weniger Tage) gewährleistet werden kann. Das größte Problem liegt dabei nach wie vor in der Logistik, d.h. der Zeitraum zwischen der Aufzeichnung der Daten und der Bereitstellung der aus ihnen abgeleiteten Produkte ist für den Großteil der möglichen Applikationsmaßnahmen, nicht nur in der Landwirtschaft, zu lang.



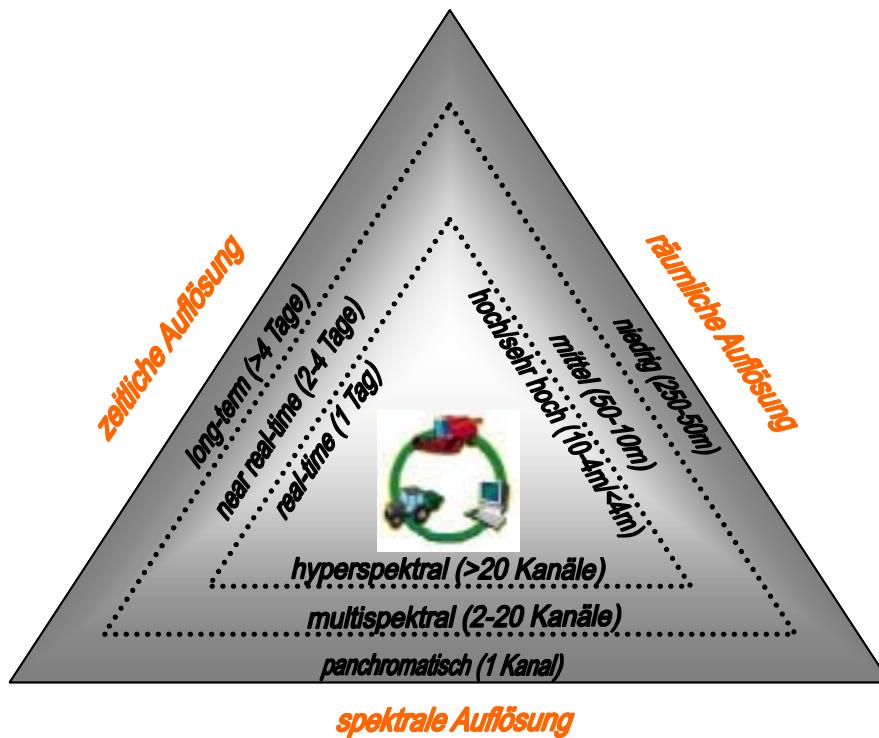
**Abb. 2:** Auswahl optischer Fernerkundungssysteme und ihrer geometrischen, zeitlichen und spektralen Auflösung (Kreisgröße)

Unter dem Begriff "Fernerkundungsverfahren" werden im Folgenden sämtliche Verfahren zur berührungslosen Datenerfassung mittels Spektrosensoren zusammengefasst.

Die aufgezählten Verfahren beinhalten sowohl die traditionelle luft- oder satellitengestützte Fernerkundung als auch innovative „terrestrische“, d.h. an ein Landfahrzeug gebundene Methoden der Echtzeiterfassung. Die Sensoren können je nach zeitlicher Auflösung einerseits zur Bereitstellung von Basisdaten eingesetzt werden (long term), indem aus den Spektralinformationen Standortdaten abgeleitet werden (Bodenart, Wasserhaltevermögen) und darüber hinaus, je nach Sensortyp und –Spezifikation Informationen zum aktuellen Pflanzenzustand liefern (Biomasse, Wassergehalt, Nährstoffgehalt, real-time-Verfahren).

Die systematische Einteilung der Fernerkundungssysteme in Abhängigkeit von den hier skizzierten Eigenschaften ist in Abb. 3 dargestellt. Aus der Abbildung geht gleichzeitig ein Anforderungsprofil für den möglichen Einsatz von Fernerkundungsdaten im *precision farming* Sektor ,basierend auf deren zeitlicher, räumlicher und spektraler Auflösung, hervor.

Der Vorteil der luftgestützten gegenüber den terrestrischen Verfahren liegt vor allem in der Anschaulichkeit. Luft- oder Satellitenbilder erzeugen ein flächenhaftes Abbild des gesamten zu betrachtenden Oberflächenausschnitts, während terrestrische Erhebungen (auch die Echtzeitsensoren) immer nur einen diskreten Ausschnitt erfassen. Die Lücken zwischen diesen Punktmessungen müssen durch geostatistische Verfahren (Interpolation, Regionalisierung) geschlossen werden, wobei über die Zwischenräume mit Hilfe der Rechenverfahren lediglich annähernde Vermutungen angestellt werden können.



**Abb. 3:** Taxonomie von Fernerkundungsaufnahmen und deren Potenzial (von außen nach innen zunehmend) für *precision farming* Anwendungen

Sämtliche Verfahren der Fernerkundung nutzen die elektromagnetische Strahlung als Informationsquelle zur Ableitung der Daten über die Pflanzen- und Bodenbeschaffenheit. Die präzise Erfassung dieser Strahlungsmenge – entweder der reflektierten solaren, der emittierten terrestrischen Komponente oder einer aktiv induzierten Strahlung (z. B. LIDAR, Radar) – sowie die Ableitung der pflanzenbaulich relevanten Kenngrößen hieraus sind die zentralen Themen in der Erforschung des Potenzials von Fernerkundungsdaten in der Landoberflächenerfassung. Der aktuelle Trend bei der Verwendung von Fernerkundungssensoren in der Landwirtschaft zielt hierbei, neben der Erfassung von qualitativen Indikatoren, zunehmend auf den Einsatz von berührungslos messenden Echtzeit-Sensoren ab (siehe z. B. LINSEISEN et al. 2000, KORDUAN et al. 2000). Diese sollen über einen vor dem Zugfahrzeug zu montierenden Sensor quantitative Bestandsinformationen erfassen und, umgesetzt in eine Applikationsmaßnahme, direkt an einen Mengenregler (z. B. für die Düngemittelgabe) weitergeben. Stellvertretend für die ausgewählten Technologien seien hier der Hydro-N-Sensor (HydroAgri Deutschland) sowie der Miniveg-N-Sensor (DLR / Fritzmeier) genannt. Während der Miniveg-N-Sensor auf der Basis laserinduzierter Fluoreszenz<sup>5</sup> arbeitet (aktiver Sensor), nutzt der Hydro-N-Sensor die reflektierte solare Einstrahlung des sichtbaren und des nahen Infrarot-Bereiches (passiver Sensor) zur Ableitung von Bestandswerten und direkten Applikation von Düngemaßnahmen (siehe Abb. 4).

<sup>5</sup> Der Pflanzenbestand wird durch eine künstliche Lichtquelle mit gebündelter Infrarotstrahlung beleuchtet und angeregt. Dies führt zu einer Emission von Strahlung in einem anderen Wellenlängenbereich, die registriert und gespeichert wird.





**Abb. 4:** Konzept des Hydro N-Sensors  
(© HydroAgri, URL: [http://www.hydroprecise.com/index\\_ger.htm](http://www.hydroprecise.com/index_ger.htm) [09.05.02])

Bei den passiven Sensoren beruht die Bestimmung des Bestandsmerkmals (z. B. Stickstoffgehalt) in der Regel auf dessen indirekter Ableitung aus der Messung eines Indikators für dieses Merkmal (z. B. Grünfärbung; Chlorophyll). Diese Beziehungen vernachlässigen oder ignorieren jedoch immer die Beeinflussung des Indikators durch weitere Merkmale, wie z. B. Mangel oder Überschuss eines anderen Nährstoffes, Wasserstress, oder andere. Des Weiteren werden die Spektralbereiche immer nur in wenige, breite Spektralbänder unterteilt, was eine quantitative Ableitung von Kenngrößen zumindest kausalanalytisch zweifelhaft erscheinen lässt, selbst wenn statistisch signifikante Korrelationen zwischen diesen und der spektralen Reflexion nachgewiesen werden können.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll diese Problematik anhand von Simulationsbeispielen aus den erhobenen Felddaten und Spektralmessungen demonstriert werden, sowie Lösungsansätze zur Interpretation und weiterführenden quantitativen Analyse einzelner Spektralbereiche erarbeitet werden.

### 1.3 Aufbau und Ziel der Arbeit

Vor dem Hintergrund der politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Situation im Agrarsektor (siehe Kap. 1.1) ist der Bedarf an aktuellen, objektiven, flächenhaft verfügbaren Zustandsinformationen auf Teilschlagebene in den letzten Jahren sprunghaft gestiegen. Fernerkundungsdaten können hierzu einen bedeutenden Beitrag liefern (vgl. Kap. 1.2).

Die vorliegende Arbeit untersucht das Potenzial von spektral hochauflösenden abbildenden und nicht-abbildenden optischen Sensoren zur Vorhersage zeitlich und räumlich mobiler Standort- und Zustandsparameter von Kulturpflanzenbeständen. Zum allgemeinen Verständnis der Beziehungen zwischen elektromagnetischer Strahlung und Merkmalen natürlicher Oberflächen werden in Kap. 1 die Grundlagen spektraler solarer Einstrahlung und deren Interaktion mit Materie erläutert. Die durchgeführten Fernerkundungsmessungen und Referenzerhebungen konzentrieren sich auf zwei Untersuchungsgebiete, die in Kap. 2 kurz beschrieben werden. Die technische Konfiguration der verwendeten Aufnahmegeräte wird in Kap. 3 vorgestellt. Hierbei wird ausführlich auf die systemspezifischen Eigenschaften des ASD FieldSpec Pro JR Spektrometers eingegangen, dessen spektroradiometrische *in situ* (und Labor-) Messungen die Grundlage für die multivariate Auswertung zur Vorhersage von Pflanzenparametern bilden.

Von elementarer Bedeutung für die Auswertung spektroradiometrischer Messungen ist eine detaillierte Planung des Messablaufs, sowohl für die Spektralmessungen als auch für die Referenzdaten. Der Prozess der Datenerhebung beeinflusst in entscheidendem Maße die späteren Resultate der Ableitung von Objektparametern aus den Spektraldaten. Aus diesem Grund ist die genaue Planung, Durchführung und Dokumentation der Datenerfassung notwendig und Gegenstand von Kap. 4.

Ein zentraler Aspekt bei der Auswertung spektraler Messungen zur Bestimmung quantitativer Objektparameter ist die Standardisierung der erhobenen Messungen im Zuge der Post-Prozessierung. Die Messungen der spektralen Reflexion im Gelände werden von einer Reihe biophysikalischer und physiologischer Parameter der Oberfläche beeinflusst, die durch geeignete Verfahren zu quantifizieren sind oder, wenn dies nicht möglich ist, in Ihrer Auswirkung auf die zu messende Zielgröße des Objekts zu minimieren sind. Zu diesem Zweck werden in Kap. 5 verschiedene absolute und relative Verfahren der Standardisierung vorgestellt, bzw. eigene Ansätze zur Erstellung vergleichbarer Datensätze entwickelt. Die standardisierten Spektren liefern die Grundlage für die multivariate Analyse der Spektraldaten in Kap. 7. Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht die Entwicklung eines teilautomatisierten Verfahrensablaufs zur Schätzung von Komponentenkonzentrationen aus spektroradiometrischen Messungen von Kulturpflanzenbeständen am Beispiel des Winterweizens. Hierzu wird zunächst ein Ablaufplan für eine Regressionsmodellierung entwickelt und dieser dann für zwei zentrale Fragestellungen modifiziert bzw. optimiert. Zum einen ist die Schätzung von Komponentenkonzentrationen in Bezug zum anvisierten Einsatzbereich der teilschlagspezifischen Bewirtschaftung von Seiten des Anwenders nur für bestimmte phänologische Phasen während der Wachstumsperiode sinnvoll und nützlich. Hierzu werden die Spektralmessungen zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten während der vegetativen Phase des Winterweizens durchgeführt. Vom Betrachtungsstandpunkt der Technologie-Entwickler stellt sich andererseits die Frage, welche Bereiche des solaren Spektrums für die Erkennung und Schätzung des Versorgungszustands von Kulturpflanzen von Interesse sind und wie hoch die spektrale Auflösung (Bandbreite) und Anzahl der Wellenlängenkanäle eines Detektors sein muss, damit die Unterschiede in der spektralen Reflexion, die auf Zustandsänderungen der Pflanze zurückzuführen sind, spektral erfasst werden.

Die durchgeführten Untersuchungen zur Komponentenvorhersage konzentrieren sich auf die Makronährelementkonzentrationen (N, P, K, Ca, Mg, S) der oberirdischen Pflanzenmasse. Zusätzlich werden die Beziehungen zwischen Reflexionswerten bzw. deren Derivaten und

dem Wassergehalt, der Trockenmasse sowie exemplarisch der Konzentrationen der wichtigsten Mikronährelemente untersucht.

Der Schwerpunkt der multivariaten Analyse der Spektraldaten liegt auf der Schätzung der Gesamt-Stickstoff-Konzentration ( $N_{\text{tot}}$ ) in der Pflanzenmasse. Stickstoff unterliegt im Boden einer regen Dynamik, wodurch der pflanzenverfügbare N-Gehalt in Abhängigkeit von Jahreszeit, Standort, Bewirtschaftungsbedingungen und weiteren Faktoren in weiten Grenzen schwanken kann. Mit einer gezielten Stickstoffdüngung kann – stärker als bei anderen Nährstoffen – direkt und kurzfristig Einfluss auf die Ertragsbildung genommen werden. Die gezielte Düngung erfordert besonders genaue Kenntnisse über die räumliche und zeitliche Mobilität der Nährstoffverfügbarkeit und des Nährstoffbedarfs. Hierzu liefern spektrale Aufnahmen des Pflanzenbestands wertvolle Informationen, wenn sie in der Lage sind, die Variabilitäten der Nährstoffkonzentrationen bzw. allgemeiner ausgedrückt des Pflanzenzustands mit hoher Genauigkeit räumlich, zeitlich und vor allem quantitativ vorherzusagen. Der letztgenannte Aspekt stellt für die Forschung und Anwendung zur Zeit das größte Problem bei der Auswertung von Fernerkundungsdaten dar, da diese zwar in der Lage sind, teilschlaggenaue Unterschiede zu erkennen, diese können aber in der Regel lediglich qualitativ bewertet werden.

Die Untersuchung der Nährelementkonzentrationen in ihrer räumlichen Verteilung (Kap. 8.1) geht der These nach, dass zwischen den Komponentenkonzentrationen von N, P und K keine direkten Korrelationen bestehen und deshalb die Gabe von Mehrkomponentendüngern für teilflächenspezifische Applikationen nicht empfehlenswert ist (vgl. HACKBARTH & LAMP 2000). Abschließend erfolgt auf der Basis der gesammelten Erkenntnisse eine modellhafte Skizzierung eines möglichen Verfahrensablaufs zur teilflächenspezifischen N-Bedarfs-Ermittlung für Winterweizenschläge unter Berücksichtigung von Bestandsdaten, die aus spektralen Merkmalen abgeleitet werden können (Kap. 8.3).

Das **Hauptziel** der vorliegenden Arbeit – die Schätzung von Komponentenkonzentrationen frischer Pflanzenmasse durch multivariate Analyseverfahren aus spektraler Information – gliedert sich im Verlauf der im Rahmen durchgeführten Arbeitsschritte in eine Reihe von **Teilzielen** auf, die zusammenfassend wie folgt formuliert werden können:

- (1) Entwicklung eines übertragbaren Prozessierungsablaufs zur Standardisierung spektroradiometrischer Messungen
- (2) Vergleich des Informationsgehalts spektroradiometrischer Labormessungen mit *in situ* Reflexionsmessungen
- (3) Bewertung der Eignung multivariater Methoden zur Ableitung biochemischer Zustandsparameter von Kulturpflanzenbeständen
- (4) Erfassung des Pflanzenzustands bzw. von Mangelerscheinungen im Pflanzenbestand zu phänologisch relevanten Zeitpunkten während der Vegetationsphase von Kulturpflanzenbeständen (speziell: Saatweizen)
- (5) Auswahl geeigneter Wellenlängenbereiche zur Erfassung biochemischer Konzentrationen frischer Pflanzenmasse vor dem Hintergrund verfügbarer und geplanter Sensoren
- (6) Vorschlag zur Implementierung der Konzentrationsschätzungen aus spektroradiometrischen Messungen in einen Verfahrensablauf für die Düngebedarfsplanung im Teilschlagmanagement.



## 2 Spektroskopie natürlicher Oberflächen

### 2.1 Begriffseingrenzung / Definitionen

Unter *Spektroskopie / Spektroradiometrie* werden im allgemeinen Sinne sämtliche Untersuchungen verstanden, welche sich mit der Erzeugung, Aufzeichnung und Auswertung elektromagnetischer Wellen, bzw. im engeren Sinne *optischer Strahlung*, d. h. dem Wellenlängenbereich zwischen 1 nm und 1 mm, beschäftigen (ERB [Hrsg.] 1989). Dieser Bereich umfasst die ultraviolette Strahlung (UV), das sichtbare Licht (VIS) und das Infrarot (NIR, MIR, FIR<sup>6</sup>). Diese Einteilung des optischen Bereichs unterliegt in der Literatur zum Teil geringfügigen Schwankungen, was aber tolerierbar ist, da es sich hier lediglich um Richtwerte zur Abgrenzung innerhalb des kontinuierlichen Wellenlängenspektrums handelt. Dennoch existiert eine Norm zur Festlegung der Spektralbereiche (DIN 5030 Teil 2), welche die Grundlage für die Angaben in der linken Hälfte von Tab. 1 bildet. Für die vorliegende Arbeit erfolgt abweichend von dieser Gliederung eine Einteilung des VIS- und IR-Bereichs, die auf der systemspezifischen Konfiguration der verwendeten Detektoren beruht (Übergangsbereich der Beugungsgitter, vgl. Kap. 4.1) und allgemein auf der gängigen Einteilung nach den für die fernerkundliche Nutzung des elektromagnetischen Spektrums relevanten Spektrumsabschnitten (siehe hierzu z. B. SCHOWENGERDT 1997).

Von besonderer Bedeutung für die Fernerkundung sind hiervon die Bereiche der *solaren Einstrahlung* (ca. 0,4 bis 2,5  $\mu\text{m}$ ) und der *terrestrischen Ausstrahlung* (ca. 8 bis 14  $\mu\text{m}$ ), die für Untersuchungen der Beziehungen zwischen spektralen Charakteristika von Objekten und deren biophysikalischen und biochemischen Eigenschaften herangezogen werden können. Die Spektroskopie beschränkt sich in der Regel auf passive Systeme, welche die emittierte bzw. reflektierte Strahlung der beiden implizierten Quellen - Erde und Sonne - aufzeichnen. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen beschränken sich ausschließlich auf den Informationsgehalt solarer Strahlung (Tab. 1).

**Tab. 1: Der optische Bereich des elektromagnetischen Spektrums**

Benennung	Kurzzeichen nach DIN	Wellenlänge nach DIN [nm]	Wellenlänge (FE) [nm]	Kurzzeichen (FE)	Benennung		
Vakuum UV	UV-C	VUV	100 – 200				
Fernes UV		FUV	200 – 280				
Mittleres UV	UV-B	280 – 315					
Nahes UV	UV-A	315 – 380					
Licht	VIS	380 – 780	400 – 700	VIS } NIR } VNIR	Licht		
Nahes IR	NIR	IR-A	780 – 1400		700 – 1000	Nahes IR	
		IR-B	1400 – 3000		1000 – 1800	SWIR-1	Kurzwelliges IR
					1800 – 2500	SWIR-2	
Mittleres IR	IR-C	MIR	$3 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3$	MIR	Mittleres IR	
Fernes IR		FIR	$5 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^3 - 14 \cdot 10^3$	TIR	Thermales IR	

<sup>6</sup> Eine Übersicht sämtlicher Abkürzungen ist im Abkürzungsverzeichnis zusammengestellt.

Um die Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung und ihrer Wechselwirkung mit Materie zu beschreiben, ist vorab die Klärung einiger hier relevanter Grundbegriffe der optischen Spektroskopie, insbesondere der grundlegenden physikalischen Lichtgrößen notwendig.

Die Nomenklatur der radiometrischen Einheiten folgt den Ausführungen von KOSTKOWSKI (1997). Die Beschreibung der entsprechenden physikalischen Größen stützt sich auf die Erläuterungen von CLARK (1999), ERB [Hrsg.] (1989), KRIEBEL et al. (1975), KRAUS & SCHNEIDER (1988), MILTON (1987) und SCHMIDT (2000).

### 2.1.1 Strahlungsphysikalische Größen

Die elektromagnetische Strahlung kann je nach Fragestellung als Wellen oder als Teilchen (Photonen der Quantentheorie) aufgefasst werden. Die **Strahlungsenergie**  $Q$  eines Photons (*radiant energy*,  $Q$  [J]) ist von der Wellenlänge abhängig, mit der es emittiert wird. Je kleiner die Wellenlänge, desto höher ist die Energie (Gl. 1).

$$Q = h \times c / \lambda \quad \text{Gl. 1}$$

mit

$\Delta Q$	:	Strahlungsenergie
$h$	:	Planck'sches Wirkungsquantum [Ws <sup>2</sup> ]
$c$	:	Lichtgeschwindigkeit [m/s]
$\lambda$	:	Wellenlänge [m]

Die grundlegende Größe in der Radiometrie ist der **Strahlungsfluss**  $\Phi$ , definiert als die durch einen bestimmten Querschnitt  $F$  in ein bestimmtes Richtungsintervall (Raumwinkel  $\Omega$ ) sich fortpflanzende Strahlungsleistung (d. h., die Strahlungsenergie  $Q$  aller Photonen pro Zeiteinheit) (KRAUS & SCHNEIDER 1988). Die SI-Einheit des Strahlungsflusses ist [Watt]. Der Strahlungsfluss ist also eine integrale Größe, die für eine konkrete, endliche Fläche und einen konkreten Raumwinkel angegeben wird.

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \text{ [W]} \quad \text{Gl. 2}$$

mit:

$\Phi$	:	Strahlungsfluss
$\Delta t$	:	Zeit

Die Einheit des **Raumwinkels**  $\Omega$  ist der Steradian [sr]. Ein Raumwinkel hat die Größe 1 sr, wenn er aus der Einheitskugel eine Fläche  $F_1=1$  heraus schneidet. Die Größe eines Raumwinkels, der aus einer Kugel mit dem Radius  $r$  eine Kugelkalotte der Fläche  $F$  heraus schneidet, ist

$$\Omega = \frac{F}{r^2} \quad \text{Gl. 3}$$

mit

$\Omega$	:	Raumwinkel
$r$	:	Radius

Der Raumwinkel  $\Omega$  eines Objektes, welches einen Punkt vollkommen umgibt, ist  $4 \pi$  sr. Der Raumwinkel  $\Omega$ , der von einem Halbraum aufgespannt wird, ist  $2 \pi$  sr (Hemisphäre).

Setzt man den sich ausbreitenden Strahlungsfluss ins Verhältnis zu einem Flächenelement  $\Delta F$ , durch das sich dieser fortpflanzt, so ergibt sich hieraus als Dichtegröße die **Strahlungsflussdichte** (*radiant flux density*), die unabhängig von der Flächengröße ist. Zunächst wird als Flächenelement  $\Delta F$  der durch  $\Omega=2\pi$  aufgespannte Halbraum angenommen und der Quotient aus Strahlungsfluss und Flächenelementgröße gebildet.

In der Fernerkundung werden für diese Größe je nach Richtung der sich ausbreitenden Strahlung zwei Bezeichnungen verwendet. Die **Bestrahlungsstärke** (*irradiance*) beschreibt den aus dem Halbraum auf ein Oberflächenelement  $\Delta F$  auftreffenden Strahlungsfluss  $\Delta\Phi$ :

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta F} [W m^{-2}] \quad \text{Gl. 4}$$

mit  
 $E$  : Bestrahlungsstärke  
 $\Delta\Phi$  : Strahlungsfluss

Strahlt das Oberflächenelement  $\Delta F$  die Leistung  $\Delta\Phi$  in den Halbraum ab, so heißt

$$M = \frac{\Delta\Phi}{\Delta F} [W m^{-2}] \quad \text{Gl. 5}$$

mit  
 $M$  : spezifische Ausstrahlung  
 $\Delta\Phi$  : Strahlungsfluss

die **spezifische Ausstrahlung** (*radiant exitance / emittance*). Die Einheit ist jeweils  $W m^{-2}$ .

Der Strahlungsfluss, der sich von einer angenommen punktförmigen Strahlungsquelle in eine bestimmte Richtung ausbreitet, ist die **Strahlstärke** (*radiant intensity*). Die Strahlstärke  $I$  ergibt sich durch das Verhältnis von Strahlungsfluss und Raumwinkel und verhält sich zu der Größe dieses Raumwinkels proportional.

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega} [W sr^{-1}] \quad \text{Gl. 6}$$

mit  
 $I$  : Strahlstärke  
 $\Delta\Omega$  : Raumwinkelement

Die Strahlstärke ist im Allgemeinen richtungsabhängig. Die Richtung im Raum kann allgemein charakterisiert werden durch zwei ebene Winkel ( $\theta$ =Zenitwinkel und  $\varphi$ =Azimutwinkel). Die funktionale Abhängigkeit der Strahlstärke von der Abstrahlungsrichtung  $I(\theta, \varphi)$  kann allerdings nur empirisch ermittelt werden.

Unter der Annahme einer idealisierten, vollkommen diffusen Emission ist die auf das Flächenelement des Strahlers ( $\Delta F$ ) bezogene Strahlstärke  $I$ , die in eine bestimmte Richtung  $\theta$  emittiert wird proportional zum Kosinus der Richtung ( $\cos\theta$ ). Die entsprechende Proportionalitätsgröße heißt Strahldichte.

Die **Strahldichte**  $L$  (*radiance*) ist unter der Annahme einer ebenen Lichtquelle sowohl auf deren Fläche als auch auf das Raumwinkelement  $\Delta\Omega$ , welches sich in die Richtung  $\theta$  ausbreitet, bezogen. Sie ist definiert als Strahlungsfluss  $\Phi$ , der von einem Lambertstrahler mit der Oberfläche  $\Delta F$  in einen Raumwinkel  $\Delta\Omega$  emittiert wird.

$$L = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega * \Delta F * \cos \theta} \quad [Wm^{-2}sr^{-1}] \quad \text{Gl. 7}$$

mit

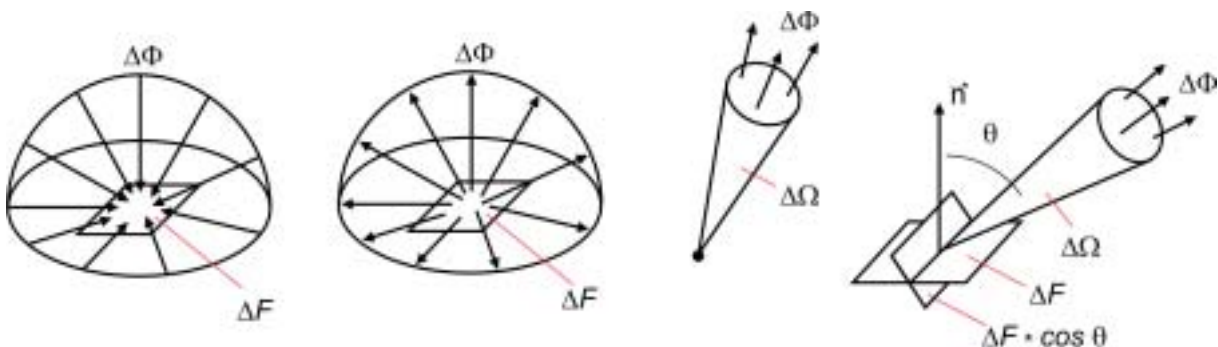
$L$	:	Strahldichte
$\Delta\Phi$	:	Strahlungsfluss
$\Delta\Omega$	:	Raumwinkelement
$\theta$	:	Zenitwinkel

Die Strahldichte ist theoretisch unabhängig von der Entfernung zum Objekt bzw. zum Sensor, so lange keine Änderungen des Blickwinkels stattfinden. Diese Annahme ist jedoch nur für das Modell eines geschlossenen physikalischen Strahlungsprozesses gültig. In der Realität des offenen physikalischen Systems Erde kommt es in der Regel zu einer Beeinflussung der aufgezeigten Gesetzmäßigkeiten und Parameter wie Ausbreitungsgeschwindigkeit und Ausbreitungsrichtung und auch zu einer "Vernichtung" von Strahlung (Absorption).

Die hier genannten, für die Aufnahme und Interpretation von Fernerkundungsdaten wesentlichen strahlungsphysikalischen Prozesse sind in Abb. 5 zusammenfassend graphisch dargestellt.

Die genannten strahlungsphysikalischen Größen werden in der Regel wellenlängen- bzw. frequenzabhängig betrachtet. Entsprechend dem Substantiv "Spektrum" (wellenlängenabhängige Verteilung bzw. Zusammensetzung einer Strahlung, vgl. ERB [Hrsg.] 1989: 6) wird deshalb das Adjektiv "spektral" zusätzlich zur Beschreibung einer spektroradiometrischen Strahlungsgröße verwendet. Die spektrale strahlungsphysikalische Größe ist jeweils als Differentialquotient aus dieser Größe und der Wellenlänge  $\lambda$  definiert.

Das übliche Symbol der jeweiligen strahlungsphysikalischen Größe wird beibehalten und zur Kennzeichnung der spektralen Abhängigkeit durch den Index  $\lambda$  gekennzeichnet (z. B. spektraler Strahlungsfluss  $\Phi_\lambda$  [W/nm]). Sämtliche hier aufgeführten Begriffe, Einheiten und Definitionen sind in Tab. 2 zusammengefasst.



**Abb. 5: Radiometrische Strahlungsgrößen: (a) Bestrahlungsstärke  $E$ , (b) spezifische Ausstrahlung  $M$ , (c) Strahlstärke  $I$ , (d) Strahldichte  $L$  (verändert nach KRAUS & SCHNEIDER 1988)**



Tab. 2: Größen und Einheiten der Spektroradiometrie (nach ERB 1989, SCHMIDT 2000, u.a.)

Begriff (Term)	Symbol	SI-Einheit	vereinfachte Erklärung
<b>spektrale Strahlungsenergie</b> (spectral radiant energy)	$E/Q_\lambda$	W s = J	Energieausbreitung in Wellen- oder Teilchenform
<b>spektraler Strahlungsfluss / Strahlungsleistung</b> (spectral radiant flux)	$\Phi_\lambda$	W nm <sup>-1</sup>	Quotient aus spektraler Strahlungsenergie Q und Zeit t
<b>spektrale Strahlungsflussdichte</b> (spectral radiant flux density)		W nm <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	spektraler Strahlungsfluss pro Fläche
<b>auf Strahler bezogen: spektrale spezifische Ausstrahlung</b> (radiant exitance / emittance)	$M_\lambda$	W nm <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	spektraler (Ausgangs-) Strahlungsfluss pro (Strahler-) Fläche
<b>auf Empfänger bezogen: spektrale Bestrahlungsstärke</b> (irradiance)	$E_\lambda$	W nm <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	spektraler (Eingangs-) Strahlungsfluss pro (Empfänger-) Fläche
<b>spektrale Strahlstärke</b> (radiant intensity)	$I_\lambda$	W nm <sup>-1</sup> sr <sup>-1</sup>	spektraler Strahlungsfluss je Raumwinkel
<b>spektrale Strahldichte</b> (radiance)	$L_\lambda$	W nm <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup>	spektraler Strahlungsfluss pro Fläche und Raumwinkel

### 2.1.2 Spektrale Reflexion

Die optische Strahlung wird beim Auftreffen auf ein Objekt aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften des Objektes reflektiert, gebrochen, absorbiert oder durchdringt dieses (Transmission). Da im Rahmen der durchgeführten Arbeiten ausschließlich die reflektierte Komponente der Strahlung (inkl. Streulicht) erfasst wurde, wird bei den nachfolgenden Erläuterungen ausschließlich auf diesen Anteil der Strahlung Bezug genommen.

Die Wechselwirkungen optischer Strahlung mit Materialien können durch physikalische Größen beschrieben werden. Bei Ihrer Definition bezieht man sich gewöhnlich auf den richtungsunabhängigen Strahlungsfluss  $\Phi$ , der auf das Objekt fällt. Die Strahlung kann diffus, gerichtet oder gemischt reflektiert werden. Das Verhältnis der in den Halbraum ( $2\pi$  sr) reflektierten Strahlung zur Einstrahlung aus dem Halbraum wird als **Reflexionsgrad**  $\rho$  bezeichnet. Analog hierzu steht der für die solare Komponente der Strahlung definierte Begriff **Albedo**.

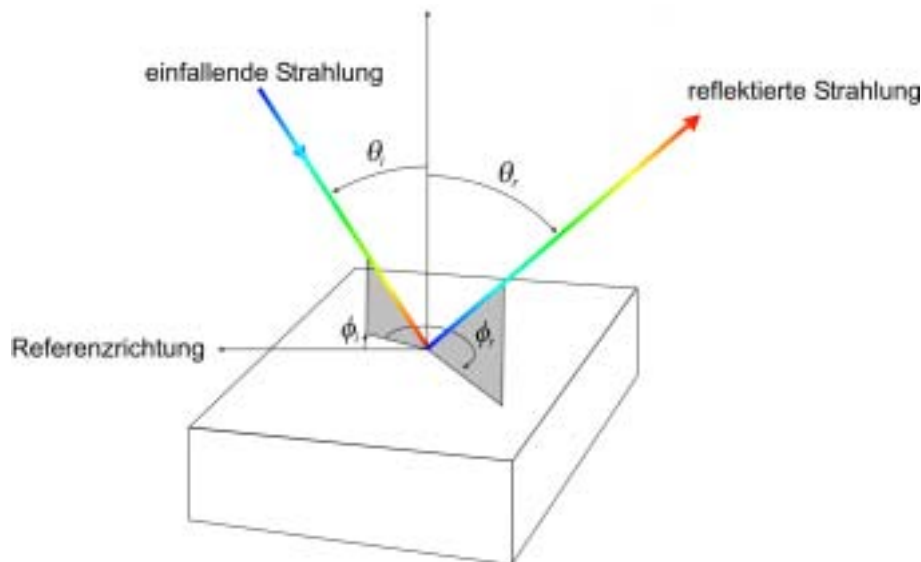
Der Reflexionsgrad (*reflectance*) ist der am häufigsten verwendete Begriff für den Quotienten aus reflektiertem und auffallendem Strahlungsfluss  $\Phi$ .

$$\rho = \frac{\Delta\Phi_t}{\Delta\Phi_r} \quad \text{Gl. 8}$$

mit

- $\rho$  : Reflexionsgrad
- $\Phi_t$  : einfallender Strahlungsfluss
- $\Phi_r$  : reflektierter Strahlungsfluss

In einer natürlichen Umgebung ist diese vereinfachte Ideal-Konstellation der Einstrahlung / Reflexion nicht gegeben. Die Hauptstrahlungsquelle befindet sich immer in einer bestimmten Position zum Objekt, welche durch einen **Horizontalwinkel**  $\varphi$  (Azimutwinkel) und einen **Vertikalwinkel**  $\theta$  (Zenitwinkel) von einer Normalrichtung bzw. Flächennormalen angegeben wird (siehe Abb. 6).



**Abb. 6: Reflexionsgeometrie einer ebenen Oberfläche (verändert nach MILTON 1987)**

Daneben empfängt ein Objekt noch einen gewissen Anteil in der Atmosphäre gestreuten Lichts (diffuses Himmelslicht). Die Summe der einfallenden Bestrahlungsstärke  $E$  wird an der Oberfläche des Objektes zu einem Teil reflektiert, wobei die Oberfläche niemals die Strahlung perfekt diffus reflektiert. Das heißt, die Menge der in eine bestimmte Richtung reflektierten Strahlung und damit der Reflexionsgrad ist immer eine Funktion der Geometrie der einfallenden und reflektierten Strahlung.

$$\rho(\theta_r, \varphi_r) = \frac{\Delta L(\theta_r, \varphi_r)}{\Delta E} \quad \text{Gl. 9}$$

mit

- $\rho(\theta_r, \varphi_r)$ : richtungsabhängiger Reflexionsgrad
- $\Delta E$  : Bestrahlungsstärke aus dem Halbraum
- $\Delta L$  : gerichtete reflektierte Strahldichte
- $\theta_r$  : Zenitwinkel der gerichteten solaren Reflexion
- $\varphi_r$  : Azimutwinkel der gerichteten solaren Reflexion

Um das Reflexionsverhalten eines Körpers ganzheitlich zu beschreiben, müsste man also die Reflexion unter sämtlichen Einstrahlungs- und Reflexionsbedingungen messen. Hierzu werden sog. Goniometer verwendet (siehe z. B. SANDMEIER & ITTEN 1999). Diese sind in der Lage die bidirektionale Strahlungsgeometrie (Ein- und Ausfallswinkel der Strahlung) kontinuierlich für den Halbraum zu messen (bidirectional reflectance distribution function, BRDF). In der Regel beschränken sich solche Messungen jedoch auf das Labor, da im Feldversuch nur in eingeschränktem Maße die Möglichkeit besteht, gerichtete spektrale Bestrahlung auf eine Objektoberfläche zu messen.

Eine Alternative zu BRDF-Messungen stellen standardisierte Messungen der reflektierten Strahlung einer (quasi-) vollkommen diffusen Referenzfläche (Lambert-Reflektor) dar. Diese werden unter den gleichen Bedingungen (Intensität und Geometrie) durchgeführt, wie die Messungen des Objektes und zu diesen ins Verhältnis gesetzt. Sowohl das Objekt als auch die Referenzfläche werden von einem relativ schmalen, konischen Blickfeld (field of view, FOV) erfasst.

$$R(\theta_t, \varphi_t, \theta_r, \varphi_r) = \frac{\Delta L_r(\theta_r, \varphi_r)}{\Delta L_t(\theta_t, \varphi_t)} \quad \text{Gl. 10}$$

mit

$R$	:	Reflexionsfaktor
$\Delta L_t$	:	gerichtete reflektierte Strahldichte (Referenz)
$\Delta L_r$	:	gerichtete reflektierte Strahldichte (Objekt)
$\theta_t$	:	Zenitwinkel Referenzmessung
$\varphi_t$	:	Azimutwinkel Referenzmessung
$\theta_r$	:	Zenitwinkel Objektmessung
$\varphi_r$	:	Azimutwinkel Objektmessung

Dieser für die spektroskopische Praxis entscheidende Anteil der reflektierten Strahlung wird **gerichteter Reflexionsgrad**  $\rho_r$  oder **Reflexionsfaktor**  $R$  genannt. Der Reflexionsfaktor (*reflectance factor*) gibt das Verhältnis an zwischen der von einem Objekt in eine bestimmte Richtung reflektierten Strahldichte und der von einem vollkommen und absolut diffus reflektierenden weißen Lambert-Reflektor bei gleicher Beleuchtung reflektierten Strahldichte  $L$ . Der Reflexionsfaktor unterscheidet sich vom bidirektionalen Reflexionsfaktor (*bidirectional reflectance factor*, BRF) um den Korrekturfaktor  $k$ . Dieser richtungs- und intensitätsabhängige Faktor berücksichtigt die Abweichungen des Reflexionsstandards von einem vollkommen diffusen Reflektor (Lambert-Reflektor), der in der Praxis nicht existiert. Der Korrekturfaktor wird allerdings für die weiteren Betrachtungen außer acht gelassen, da er im Rahmen der durchgeführten spektroskopischen Messungen nicht quantifiziert werden konnte. Reflexionsgrad und Reflexionsfaktor können ähnlich den strahlungsphysikalischen Größen als Funktion der Wellenlänge betrachtet werden. Der **spektrale Reflexionsfaktor**  $R_\lambda$  (*spectral reflectance factor*) wird entsprechend auf  $\lambda$  oder den Spektralbereich  $\Delta\lambda$  bezogen<sup>7</sup>.

Mit dem ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro JR Spektrometer (vgl. Kap. 4.1) wird der *spektrale Reflexionsfaktor*  $R_\lambda$  gemessen und aus diesem Grunde im weiteren Verlauf der Arbeit als grundlegende spektroradiometrische Größe verwendet.

<sup>7</sup> Synonym wird für den Begriff Reflexionsfaktor gelegentlich *directional reflectance factor* oder *reflectance factor for hemispherical incidence* benutzt. Letzteres grenzt den Begriff gegen *bidirectional reflectance factor* (BRF) ab, der diffuse Einstrahlung aus einer bestimmten Richtung - nicht aus dem Halbraum - und diffuse Reflexion in eine bestimmte Richtung zugrunde legt.

## 2.2 Ursachen spektraler Absorption in flüssigen und festen Körpern

Die Interaktion elektromagnetischer Strahlung mit Materie beinhaltet auf der einen Seite die Prozesse, welche als Streuung zusammengefasst werden können, nämlich Reflexion und Refraktion auf ein Objekt treffender Strahlung und auf der anderen Seite Absorption der in ein Objekt eindringenden Strahlung. Das Verhältnis zwischen Streuung und Absorption bestimmt die maximale Menge der Photonen, die von einem Objekt an einem Sensor registriert werden.

Generell werden bei der Interaktion solarer Strahlung mit Materie Energiequanten (Photonen) an die Materie abgegeben und dort umgesetzt. Die Energie, welche dabei produziert wird, wird in unterschiedlicher Weise weitergegeben:

- ⇒ spontane Abgabe in gleichen Energiequanten, jedoch unter Richtungsänderung  
→ **Streuung / Reflexion / Refraktion**
- ⇒ zeitlich verzögerte Abgabe, ggf. in veränderter Wellenlänge  
→ **Fluoreszenz / Phosphoreszenz**
- ⇒ Umwandlung in kinetische Energie der Moleküle  
→ **Absorption**

Für die fernerkundliche Auswertung ist zunächst vor allem die Reflexion von Bedeutung, da ausschließlich dieser Teil der Energie am Sensor gemessen werden kann. Der Anteil der reflektierten solaren Strahlung ist aber direkt abhängig von dem Anteil der absorbierten Strahlung, weshalb weiter unten in diesem Kapitel insbesondere auf die Prozesse der Absorption elektromagnetischer Strahlung eingegangen werden soll.

Der Anteil des Strahlungsflusses, der nicht an der Oberfläche oder inneren Struktur des Mediums reflektiert wird, dringt ein und wird absorbiert. Die Schwächung der Strahlung ist proportional zur Stärke des Strahlungsflusses, zur Weglänge  $x$ , die in dem Medium zurückgelegt wird (Eindringtiefe) und zu einem Extinktionskoeffizienten  $\mu$  (Bouguer-Lambert-Gesetz). Der **Extinktionskoeffizient**  $\mu$  wiederum ist in den meisten Fällen proportional zur **Konzentration**  $c$  eines Bestandteils des betrachteten Mediums. Die Gesamtheit dieser Zusammenhänge wird ausgedrückt im Lambert-Beer-Gesetz:

$$\Phi(x, c) = \Phi_0 * e^{-\mu c x} \quad \text{Gl. 11}$$

mit

$\Phi(x, c)$	:	transmittierter Strahlungsfluss
$\Phi_0$	:	ursprünglich in das Medium eindringender Strahlungsfluss
$\mu$	:	Extinktionskoeffizient
$x$	:	Eindringtiefe / Schichtdicke des Mediums
$c$	:	Stoff-Konzentration

Der Extinktionskoeffizient  $\mu$  (und damit auch die Konzentration  $c$ ) ist eine komplexe Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  und eine fundamentale Größe zur Beschreibung der Interaktion von Materie mit Strahlung, besonders im Bereich der solaren Strahlung im sichtbaren Licht und im Nahen Infrarot (nähere Erklärungen hierzu z. B. bei ERB [HRSG.] 1989). Für die quantitative Analyse spektroradiometrischer Messungen im Bereich der solaren Reflexion müssen aber streng genommen bei der Anwendung des Lambert-Beer-Gesetzes bestimmte Bedingungen bzw. Einschränkungen berücksichtigt werden. Die wichtigste Voraussetzung für die direkte, absolute Ableitung von Konzentrationen aus Absorptions- bzw. Reflexionsmessungen besteht in dem Ausschluss von Wechselwirkungen unter den absorbierenden

Molekülen. Dies ist insbesondere bei Bestandteilen biologischer Proben (z. B. Proteine in Pflanzenteilen) mit nicht-destruktiven spektroskopischen Verfahren nicht einhaltbar.

Zum Verständnis der verschiedenen möglichen Absorptionsprozesse in einem natürlichen Körper, die von dem elektrischen Feld elektromagnetischer Strahlung verursacht werden, wird zunächst kurz auf die Herkunft der Strahlungsenergie eingegangen.

Die Energiequellen für die Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung können unterschiedlicher Herkunft sein und werden grundsätzlich in kontinuierliche und linienhafte bzw. diskontinuierliche Strahlungsquellen unterschieden. Diskontinuierliche Quellen produzieren entweder eine oder mehrere Emissionslinien als Resultat der Änderung diskreter Energiezustände der Energiequelle (Lumineszenzstrahler). Wichtige Lumineszenzstrahler für die optische Spektroskopie sind z. B. Gasentladungslampen, Leuchtdioden und Laser (siehe z. B. KOSTKOWSKI 1997 und SCHMIDT 2000).

Für fernerkundliche Anwendungen zur Abbildung der Erdoberfläche sind derartige Strahlungsquellen, abgesehen von hochpräzisen Lasern jedoch nicht geeignet. Kontinuierliche Strahlungsquellen, wie z. B. die Sonne emittieren lückenlos Strahlungsenergie über einen breiten Spektralbereich. Die spektrale Verteilung der Strahlungsenergie ist abhängig von den thermodynamischen Eigenschaften des Strahlungskörpers, die über das Plancksche-Strahlungsgesetz ausgedrückt werden (vgl. z. B. KRAUS & SCHNEIDER 1988) und nimmt für einen idealen Strahler (Schwarzkörper) den Verlauf einer flachen Kurve mit einem Maximum der Strahlungsenergie bei der Wellenlänge  $\lambda_{max}$  an (Temperaturstrahler).

Dieser idealisierte, wellenlängenabhängige Strahlungsverlauf wird zum einen durch die Oberflächenbeschaffenheit des emittierenden Körpers einheitlich oder selektiv abgeschwächt und zum anderen durch das zu durchdringende Medium (im Falle der Erdfernerkundung: Atmosphäre) beeinträchtigt.

Geht man, für den einfachsten Fall einer homogenen Atmosphäre, von einer konstanten wellenlängenspezifischen Extinktion der elektromagnetischen Strahlung aus, erreicht diese ein Objekt und wird von diesem absorbiert oder reflektiert. Die reflektierte Komponente der Strahlung wird am Detektor des Sensors registriert. Die Stärke der Absorption des verbleibenden Teils der elektromagnetischen Strahlung wird durch zwei grundlegende Prozesse bestimmt:

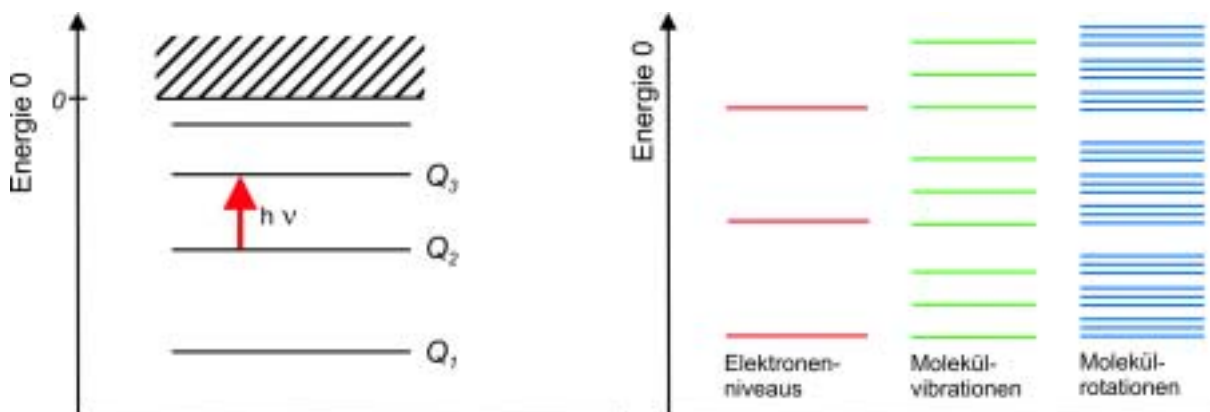
- (1) **elektronische Prozesse** in der Elektronenhülle von Atomen (Ladungstransfer, v.a. im Chlorophyll, VIS)
- (2) **Schwingungs- und Rotationsprozesse** von dipoligen Molekülverbindungen.

Äquivalent zur weiter oben beschriebenen linienhaften Emission von Strahlungsenergie bei Lumineszenzstrahlern kann es in einzelnen Atomen oder Ionen zur Anregung von fest gebundenen Elektronen in einen höheren Energiezustand kommen. Hierzu ist die selektive Aufnahme von Energie eines diskreten Energieniveaus notwendig, wie sie von Photonen elektromagnetischer Strahlung mit einer bestimmten Frequenz  $\nu$  bzw. Wellenlänge  $\lambda$  geliefert wird. Die Photonen einer bestimmten Wellenlänge müssen hierbei genau den Energiebetrag aufbringen, der für die Überwindung der Energiedifferenz zwischen den Energieniveaus benötigt wird (CLARK 1999). Die Energiebeträge sind abhängig vom Valenzstadium des Atoms, dessen Ordnungsnummer und der Art der eingegangenen Verbindung mit anderen Atomen. Wenn die Photonenenergie mit der Differenz zweier Energieniveaus übereinstimmt, kommt es zur Energieabgabe von Photonen an die Elektronen und damit zur Absorption von Strahlung. Jedes Atom absorbiert aufgrund der Energieniveaus in den Elektronenhüllen stets nur Strahlung bestimmter Photonenenergien bzw. Wellenlängen  $\lambda$ , was die Entstehung von Absorptionslinien erklärt.

Neben den Elektronenschalenübergängen können Elektronen auch zwischen Ionen bzw. Ionen und Liganden oder Elementen in unterschiedlichen Valenzstadien ausgetauscht werden. Dieser Ladungstransfer verursacht sehr viel stärkere Absorptionen, findet aber sehr viel seltener und hauptsächlich in kürzeren Wellenlängen (UV, Röntgenstrahlung) statt, weshalb er für die Fernerkundung von untergeordnetem Interesse ist.

Das spektrale Verhalten von Molekülen ist, ähnlich der spektralen Eigenschaften von Atomen, vom Aufbau und der chemischen Bindung ihrer atomaren Einzelkomponenten abhängig. Die Bindung in einem Molekül beruht auf der Wechselwirkung einzelner Elektronen der Atome mit den Atomkernen und den anderen Elektronen. Betroffen sind von diesen Prozessen fast ausnahmslos die äußeren Elektronenschalen der Atome (Valenzelektronen). Die Anregung der Bindungen in einem Molekülverband durch Photonenenergie führt zu Vibrations- (Schwingungs-) und Rotationsbewegungen der Bindungselemente bzw. des gesamten Moleküls. Die Frequenz der Schwingung ist abhängig von der Stärke der Bindung und der Masse jedes einzelnen Elementes bzw. Atoms innerhalb eines Moleküls. Voraussetzung für die Erfassung der Schwingungsabsorptionen ist der Dipolcharakter des Moleküls. Das heißt, dass symmetrische Moleküle, wie z. B.  $N_2$  im Normalzustand keine Schwingungsprozesse aufweisen.

Ebenso wie bei den Elektronenübergängen kommen ausschließlich diskrete Energieniveaus vor, die Abstände der Vibrationsenergieniveaus sind jedoch sehr viel kleiner als die der Elektronenniveaus. Die Rotationsniveaus liegen noch sehr viel enger beieinander. Insgesamt kommt es zu einer Aufspaltung der Elektronenenergieniveaus durch die Vibrations- und Rotationsniveaus (Abb. 7).



**Abb. 7: Energieniveauschemata von Atomen (links) und Molekülen (rechts) (verändert nach KRAUS & SCHNEIDER 1988)**

Die Anzahl der möglichen Energieniveaus, zwischen denen bei Photonenabsorption Anregungen stattfinden können, erhöht sich exponentiell mit der Komplexität der Molekülstruktur. Die Absorptionsspektren sind nicht mehr einzelne Linien sondern bilden Bandenspektren, die den Eindruck kontinuierlicher Absorptionsbereiche erwecken. Betrachtet man flüssige oder feste Körper, führt die Vibration und Rotation von Bindungen bzw. Molekülen zusätzlich zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Moleküle bzw. der Nachbaratome und Bindungselektronen in den Elektronenhüllen. Die Anzahl der möglichen Energiezustände erhöht sich hierdurch weiter, so dass kontinuierliche Absorptionsspektren entstehen.

Der Übergang zwischen zwei Energieniveaus ist, wie bereits weiter oben erwähnt, immer an einen diskreten Energiebetrag gebunden, weshalb bestimmte Prozesse immer nur in einem begrenzten Wellenlängenbereich  $\Delta\lambda$  nachgewiesen werden können. Je kleiner die Wellenlänge und je größer die Frequenz elektromagnetischer Strahlung ist, umso höher ist der an ein Atom bzw. Molekül abzugebende Energiebetrag eines Photons. Elektronenübergänge werden hauptsächlich durch Strahlung im sichtbaren Bereich und kürzerer Wellenlängen angeregt,

Schwingungen und Rotationen sind die Folge von Energieabgabe längerer Wellenlängen (NIR, MIR, FIR). Sämtliche Prozesse können einander überlagern und miteinander kombiniert werden und nach den ihnen zugrunde liegenden Ursachen weiter untergliedert werden. Eine Übersicht über die möglichen Absorptionsprozesse und deren Ursachen gibt die INFOBOX I.

**INFOBOX I:**

**Ursachen natürlicher Absorptionsmerkmale elektromagnetischer Strahlung**

**1. Elektroneneffekte (Atom)**

**a. Kristalleffekte (crystal field effects), VIS / NIR**

Energieniveaus der Ionen von Übergangselementen in einem Kristallverbund (z. B. Fe, Cu, Ni, Mg) werden aufgebrochen und nehmen neue Energieniveaus an  
Energieniveau abhängig von Valenzstatus, Ordnungsnummer, Symmetrie  
kein Rückschluss auf Minerale möglich, nur auf das Vorkommen von Ionen / Kationen

**b. Ladungstransfer (charge transfer), UV / VIS**

Elektronenübergänge zwischen Ionen, Ionen und Liganden, Valenzstadien  
Absorptionsmerkmale stärker bestimmt durch Mineralogie als durch Kationen-Vorkommen

**c. Leitungsbanden (conduction bands), VIS / NIR**

Elektronenübergänge von Valenzelektronen in Atomen  
häufigster Elektroneneffekt in natürlichen Stoffen und Flüssigkeiten

**2. Schwingungseffekte (Molekül)**

- Voraussetzung: Dipolcharakter des Moleküls
- mögliche Schwingungsprozesse: Krümmung, Dehnung, Verformung

**a. Grundschnwingungen (fundamentals), MIR / FIR**

Zahl möglicher Grundschnwingungen:  $3 \cdot n - 6$  (n = Anzahl von Einzelatomen)

**b. Oberschnwingungen, NIR / MIR**

ganzzahlige Vielfache bzw. Teile der Grundschnwingungen

**c. Kombinationen, NIR / MIR**

Kombinationen der Grundschnwingungen

**3. Rotationseffekte (Molekül), NIR / MIR / FIR**

- a. grundsätzlich nur bei asymmetrischen Molekülen
- b. mehratomige Moleküle besitzen generell 3 Möglichkeiten der Drehung und damit der Energieaufnahme

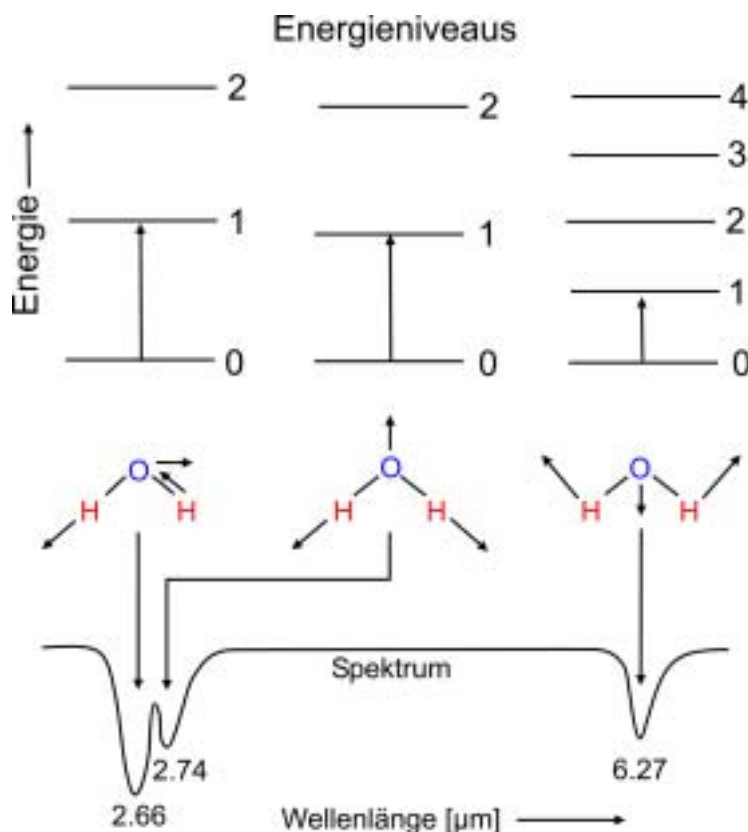
Zum allgemeinen Verständnis und der Erleichterung der Interpretation von Absorptionsbanden in Spektralsignaturen natürlicher Oberflächen wird im Folgenden das Prinzip der elektronischen Prozesse und der Schwingungsprozesse jeweils anhand eines Beispiels erläutert.

### Beispiel 1: Wasser

Von entscheidender Bedeutung für spektroskopische Untersuchungen im Infrarotbereich sind die durch dipolige Molekülverbindungen verursachten **Schwingungsprozesse** (*vibrations*). Schwingungsenergie wird produziert, indem sich einzelne Atome relativ zueinander in einem festen Verbund / Molekül bewegen (s.o.). Die für Schwingungsprozesse benötigten Energien werden durch Strahlung im MIR, SWIR und NIR (vgl. Tab. 1) aufgebracht. In Bezug auf die fernerkundliche Erfassung der Vibrationsprozesse spricht man in diesem Zusammenhang von der Infrarot-Aktivität der Moleküle (CLARK 1999).

Die Zahl möglicher Schwingungen von Molekülen nimmt mit der Anzahl  $n$  von Einzelatomen stark zu. Ein Molekül mit  $n$  Atomen weist  $3 \cdot n - 6$  fundamentale Schwingungsfrequenzen (**Grundschwingungen**) auf (SCHMIDT 2000). Jede Schwingung kann darüber hinaus bei ganzzahligen Vielfachen bzw. Teilen dieser Frequenzen (**Oberschwingungen**) oder Kombinationen zwischen den fundamentalen Frequenzen auftreten (**Kombinationsschwingungen**).

Die markantesten Schwingungsabsorptionen werden durch Wasser- und Hydrogen-(OH) Verbindungen verursacht. Das Wassermolekül besitzt bei  $n=3$  ( $H_2O$ )  $3n-6$ , also drei Grundschwingungen. Diese treten in einem isolierten Molekül bei  $\nu_1=2,738$ ,  $\nu_2=6,270$  und  $\nu_3=2,663$   $\mu m$  auf (Abb. 8). In flüssigem Wasser kommt es aufgrund der Hydrogen-Bindungen zu einem Versatz der Frequenzen. Die fundamentalen Schwingungen der Moleküle von flüssigem Wasser treten bei  $\nu_1=3,106$  (symmetrische Dehnung),  $\nu_2=6,079$  (Krümmung) und  $\nu_3=2,903$   $\mu m$  (asymmetrische Dehnung, Verformung) auf (vgl. HUNT 1980).



**Abb. 8:** Schwingungsbanden (Grundschwingungen) und Elektronenenergieniveaus des Wassermoleküls (verändert nach HUNT 1980)



Die erste Oberschwingung von Wasser bzw. der Krümmung und Dehnung der symmetrischen O-H-Bindungen des Wassermoleküls tritt bei ca. 1,4  $\mu\text{m}$  auf. Die Kombination der H<sub>2</sub>O-Bindungen mit der OH-Bindung des Hydroxyl-Moleküls führt zur Absorption elektromagnetischer Strahlung im Bereich von 1,9  $\mu\text{m}$ . Diese beiden Absorptionsbereiche treten in jeder bei natürlicher Beleuchtung im Gelände aufgenommenen Spektralsignatur auf und sind das Resultat der Wasserdampfabsorption der solaren Strahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre. Insgesamt gibt es im SWIR-Bereich (1,0 bis 2,5  $\mu\text{m}$ ) vier wesentliche Absorptionsbereiche, welche durch die Krümmung und Dehnung der O-H-Bindung in Wasser- und anderen Molekülen verursacht werden (ca. 0,98; 1,20; 1,40; 1,94  $\mu\text{m}$ ).

Eine Übersicht der im NIR und SWIR auftretenden Grund-, Ober- und Kombinationsschwingungen von Wassermolekülen in flüssigem Wasser ist Tab. 3 zu entnehmen.

**Tab. 3: Schwingungsprozesse und Absorptionsbanden von flüssigem Wasser**

Energieniveau	Wellenlänge [ $\mu\text{m}$ ]	Modus
$v_2$	6,079	Grundschiwingung
$v_1$	3,106	Grundschiwingung
$v_3$	2,903	Grundschiwingung
$v_1+v_2$	2,056	Kombination
$v_2+v_3$	1,965	Kombination
$2v_1$	1,553	1. Oberschiwingung
$2v_2+v_1$	1,536	Kombination
$v_1+v_3$	1,501	Kombination
$2v_2+v_3$	1,485	Kombination
$2v_3$	1,452	1. Oberschiwingung
$2v_1+v_2$	1,237	Kombination
$v_1+v_2+v_3$	1,204	Kombination
$2v_3+v_2$	1,172	Kombination
$2v_1+v_3$	1,102	Kombination
$3v_1$	1,035	2. Oberschiwingung
$2v_3+v_1$	0,989	Kombination
$3v_3$	0,968	2. Oberschiwingung
$2v_1+v_2+v_3$	0,867	Kombination
$3v_3+v_2$	0,835	Kombination

Das OH<sup>-</sup>-Ion ist Bestandteil zahlreicher organischer und anorganischer Komponenten. Hierbei existiert jeweils eine OH-Grundschiwingung  $v_1$  bei 2,77  $\mu\text{m}$ , deren exakte Lage allerdings von dessen Anbindung im Molekülkomplex abhängt. Das am häufigsten auftretende Absorptionsmerkmal im NIR ist, wie bereits oben erwähnt, die 1. Oberschiwingung bei ca. 1,4  $\mu\text{m}$ . Die Grundschiwingung des OH<sup>-</sup>-Ions kann Kombinationsschwingungen mit den Grundschiwingungen anderer X-OH-Bindungen produzieren, die im SWIR-2 Bereich zwischen ca. 2,2 und 2,3  $\mu\text{m}$  auftreten (vgl. Kap. 2.3.2.1). X steht hierbei für Al-, Mg- oder andere Ionen im Molekülverbund, die eine Bindung zum OH<sup>-</sup>-Ion aufweisen.

## **Beispiel 2: Chlorophyll**

Der für die Vegetationsfernerkundung im sichtbaren Licht (VIS) bedeutendste Prozess ist die Anregung des grünen Blattfarbstoffs Chlorophyll durch Photonenabsorption im sichtbaren Licht (vgl. Kap. 2.3.1).

Das Rohchlorophyll besteht zu ca. 80% aus Chlorophyllen (Chlorophyll a + b) und zu ca. 20% aus Carotinoiden ( $\alpha$ - +  $\beta$ -Carotin). Die **Carotinoide** sind Kohlenwasserstoffe mit der Summenformel  $C_{40}H_{56}$  und unterscheiden sich lediglich durch die Lage der Doppelbindungen in einem der endständigen Ionenringe. Die fernerkundlich aktivste Komponente der Carotinoide ist das Oxidationsprodukt der Carotine, das **Xantophyll**, welches sich durch eine zusätzliche OH-Gruppe von diesen unterscheidet. **Chlorophyll a** und **b** sind Ester, d. h. sie bestehen aus einer komplexen Verbindung organischer Säuren und Alkohole, vereinfacht aus den 3 Molekülen Chlorophyllin, Methanol und Phytol. Die Summenformeln lauten  $C_{55}H_{72}MgN_4O_5$  für Chlorophyll a und  $C_{55}H_{70}MgN_4O_6$  für Chlorophyll b (SCHANDA 1986, nähere Erläuterungen siehe SCHILLING 2000). Das Zentralatom des Chlorophyllids bildet Magnesium, umgeben von vier Stickstoffionen.

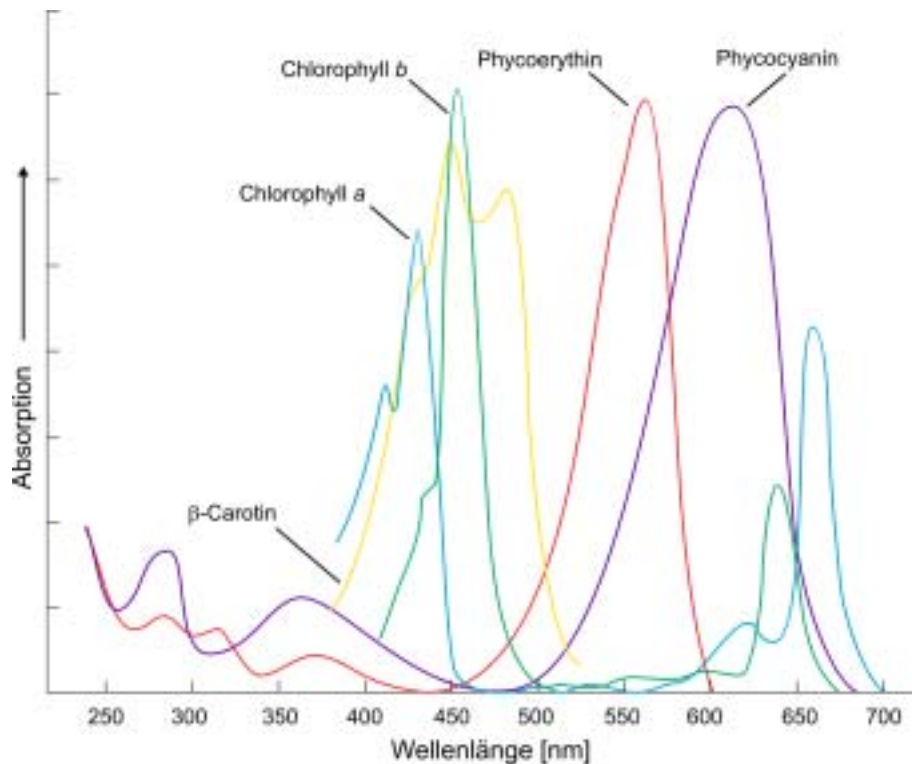
Der hier nur skizzierte komplexe Aufbau der Chlorophylle und Carotinoide lässt eine dementsprechend komplexe Struktur der Elektronenenergieniveaus vermuten, die entstehen, wenn ein Chloroplast belichtet wird.

Die Absorptionsmaxima von Chlorophyll a und b sowie der Carotinoide liegen jeweils im blauen und roten Bereich des sichtbaren Lichts:

- ⇒ Chlorophyll a : 430 nm, 660 nm
- ⇒ Chlorophyll b : 460 nm, 640 nm
- ⇒  $\beta$ -Carotin : 450 nm, 490 nm

Es handelt sich hierbei, im Gegensatz zu den Absorptionsprozessen der Wassermoleküle, ausschließlich um **elektronische Prozesse** (Elektronenübergänge), die eine höhere Energie als vibratorische und rotatorische Prozesse benötigen (s.o.) und deshalb im sichtbaren Licht und UV stattfinden. Die Elektronenübergänge finden zum einen zwischen dem Zentralatom (Magnesium) und freien Elektronen im Kristallverbund des Chlorophyll statt (crystal field effects), zum anderen in Form von Elektronenübergängen zwischen den Valenzschalen der Sauerstoff- und Stickstoffatome (charge transfer effects).

Die Absorptionsspektren der Rohchlorophyllbestandteile sind in Abb. 9 aufgezeigt. Obwohl die Absorptionskoeffizienten für Chlorophyll im roten Bereich des Spektrums sehr viel niedriger sind als im blauen Bereich kommt es hier durch diffuse Streuung im Mesophyll insgesamt zu einer fast vollständigen „Auslöschung“ der solaren Strahlung. Dieser Prozess führt auch über den kompletten Bereich des sichtbaren Lichts zu einer Schwächung der einfallenden Strahlung, weshalb auch im grünen Bereich nur ca. 10 bis 20 % reflektiert werden. Dieser Unterschied zum blauen und roten Bereich des VIS erscheint aufgrund der hohen Sensibilität des menschlichen Auges jedoch als scharfer Kontrast und führt zur Wahrnehmung vitaler Vegetation in Grüntönen (GATES 1970).



**Abb. 9:** Absorptionsspektrum von Chlorophyllkomponenten (verändert nach PURVES et al. 2001)

### 2.3 Informationsgehalt optischer Strahlung

Die Menge und spektrale Zusammensetzung der Reflexion eines Objektes ist bei gegebenen Einstrahlungsbedingungen "*objektspezifisch und für das gleiche Objekt zustandsspezifisch*" (HILDEBRANDT 1996: 30). Diese Annahme bildet die Grundlage für die Auswertung (hyper-)spektraler Bilddaten bzw. Spektralsignaturen. Es muss allerdings an dieser Stelle einschränkend darauf hingewiesen werden, dass viele Objekte in bestimmten Spektralbereichen gleich oder ähnlich reflektieren.

Unterschiedliche Materialien können aufgrund Ihrer Reflexions- bzw. Absorptionseigenschaften in bestimmten Wellenlängenbereichen gegeneinander abgegrenzt werden (qualitative Fernerkundung). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der relativen und absoluten Bestimmung von Gehalten / Konzentrationen bestimmter Materialien aufgrund quantitativer Charakteristika Ihrer spektralen Signatur (quantitative Fernerkundung).

Die Ursachen der spektralen Absorption und Reflexion natürlicher Objekte sind im vorherigen Kapitel in theoretischer Weise dargelegt. Im Folgenden werden die daraus resultierenden Unterschiede in der Spektralsignatur von Vegetationsbeständen aufgrund ihrer biophysikalischen und biochemischen Eigenschaften erörtert.

Da ein Vegetationsbestand in Bezug auf die spektrale Signatur nicht ausschließlich aus Pflanzenteilen, sondern aus einem Mosaik von Blättern, Stängeln, Boden und Schatten besteht, reicht es für die Erklärung des Reflexionsverhaltens nicht aus, nur auf die Interaktionen der elektromagnetischen Strahlung mit Pflanzenbestandteilen einzugehen. In Kap. 2.3.2.1 werden aus diesem Grunde zusätzlich die Grundlagen der spektralen Eigenschaften von Böden erläutert.

### 2.3.1 Interaktion optischer Strahlung mit Vegetation

Die optische Strahlung, die auf ein natürliches Objekt auftrifft, wird aufgrund der biophysikalischen und biochemischen Eigenschaften dieses Objektes unterschiedlich stark reflektiert.

Bei der Auswertung spektraler Eigenschaften einzelner Blätter stehen vor allem die blattimmanenten Eigenschaften (Blattaufbau, Zellstruktur, Wassergehalt, chemische Inhaltsstoffe) im Vordergrund.

Die Analyse der Spektralsignatur ganzer Pflanzen erfordert daneben die Berücksichtigung der geometrischen Struktur bzw. Morphologie (vertikale Gliederung, Blattwinkelverteilung, Bestandsdichte, Artenzusammensetzung) und des physiologischen Zustands (phänologische Stadien). Wird ein komplexer Pflanzenbestand in seiner Gesamtheit aufgenommen, muss hierbei zusätzlich der Einfluss des Bodens auf das gemessene Signal bewertet werden.

Der Einfluss der genannten Parameter auf die Reflexion ist immer in Abhängigkeit von dem gemessenen Wellenlängenbereich zu beurteilen. In Bezug auf die spektralen Charakteristika von Pflanzenbeständen dominieren im Bereich des sichtbaren Lichts (VIS) in der Regel die Absorptionsprozesse. Das nahe Infrarot (NIR) ist geprägt durch Reflexionsprozesse. Im kurzwelligen Infrarot (SWIR) sind wiederum die Absorptionsvorgänge in höherem Maße für den Verlauf der spektralen Reflexion verantwortlich.

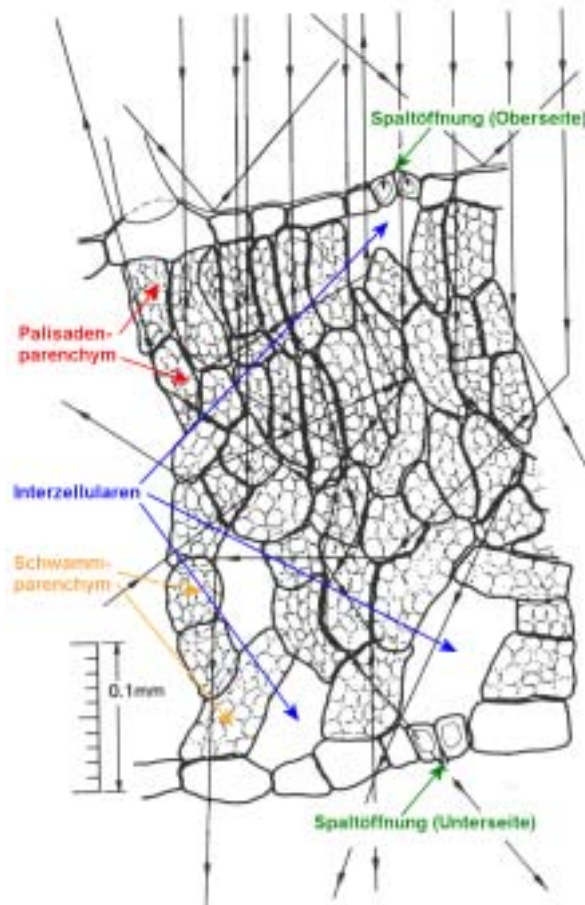
#### 2.3.1.1 Absorptionsprozesse

Im Spektralbereich des sichtbaren Lichts werden die Reflexionswerte organischer Materie vorwiegend von der Absorption der solaren Einstrahlung durch die Pigmente (Chlorophyll, Karotin, Xanthophyll, Phycocyan, vgl. Kap. 2.2) bestimmt. Hierbei werden einzelne Elektronen in der Elektronenhülle der Einzelatome bestimmter Pigmentbestandteile durch die Photonenenergie  $\Delta Q$  des sichtbaren Lichts angeregt und in ein anderes Energieniveau transformiert (siehe Abb. 7). Die aufgenommene Energie wird vom pflanzlichen Organismus für photosynthetische Prozesse genutzt, weshalb man bei der für diese Prozesse benötigten elektromagnetischen Strahlung im sichtbaren Licht auch von photosynthetisch aktiver Strahlung (photosynthetic active radiation, PAR) spricht. Die Vitalität einer Pflanze ist von Art und Umfang der PAR abhängig und eng korreliert mit der relativen und absoluten Konzentration der Pigmente.

Im Blaubereich des Spektrums (0,4 bis 0,5  $\mu\text{m}$ ) überlagern sich teilweise die Absorptionsmaxima dieser Pigmente, im Rotbereich ist dagegen (neben den Streuprozessen) ausschließlich das Chlorophyll für das Absorptionsmaximum um 0,65  $\mu\text{m}$  verantwortlich. Die für die Fernerkundung bedeutendsten Pigmente sind das Chlorophyll und die Carotinoide, da sie das Absorptionsvermögen einer Pflanze im sichtbaren Licht wesentlich bestimmen. Je nach Zustand der Pflanze, bzw. Art und Menge der vorhandenen Pigmente, unterscheidet sich die Stärke der Absorptionen. Der Schwankungsbereich liegt für die Mehrzahl der Pflanzen im Bereich zwischen 70 % und 95 % der solaren Einstrahlung (HILDEBRANDT 1996). Im grünen Spektralbereich liegt die Absorption in der Regel unter der für den blauen und roten Spektralbereich, was zur Ausbildung des für vitale Pflanzen typischen relativen Reflexionsmaximums führt (vgl. Kap. 2.2, Abb. 9).

Das Chlorophyll, als mit Abstand häufigstes Pigment, befindet sich zum größten Teil im Palisadenparenchym unterhalb der oberen Epidermis des Blattes. Hier sind etwa 80 % des Chlorophylls in den Chloroplasten gebunden. Die restlichen 20 % befinden sich im unteren Teil des Mesophylls, im Schwammparenchym. Dies resultiert in einer stärkeren Absorption der Blattoberseite im Verhältnis zur Blattunterseite, was bei der Aufnahme spektraler Signaturen von Pflanzenbeständen einen nicht unwesentlichen Einfluss auf die Reflexionsintensität haben kann. Der Aufbau eines Blattes sowie die Strahlungswege des sichtbaren Lichts durch

ein Blatt sind in Abb. 10 dargestellt. Ausführlichere Erläuterungen zum Blattaufbau, der Zellstruktur und der Photosynthese sind z. B. bei SCHILLING (2000) und GEISLER (1988) zu finden.



**Abb. 10:** Schematischer Blattaufbau und mögliche Interaktionen elektromagnetischer Strahlung (verändert nach AMBERGER 1996)

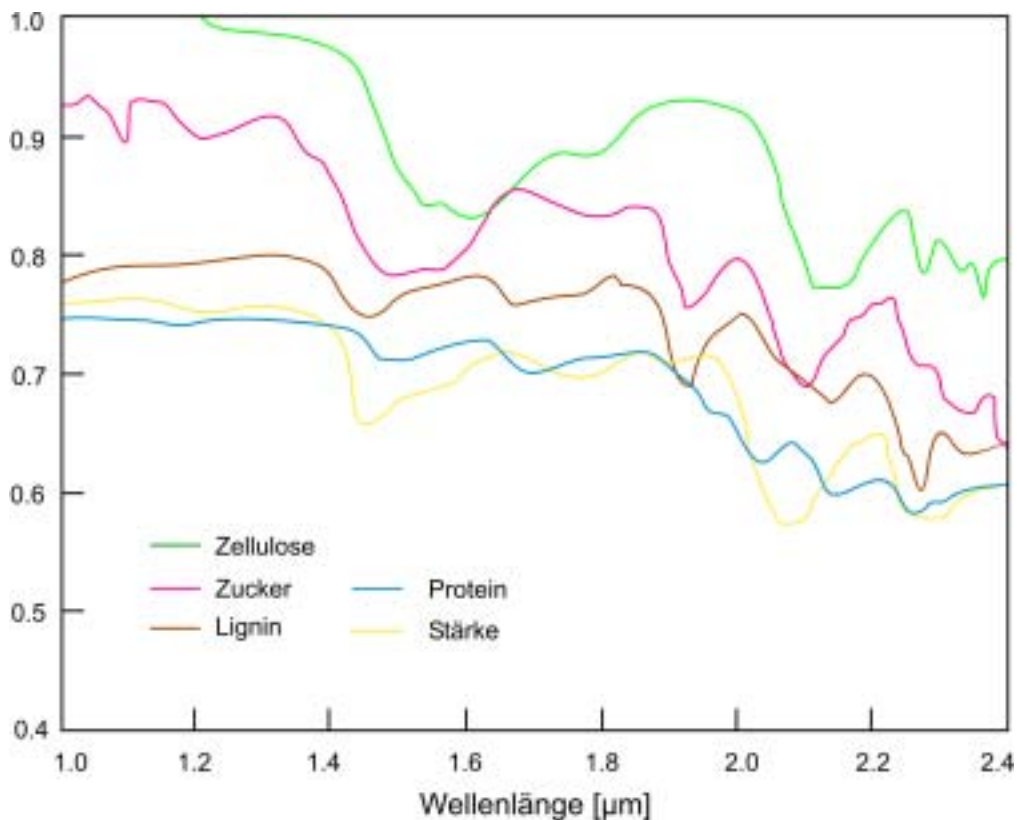
Im Laufe der Vegetationsperiode unterliegen die Pflanzen phänologischen bzw. physiologischen Zustandsänderungen. Während der Abfolge der phänologischen Stadien, kommt es zu fortlaufenden Veränderungen des Gehalts und der Zusammensetzung der Pigmente. Dies spiegelt sich in Änderungen der Reflexionscharakteristik im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums wieder.

Beim natürlichen Alterungsprozess bzw. der Abreife sowie unter dem Einfluss von Stressoren, kommt es zu einer Umwandlung und schließlich zum Abbau des Chlorophylls. Dies verursacht grundsätzlich eine Abnahme der PAR-Absorption und in den meisten Fällen eine Verschiebung der Absorptionsmaxima zu größeren Wellenlängen im Bereich des sichtbaren Lichts.

Im nahen Infrarot (NIR) dominieren die Reflexionsprozesse an den Pflanzenorganen. Diese sind in Kap. 2.3.1.2 dargestellt. Im kurzwelligen Infrarot (SWIR) hingegen stehen Prozesse der Absorption elektromagnetischer Strahlung bei der Interpretation des Signaturverlaufs für Pflanzenbestände im Vordergrund. Die Reflexion fällt von den Höchstwerten im NIR bis auf Werte unter 10 % ab. Der Abfall ist nicht kontinuierlich, sondern durch die vier starken Wasserabsorptionsbanden (0,97; 1,20; 1,40 und 1,94  $\mu\text{m}$ ) geprägt. Insgesamt ist der Wassergehalt ( $\text{H}_2\text{O}$  und O-H-Bindungen, vgl. Kap. 2.2) der entscheidende Faktor, der für die Zunahme der Absorption in diesem Wellenlängenbereich verantwortlich ist. Je höher der Wassergehalt, desto stärker ist die Absorption und umso ausgeprägter sind die Absorptionsbe-

reiche im SWIR. Das Austrocknen der Blätter führt aufgrund des geringeren Wasseranteils zu einer Verringerung der Absorption im SWIR, aber auch zu einem Abfall der Reflexion im NIR aufgrund der Veränderung der Zellstruktur (siehe hierzu Kap. 2.3.1.2).

Neben dem Pflanzenwassergehalt sind noch eine Reihe weiterer, organischer Bestandteile (Proteine, Lignin, Stärke, Zucker) für die Absorptionscharakteristika der elektromagnetischen Strahlung im SWIR verantwortlich (Abb. 11). Die Absorption der Strahlungsenergie wird hier durch Krümmungs- und Dehnungsbewegungen (Vibrationsprozesse) sowie Verformungen der in all diesen Substanzen vorkommenden Molekülbindungen (vorwiegend C-H, N-H, O-H) verursacht.



**Abb. 11: Spektrale Reflexion ausgewählter organischer Bestandteile von Pflanzen im SWIR (verändert nach GOETZ 1992)**

Die Bindungen kommen in der Regel nicht isoliert vor, sondern sind in ein komplexes Kristallgitter eingebettet. Diese komplexen Bindungsformen führen im NIR/SWIR zu Vibrationsabsorptionen zumeist niedriger Ordnung (Oberschwingungen, Kombinationen). Für Biomasse wurden in den 60er und 70er Jahren zahlreiche Untersuchungen zu diesen Vibrationsprozessen durchgeführt. Insgesamt konnten 42 in der Regel geringfügige Absorptionsmerkmale detektiert werden. Diese wurden u.a. von CURRAN (1989) und CARD et al. (1988) zusammengestellt und in Relation zu biochemischen Konzentrationen von Pflanzenteilen gesetzt (Tab. 4). Hierbei ist allerdings zu beachten, dass diese untergeordneten Absorptionsbanden in frischer Pflanzenmasse und bei natürlicher Beleuchtung oftmals von den fundamentalen O-H-Absorptionen des Wassers bzw. Wasserdampfs überdeckt werden, was eine Trennbarkeit biochemischer Bestandteile erschwert. Die Absorptionsmerkmale durch Schwingungsprozesse konnten bei Feldversuchen unter natürlichen Bedingungen bisher nur unzureichend nachgewiesen werden (YODER & PETTIGREW-CROSBY 1995, JOHNSON et al. 1994). Der Großteil der Untersuchungen zur Ableitung von Pflanzeninhaltsstoffen aus spektroradiometrischen Messungen beruht auf der Auswertung laborspektroskopischer

Messungen unter konstanten Messbedingungen (Parameterkonstanz) (z. B. WESSMAN et al. 1988, KOKALY & CLARK 1999, BOLSTER et al. 1996).

Die ausführliche Analyse der spektralen Sensitivität spektroradiometrischer Feld- und Laboraufnahmen für biochemische Inhaltsstoffe ist Gegenstand von Kap. 7.4 dieser Arbeit.

**Tab. 4: Absorptionsmerkmale biochemischer Pflanzenbestandteile im VNIR/SWIR-Bereich (nach CURRAN 1989)**

Wellenlänge [ $\mu\text{m}$ ]	Aktionsmechanismus	Pflanzenkomponente
0,43	Elektronenübergang	Chlorophyll a
0,46	Elektronenübergang	Chlorophyll b
0,64	Elektronenübergang	Chlorophyll b
0,66	Elektronenübergang	Chlorophyll a
0,91	C-H Dehnung, 3.Oberschwingung	Protein
0,93	C-H Dehnung, 3.Oberschwingung	Fettsäuren
0,97	O-H Krümmung, 1.Oberschwingung	Wasser, Stärke
0,99	O-H Dehnung, 2.Oberschwingung	Stärke
1,02	N-H Dehnung	Protein
1,04	C-H Dehnung, C-H Verformung	Fettsäuren
1,12	C-H Dehnung, 2.Oberschwingung	Lignin (Holzstoff)
1,20	O-H Krümmung, 1.Oberschwingung	Wasser, Zellulose, Stärke, Lignin
1,40	O-H Krümmung, 1.Oberschwingung	Wasser
1,42	C-H Dehnung, C-H Verformung	Lignin
	O-H Dehnung, 1.Oberschwingung	
1,45	C-H Dehnung	Stärke, Zucker, Lignin, Wasser
	C-H Verformung	
1,49	O-H Dehnung, 1.Oberschwingung	Zellulose, Zucker
1,51	O-H Dehnung, 1.Oberschwingung	Protein, Stickstoff
1,53	O-H Dehnung, 1.Oberschwingung	Stärke
1,54	O-H Dehnung, 1.Oberschwingung	Stärke, Zellulose
1,58	O-H Dehnung, 1.Oberschwingung	Stärke, Zucker
1,69	O-H Dehnung, 1.Oberschwingung	Lignin, Stärke, Protein, Stickstoff
	O-H Dehnung, 1.Oberschwingung/	
1,78	O-H Dehnung/ H-O-H Verformung	Zellulose, Zucker, Stärke
	O-H Dehnung/ C-O Dehnung,	
1,82	2.Oberschwingung	Zellulose
1,90	O-H Dehnung, C-O Dehnung	Stärke
1,94	O-H Dehnung, O-H Verformung	Wasser, Lignin, Protein, Stickstoff, Stärke, Zellulose
1,96	O-H Dehnung, O-H Krümmung	Zucker, Stärke
1,98	N-H Asymmetrie	Protein
2,00	O-H Verformung, C-O Verformung	Stärke
	N=H Krümmung, 2.Oberschwingung/	
2,06	N=H Krümmung/ N-H Dehnung	Protein, Stickstoff
2,08	O-H Dehnung/ O-H Verformung	Zucker, Stärke
	O=H Krümmung/ C-O Dehnung/	
2,10	C-O-C Dehnung, 3.Oberschwingung	Stärke, Zellulose
2,13	N-H Dehnung	Protein
	N-H Krümmung, 2.Oberschwingung/	
2,18	C-H Dehnung/ C-O Dehnung/	Protein, Stickstoff
	C=O Dehnung/ C-N Dehnung	
2,24	C-H Dehnung	Protein
2,25	O-H Dehnung, O-H Verformung	Stärke
	C-H Dehnung/ O-H Dehnung	
2,27	CH <sub>2</sub> Krümmung/ CH <sub>2</sub> Verformung	Zellulose, Zucker, Stärke
2,28	C-H Dehnung/ CH <sub>2</sub> Verformung	Stärke, Zellulose
	N-H Dehnung, C=O Dehnung	
2,30	C-H Dehnung, 2.Oberschwingung	Protein, Stickstoff
2,31	C-H Krümmung, 2.Oberschwingung	Fettsäuren
2,32	C-H Dehnung/ CH <sub>2</sub> Verformung	Stärke
	C-H Dehnung/ O-H Verformung/	
2,34	C-H Verformung/ O-H Dehnung	Zellulose
	CH <sub>2</sub> Krümmung, 2.Oberschwingung,	
2,35	C-H Verformung, 2.Oberschwingung	Zellulose, Protein, Stickstoff

### 2.3.1.2 Reflexionsprozesse

Im VIS kommt es, wie bereits in Kap. 2.3.1.1 erwähnt, zur Ausbildung eines relativen Reflexionsmaximums der solaren Einstrahlung (green peak). Dieses basiert jedoch maßgeblich auf der relativ hohen Pigmentabsorption (v.a. Chlorophyll) der umgebenden Wellenlängenbereiche.

Beim Übergang vom VIS zum NIR steigen die spektralen Reflexionswerte der Pflanzenorgane sprunghaft an, was zur Ausbildung eines charakteristischen Rot-Infrarot-Anstiegs in der Spektralsignatur führt. Die Parametrisierung dieses Anstiegs erfolgt u. a. über die Bestimmung des Hauptwendepunktes (**HWP**) der Signaturkurve in diesem Bereich. Der hieraus resultierende Spektralindex wird als *red edge index* (*REI*) bezeichnet (siehe hierzu Kap. 6.5.2), bzw. die Verschiebung dieses Hauptwendepunktes als *blue shift*. Die Position des HWP bzw. dessen Verlagerung ist sowohl ein Indiz für den Chlorophyllgehalt, als auch für den Stresszustand (Nährstoffmangel, Wassergehalt, etc.) also insgesamt für die Vitalität der Pflanze.

Die spektrale Reflexion im NIR weist für den Bereich von 0,7 bis 1,3  $\mu\text{m}$  ein breites Maximum auf. Blattpigmente sind für die Strahlungsenergie in diesen Wellenlängen nahezu durchlässig. Abgesehen von den beiden Wasserabsorptionsbanden bei 0,97 und 1,20  $\mu\text{m}$  wird die Reflexion hauptsächlich durch die Zell- und Gewebestruktur der Blattorgane beeinflusst. Ein kleinerer Teil der auftreffenden Strahlung wird direkt an der Blattoberfläche (Cutikula) reflektiert. Dieser Anteil variiert in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit der Blätter und Pflanzenteile. Eine Wachsauflage führt z. B. zu einer Erhöhung der direkten Reflexion, bei haarigen oder rauen Blättern wird eine Abnahme der NIR-Reflexion beobachtet (GATES 1970). Der größere Teil der Strahlung wird im Blattinneren durch die interzellularen und luftgefüllten Hohlräume gebrochen und reflektiert. Änderungen im Reflexionsverhalten sind vor allem auf Veränderungen der Turgeszenz und damit der Wasserversorgung zurückzuführen (HILDEBRANDT 1996). Durch die Wasseraufnahme der Zelle kommt es zur Dehnung der Zellwand, zur Zunahme des Volumens und zur Veränderung der Gewebestruktur des Blattes. Dies äußert sich in einem geringem Abfall der Reflexionswerte im NIR bei anhaltendem Trockenstress der Pflanze. Gleichzeitig verschwindet die Absorptionsbande bei 0,97  $\mu\text{m}$ . Neben der Wasserversorgung können aber auch andere Stressoren bzw. Schädigungen die Zellstruktur, Interzellularen oder Zellinhaltsstoffe verändern. Dies wurde z. B. für Pilzbefall, Nährstoffmangel und -überschuss sowie Schwermetallbelastungen festgestellt (siehe z. B. CLEVERS 1994, BLACKMER et al. 1996, LELONG et al. 1998, SCHELLBERG 1990).

Betrachtet man nicht nur die Reflexionseigenschaften einzelner Blätter, sondern die des Ausschnittes eines Pflanzenbestandes, dem sie entnommen wurden, dann sind neben dem Blattaufbau vor allem noch die morphologischen Faktoren des Bestandes zu berücksichtigen. Dies können im einzelnen sein:

- ⇒ Stellung und Größe der Blattorgane (Blattwinkelverteilung, Blattfläche)
- ⇒ Dichte des Bestandes (Schatten-, Bodenanteil)
- ⇒ vertikale Gliederung (Oberflächenrauigkeit)

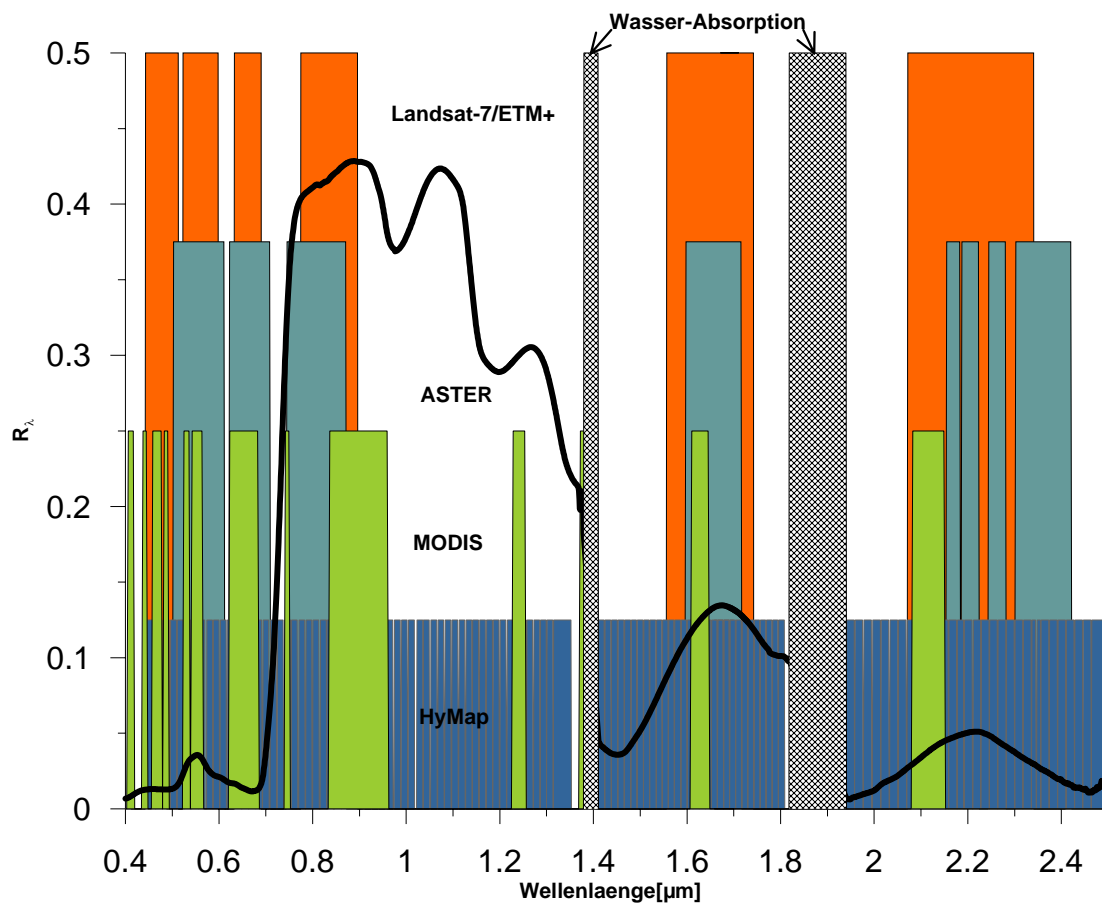
Die genannten Faktoren beeinflussen in Abhängigkeit vom Betrachtungsmaßstab (Skalenniveau, vgl. INFOBOX III) die Intensität und Variabilität der Reflexion. Sie sind – wie auch der Blattaufbau – nicht über den gesamten Betrachtungszeitraum konstant, sondern unterliegen in der Regel Veränderungen im Laufe der unterschiedlichen phänologischen Phasen.

Einen bedeutenden Einfluss auf den Reflexionsfaktor hat neben den natürlichen Objektparametern die Einstrahlungs- und Beobachtungsgeometrie der Strahlungsquelle bzw. des



Detektors zur Strahlungsmessung (siehe Kap. 6.4). Dies geht auch bereits aus den Gleichungen 9 und 10 hervor (vgl. Kap. 2.1.2).

Die Kombination der wesentlichen Prozesse, die zur Absorption und Reflexion elektromagnetischer Strahlung beitragen sowie die Integration der Reflexionswerte über den Wellenlängenbereich der solaren Strahlung von 0,4  $\mu\text{m}$  bis 2,5  $\mu\text{m}$  führen zur Ausbildung einer spektralen Signatur von Vegetation, wie sie in Abb. 12 exemplarisch für einen Winterweizenbestand abgebildet ist. Die Graphik veranschaulicht zusätzlich, welche Bereiche des Spektrums von operationellen abbildenden Sensoren aufgelöst werden können. Die grundlegenden und für die weiteren Ausführungen relevanten Aussagen des Kap. 2.3.1 sind abschließend noch einmal in der INFOBOX II zusammengefasst.



**Abb. 12:** Typische spektrale Reflexionskurve für Winterweizen und Spektralkanäle (Bandbreiten) ausgewählter Erderkundungssatelliten

**INFOBOX II****solare Reflexion von Vegetation – Basisaussagen und Überlegungen**

- Vegetation besteht aus einer begrenzten Anzahl spektral aktiver Komponenten (Bestandteile)
- die relativen Häufigkeiten dieser Bestandteile (inkl. Wasser) sind Indikatoren für den Zustand der Pflanzen und ihrer Umwelt und können spektroradiometrisch erfasst werden
- die spektrale Signatur der solaren Reflexion von Vegetation ist eine Funktion der Wellenlänge  $\lambda$ , und ist von folgenden Faktoren abhängig:
  - Konzentration der Vegetationsbestandteile
  - Geometrie, Morphologie der Pflanze (Blattaufbau, Zellstruktur)
  - Geometrie, Morphologie des Bestands (vertikale Gliederung, Blattwinkelverteilung, Bestandsdichte, Bedeckungsgrad, Artenzusammensetzung)
  - Geometrie des Aufnahmesystems und der Strahlungsquelle
  - Betrachtungsmaßstab (Skalenabhängigkeit)
    - Blatt / Nadel
    - Zweig
    - Einzelpflanze
    - Pflanzenbestand
- die Spektralsignatur von Vegetation ist geprägt durch Absorption im VIS und SWIR-Bereich sowie Reflexion im NIR-Bereich
- das in der Pflanze gebundene Wasser dominiert den Signaturverlauf im NIR/SWIR-Bereich und ist die Hauptursache für die signifikanten Absorptionsbanden

## 2.3.2 Sonstige natürliche Faktoren

### 2.3.2.1 Interaktion optischer Strahlung mit Böden

Bei der Beurteilung der spektralen Signatur von Vegetationsbeständen ist immer auch der Einfluss des Bodens auf das Messsignal zu berücksichtigen, soweit keine vollständige Bodenbedeckung durch den Vegetationsbestand vorliegt.

Die spektrale Reflexion von Böden ist abhängig von einer Reihe von Bodeneigenschaften. Für die Fernerkundung sind im Allgemeinen zwei Gruppen von Eigenschaften von Interesse. Die erste Gruppe ist für den Grad der Reflexion einfallender solarer Strahlung von Bedeutung, und die zweite Gruppe befasst sich mit der Emission langwelliger thermaler Strahlung (TIR) bzw. der Oberflächentemperatur von Böden (BEN-DOR et. al. 1999, MYERS 1970). Im Rahmen der Untersuchungen sind aufgrund des betrachteten Wellenlängenbereichs nur diejenigen Eigenschaften von Interesse, welche die solare Reflexion und Absorption beeinflussen. Hierbei ist zu beachten, dass die optische Strahlung immer nur die Oberfläche eines Bodenkörpers beschreiben kann.

Im Folgenden werden kurz die Einflüsse und Auswirkungen der Bodeneigenschaften auf die Reflexions- und Absorptionsprozesse an der Bodenoberfläche aufgezeigt. Diese werden bei der Interpretation und Analyse der Vegetationsspektren ggfs. als Korrekturparameter berücksichtigt (Kap. 6.4).

Die Reflexion und Absorption elektromagnetischer Strahlung im Bereich der solaren Strahlung wird von einer Reihe von Faktoren beeinflusst. Dies sind im Allgemeinen:

- ⇒ Oberflächenstruktur des Bodens (Färbung, Textur, Rauigkeit)
- ⇒ Bodenfeuchte
- ⇒ Korngrößenzusammensetzung
- ⇒ mineralische und chemische Zusammensetzung des Bodens
- ⇒ Gehalt an organischer Substanz.

Zusätzlich zu den Objekteigenschaften hängt der Signaturverlauf von der Geometrie des Aufnahmesystems und der Strahlungsquelle ab (vgl. Kap. 2.1.2).

Den stärksten Einfluss auf das Messsignal hat die **Bodenfeuchte**, d.h. das Vorkommen von gebundenem oder ungebundenem Wasser in den Hohlräumen der obersten Schicht des Bodenkörpers. Das flüssige Wasser in den oberen Bodenschichten führt zu ausgeprägten Absorptionsmerkmalen in der Spektralsignatur von Böden. Die Prozesse, die zur Absorption elektromagnetischer Strahlung im NIR/SWIR durch das Vorhandensein von Wasser führen (Oberschwingungen, Kombinationsschwingungen der OH-Bindungen) wurden bereits in Kap. 2.2 ausführlich erläutert. Ebenso wie bei den Vegetationsspektren kommt es hierdurch zur Ausbildung zweier markanter Absorptionsbereiche bei 1,4 und 1,9  $\mu\text{m}$ , die jedoch in der Natur durch atmosphärische Einflüsse überlagert werden (siehe Kap. 2.3.2.2).

Von den **chemischen Bestandteilen** hat Eisen bzw. Eisenoxid den größten Einfluss auf Absorption und Reflexion elektromagnetischer Strahlung und ist in fast allen Böden enthalten. Der Gehalt an den Eisenoxiden Hämatit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) und Goethit ( $\text{FeOOH}$ ) führt zu charakteristischen Färbungen der Bodenoberflächen, die auf unterschiedlich starke Absorptionen der einzelnen Fraktionen des sichtbaren Lichts zurückzuführen sind. Generell ist in fast allen Bodenspektren ein starker Abfall zum blauen und zum UV-Bereich festzustellen. Sämtliche Absorptionsmerkmale, welche auf das Vorhandensein von Eisenoxiden zurückzuführen sind, haben Ihre Ursache in Elektronenverschiebungen im Kristallgitter (crystal field effects) zwischen den Eisen- und Sauerstoffatomen (GOETZ 1992). Zusätzlich treten in den Spektren Absorptionsbanden im Bereich von 0,7, 0,87 und 1,0  $\mu\text{m}$

auf, die durch Elektronenübergänge (Ladungstransfer) in 2- oder 3-wertigen Eisenionen zustande kommen. Neben Eisen weisen auch die übrigen Übergangselemente (Cr, Ni, Ti, Co, Mn, Wo, Sc) Elektronenübergänge bei Aufnahme von Photonenenergie auf, die durch Strahlungsabsorption im VIS gekennzeichnet sind und je nach ihrem Vorkommen bzw. ihrer Konzentration zur Ausbildung der charakteristischen Färbung von Böden führen können (GOETZ 1992).

Die meisten **Bodenminerale** weisen primäre Absorptionsmerkmale im MIR auf, die durch Vibrationsprozesse verursacht werden. Dennoch besitzen viele dieser Minerale aufgrund der in ihnen enthaltenen Hydroxyl-Gruppen (OH) Absorptionsbanden im NIR. Die in allen Hydroxyl-Gruppen vorkommende Absorption bei 1,4  $\mu\text{m}$  wird bei Vorhandensein von Wasser im Boden stets maskiert durch die H<sub>2</sub>O-Absorption in diesem Bereich. Daneben treten aber immer eindeutige Absorptionsbanden im SWIR auf. Die Absorptionsbereiche ausgewählter Hydroxyl-Gruppen sind in Tab. 5 zusammengefasst. Eine ausführliche Übersicht der Absorptionsbereiche von Mineralen geben z. B. HUNT 1977 und CLARK et al. 1990.

**Tab. 5:** Spektrale Absorptionsmerkmale ausgewählter Molekülbindungen und Ionen im NIR/SWIR-Bereich (aus GOETZ 1992, HUNT 1980, BAUMGARDNER et al. 1985 u.a.)

Ion / Bindung	Absorptionsbereich im NIR/SWIR
Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>	0,7 $\mu\text{m}$ , 0,87 $\mu\text{m}$ , 1,0 $\mu\text{m}$
OH <sup>-</sup>	1,4 $\mu\text{m}$
H <sub>2</sub> O	1,4 $\mu\text{m}$ , 1,94 $\mu\text{m}$
Al-OH	2,15 – 2,22 $\mu\text{m}$
Mg-OH	2,30 – 2,39 $\mu\text{m}$
Fe-OH	2,24 – 2,27 $\mu\text{m}$
Si-OH	2,25 $\mu\text{m}$
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	2,28 – 2,34 $\mu\text{m}$
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	2,00 – 2,13 $\mu\text{m}$

Mit zunehmendem Gehalt an **organischer Substanz** kommt es über den gesamten Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts zu einer Abschwächung der Reflexionswerte des Bodens. Dies kann bereits ab einem Gehalt von ca. 2,0 % organischer Substanz zu einer Maskierung des Großteils der übrigen, durch Mineral- und Eisengehalt verursachten Absorptionsmerkmale führen (BAUMGARDNER 1985). Insgesamt können keine eng begrenzten Absorptionsmerkmale nachgewiesen werden, bestenfalls ist eine qualitative Ableitung von Gehaltsklassen organischer Substanz auf Basis der VIS-Reflexion möglich (siehe hierzu CHEN et al. 2000). Das Resultat der starken VIS-Absorption ist ein eher konkaver Verlauf des Reflexionsanstiegs vom VIS zum NIR im Gegensatz zu der eher konvexen Form der Signaturkurve in diesem Bereich (vgl. Abb. 13).

Die **Korngrößenverteilung** wirkt sich im Allgemeinen, und stark vereinfacht formuliert, umgekehrt proportional auf die Reflexion aus, d.h., je kleiner die Partikelgröße einer Bodenprobe ist, umso höher ist der spektrale Reflexionsgrad. Insgesamt beeinflusst die durchschnittliche Korngröße die spektrale Reflexion über den gesamten Wellenlängenbereich der solaren Strahlung relativ gleichmäßig stark, was im Allgemeinen zu einer linearen Verschiebung der Signaturkurve in Richtung der Ordinatenachse führt. Die Form der Signaturkurve bleibt hiervon unberührt (BAUMGARDNER 1985).

Die Auswirkung der verschiedenen Bodenparameter auf die spektrale Reflexion solarer Strahlung ist in Abb. 13 anhand ausgewählter Bodenarten dargestellt.

Die bisher beschriebenen Zusammenhänge gehen von gleichmäßig gekörnten und verteilten Bodenpartikeln aus. Böden stellen jedoch immer ein hochkomplexes System / Gefüge ihrer Bestandteile dar. Bei der Ableitung qualitativer Eigenschaften und relativer Konzentrationen

von Bodenparametern muss bei nicht-homogenen Proben (in der Regel bei Feldaufnahmen) zusätzlich die Oberflächenstruktur des Bodens berücksichtigt werden (ESCADAFAL 1994). Anthropogene (Bodenbearbeitung) oder natürliche Prozesse (Niederschlag) können zu Veränderungen der Bodenrauigkeit, z. B. zu Verdichtung, Verschlammung, Verkrustung führen. Eine höhere Bodenrauigkeit erhöht die Anteile der beschatteten Bodenpartikel, was wiederum eine Abnahme des Reflexionsgrads bedeutet. Insgesamt ist aber auch bei diesen Prozessen wiederum der gesamte Spektralbereich betroffen, die Form der Signaturkurve bleibt erhalten.

Die dargestellten Abhängigkeiten zwischen spektraler Reflexion und den biochemischen und biophysikalischen Eigenschaften des Bodens unterstreichen die Notwendigkeit der Betrachtung von Bodenmerkmalen bei der Analyse spektroradiometrischer Feld-, Luft- oder Satellitenaufnahmen. Geeignete Verfahren zur Korrektur des Bodeneinflusses auf Spektralmessungen von Vegetationsbeständen werden in Kap. 6.3.1 diskutiert.

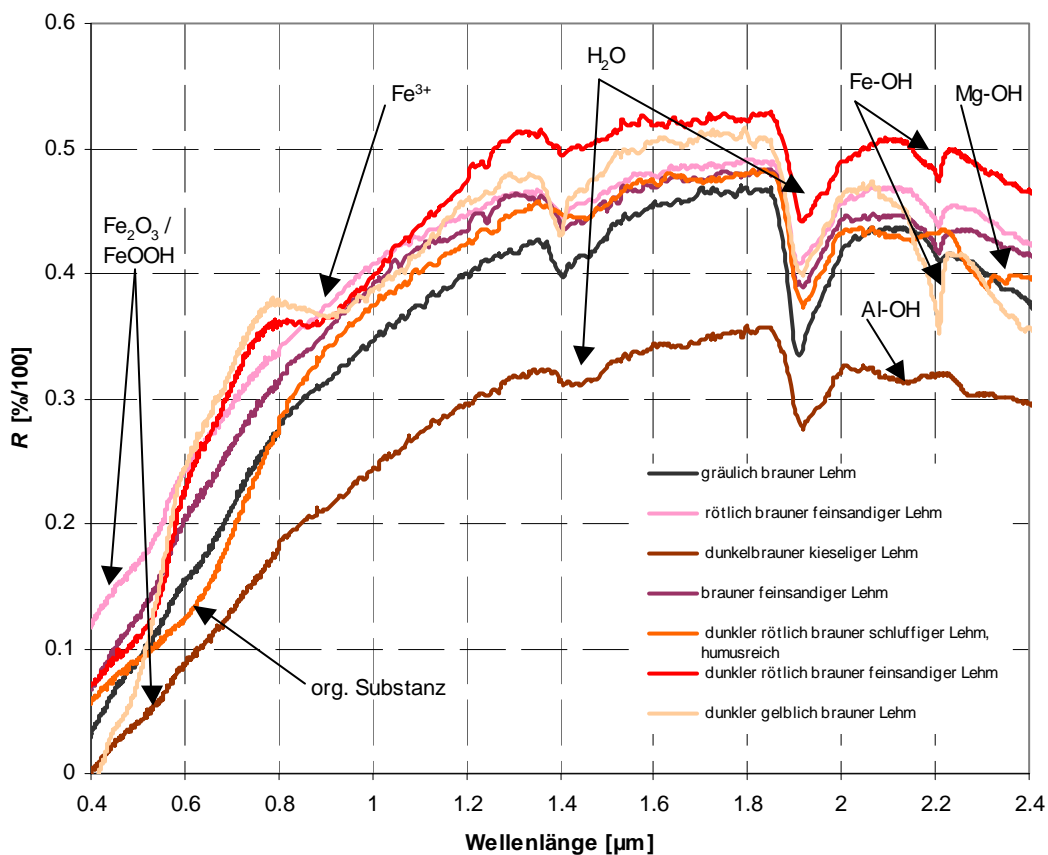


Abb. 13: Spektralsignaturen unterschiedlicher Bodenarten und deren Hauptmerkmale<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Die Spektren wurden reproduziert aus der "ASTER Spectral Library" (JPL Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California). Copyright © 1999, California Institute of Technology.

**INFOBOX III****Solare Reflexion von Böden - Basisaussagen und Überlegungen**

- Boden besteht aus einer begrenzten Anzahl spektral aktiver Komponenten (Bestandteile)
- Die Zusammensetzung dieser Komponenten ist entscheidend für die Ausprägung einer Bodenart und damit für die Güte als Nährmedium für die Vegetation
- Die solare Strahlung wird nur von der obersten Bodenschicht beeinflusst
- Die Reflexion solarer Strahlung ist eine Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  und wird von folgenden Eigenschaften beeinflusst:
  - Oberflächenstruktur des Bodens (Färbung, Textur, Rauigkeit)
  - Bodenfeuchte
  - Korngrößenzusammensetzung
  - mineralische und chemische Zusammensetzung des Bodens
  - Gehalt an organischer Substanz
  - Geometrie des Aufnahmesystems und der Strahlungsquelle
- Entscheidend für die spektrale Reflexion im NIR/SWIR-Bereich ist die mineralische und chemische Zusammensetzung. Elektronen und Moleküle in der Bodenmatrix und in den Hohlräumen werden von Photonenenergie angeregt:
  - Elektronenübergänge (VIS/NIR)
  - Schwingungsabsorption (NIR/SWIR)

**2.3.2.2 Interaktion solarer Strahlung in der Atmosphäre**

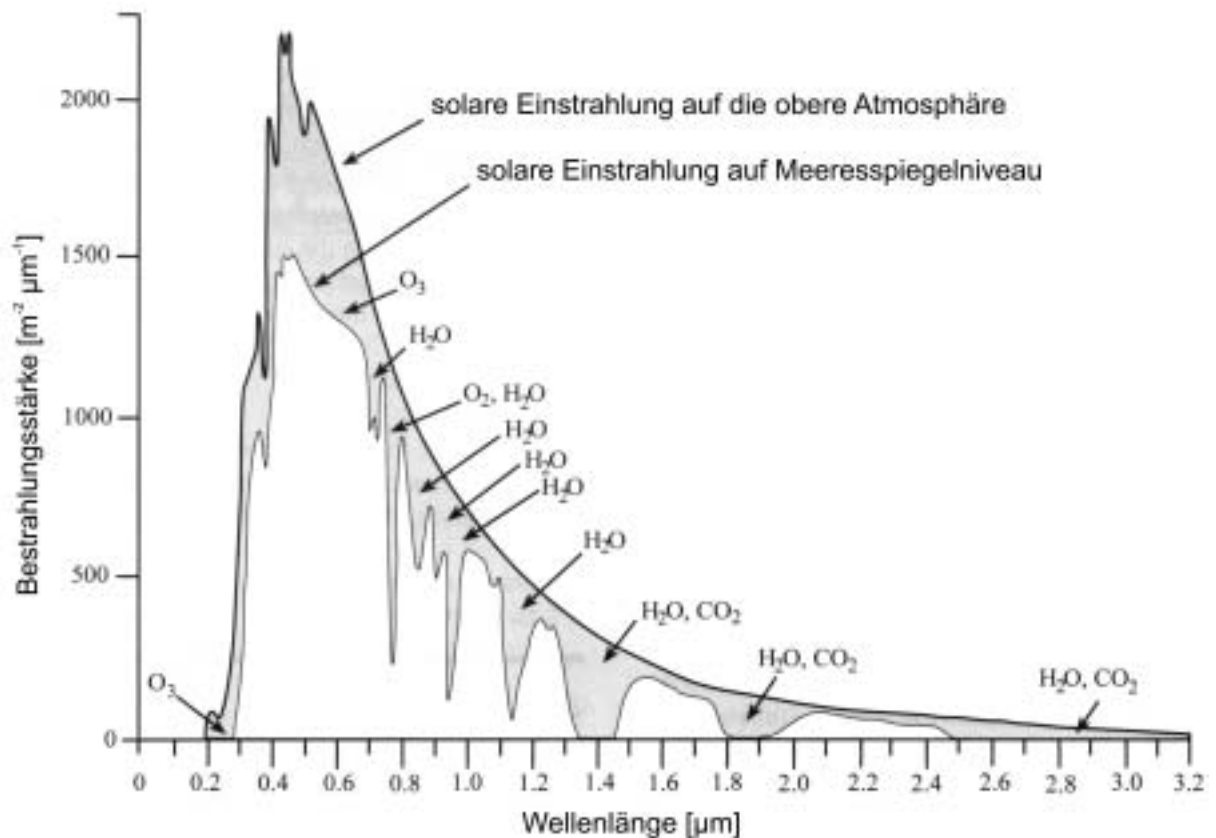
Die Ursachen und Auswirkungen der Beeinflussung elektromagnetischer solarer Strahlung in der Atmosphäre sind in zahlreichen Lehrbüchern ausführlich dokumentiert und sollen an dieser Stelle nur kurz skizziert werden. Die Erläuterungen stützen sich auf die Ausführungen von KRAUS & SCHNEIDER (1988), SCHANDA (1986) sowie SCHOWENGERDT (1997).

Elektromagnetische Strahlung, die in die Atmosphäre eindringt, wird beim Übergang vom Vakuum in die Atmosphäre gebrochen und beim Durchgang durch diese gestreut und teilweise absorbiert.

Absorption elektromagnetischer Strahlung findet an den Bestandteilen der Atmosphäre in unterschiedlichem Maße und in Abhängigkeit von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung statt. Die permanenten Gase Stickstoff und Sauerstoff (sowie Edelgase) haben hierbei trotz ihrer großen Anteile an der Zusammensetzung der Atmosphäre so gut wie keinen Einfluss auf die Absorptionsprozesse. Die Ursache hierfür liegt in der Symmetrie ihrer Molekülstruktur (vgl. Kap 2.2). Eine Ausnahme bildet eine signifikante Rotations-Absorptionsbande im NIR (bei 760 nm, 5 nm Bandbreite), die auf den permanenten magnetischen Dipolmoment des Sauerstoffmoleküls zurückzuführen ist, der wiederum durch zwei ungepaarte Elektronen in den Orbitalebene der O-Atome bedingt ist (SCHANDA 1986).

Der überwiegende Teil der Absorptionsprozesse optischer Strahlung und insbesondere solarer Einstrahlung innerhalb der Atmosphäre ist auf das Vorhandensein von Wasserdampf, Kohlendioxid und Ozon zurückzuführen. Die Absorptionsprozesse von Wasserdampf wurden bereits ausführlich in Kap. 2.2 beschrieben und führen zur Ausbildung der breiten Absorptionsbanden bei 1,4 und 1,9  $\mu\text{m}$ . Die Kohlendioxid-Banden beruhen auf Oberschwingungen und Kombinationsschwingungen der 2. und 3. Grundschiwingung des  $\text{CO}_2$ -Moleküls, werden aber im solaren Bereich von den  $\text{H}_2\text{O}$ -Banden maskiert (Abb. 14).

Ozon weist, abgesehen von der starken UV-Absorption, eine relativ schwache Bande bei ca. 600 nm auf, die markanteste Absorptionsbande liegt im TIR bei ca. 9,5  $\mu\text{m}$ .



**Abb. 14:** Das solare Spektrum mit den atmosphärischen Absorptionsbanden (verändert nach JENSEN 2000)

Die Streuung wird quantitativ über die Volumenstreufunction beschrieben, die den spektralen Streukoeffizienten  $\beta_\theta$  als ein Maß für die aus der ursprünglichen Richtung in eine bestimmte Richtung  $\theta$  gestreuten Strahlung angibt. Die Streuung findet v.a. an den Molekülen der permanenten Gase und an Aerosolen statt. Anhand des Verhältnisses von Teilchengröße und Wellenlänge werden die Streuungsprozesse in selektive (Rayleigh-, Mie-Streuung) und nicht-selektive Streuung unterschieden. Rayleigh-Streuung ist im Bereich der solaren Strahlung in der Regel auf Streuungsprozesse an Molekülen beschränkt, Mie-Streuung und nicht-selektive Streuung, bei der die Wellenlänge der einfallenden Strahlung gleich dem Partikeldurchmesser bzw. um ein Vielfaches größer ist, findet vor allem an Aerosolen in der Atmosphäre (z. B. Wasserdampf) statt.

Bei den Streuungsvorgängen tritt kein Energieverlust und keine Wellenlängenveränderung auf. Dennoch kommt es in Bezug zu der auf die Erdoberfläche treffenden Strahlung zu einer Abschwächung der direkten Strahlung, weshalb die Streuungsprozesse mit den Absorptionsprozessen unter dem Sammelbegriff Extinktion zusammengefasst werden (KRAUS & SCHNEIDER 1988).

Für spektroskopische Feld-, Luft- oder Satellitenaufnahmen ergibt sich aus diesen Prozessen ein komplexes Gefüge von Streumechanismen (direkte Einstrahlung, diffuse Himmelstrahlung, reflektierte Strahlung), die bei der Bewertung der am Sensor aufgezeichneten Messwerte berücksichtigt werden müssen. In welchem Umfang diese Einflüsse im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen in Betracht gezogen werden müssen, wird in Kap. 6.3.1 diskutiert.





## 3 Untersuchungsgebiete und Testflächen

### 3.1 Beschreibung der Untersuchungsgebiete

Die Datenerhebungen zur Ermittlung des spektralen Informationsgehaltes von Wintergetreidebeständen wurden in zwei Untersuchungsgebieten (UG) in Norddeutschland durchgeführt. In beiden Regionen stellt das Getreide die dominierende Fruchtart im intensiven Ackerbau dar.

Die Kriterien für die Auswahl der Untersuchungsgebiete waren neben den pragmatischen Gesichtspunkten (Neetzow: Projektbeteiligung; Imbshausen: günstige Lage) v. a. die Betriebsgrößenstruktur und die naturräumliche Lage. Eine teilschlaggenaue Bewirtschaftung kann nur für größere, zusammenhängende Flächen effizient durchgeführt werden, da die Belastung durch die Investitionskosten (pro ha) für die Einführung der *precision farming* Technologie mit steigender Betriebsgröße drastisch abnimmt.

In Deutschland erreichen vor allem Betriebe in Nord- und NE-Deutschland eine solche Betriebsgröße. Aber auch kleinere Betriebe müssen nicht auf den Einsatz von *precision farming* Technologie verzichten. Möglich wären hier z. B. Betriebsgemeinschaften, Gewannebewirtschaftung oder auch der Einsatz über Maschinenringe bzw. Lohnunternehmer. In beiden Untersuchungsgebieten wurden zu pflanzenbaulich relevanten Zeitpunkten auf ausgewählten Testflächen pflanzenbauliche und bodenkundliche Bonituren durchgeführt und zusätzliche Standortdaten (Relief, Klima) akquiriert (vgl. Kap. 5.1.4). Sämtliche Proben wurden mit Hilfe eines GPS in einem räumlichen Bezugssystem verortet und in ein GIS übertragen.

Aus beiden Gebieten liegen Spektralmessungen der Getreidebestände vor, welche jeweils begleitend zu den Felderhebungen durchgeführt wurden (ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro, siehe Kap. 4.1). Für das Untersuchungsgebiet "Neetzow" liegen weiterhin die Daten zweier Befliegungen mit dem Hyperspektralscanner HyMap<sup>®</sup> vor. Für das Testgebiet "Imbshausen" (Göttingen) wurde eine eigene Infrarot- und Farbbildbefliegung mit einer Mittelformatkamera durchgeführt.

#### 3.1.1 Das Untersuchungsgebiet "Imbshausen" (Niedersachsen)

Das Testgebiet "Imbshausen" befindet sich innerhalb der Kalefelder Lößsenke im westlichen Harzvorland und gehört zum Niedersächsischen Bergland. Es liegt etwa 6 km nördlich von Northeim innerhalb des Blattes TK 4226 (Northeim-Ost) der topographischen Karte 1:25.000. Die Oberfläche des Geländes ist vorwiegend eben bis sehr schwach geneigt (bis ca. 5 % Gefälle) und steigt mit schwacher Neigung (5 bis 9 % Gefälle) nach Nord-Westen (Windmühlenberg und Aßberg) und nach Osten zum Imbshäuser Wald an. Die Entwässerung erfolgt durch Gräben und Bäche über den Uhbach zur Rhume im Süden.

Das Jahresmittel der Lufttemperatur liegt bei ca. 8,5 °C. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge beträgt 865 mm (Station Moringen-Lutterbeck, Mittel 1990-1999, DEUTSCHER WETTERDIENST 2001).

In der Region herrscht ackerbauliche Nutzung vor. In Rinnen- und Auenbereichen sowie an steileren Hängen überwiegen Grünlandflächen. An den Oberhängen im Osten und Nordosten des Bearbeitungsgebietes befinden sich Waldflächen mit der typischen kalkliebenden Perlgras-Buchenwald-Pflanzengesellschaft (*Melico-Fagetum*) (HABELBAUER 1989).

### Geologie

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Bereich der durch Bruchtektonik geprägten Schichtstufenlandschaften Südniedersachsens im nördlichen Teil des NNE-SSW streichenden Leinetalgrabens.

Das Ausgangsmaterial in den höheren Lagen der umgebenden Anhöhen (Windmühlenberg, Aßberg) bilden Kalk- und Mergelgesteine des Muschelkalks (Abb. 15). Neben den Gesteinen des Muschelkalks stehen nördlich des Windmühlenberges und südlich der Ortschaft Imbshausen auch Ton- und Mergelgesteine des Keupers an. Die Ausgangsgesteine sind häufig von Deckschichten überlagert, die im unteren Teil in der Regel aus dem anstehenden Festgestein hervorgegangen sind. Der obere Teil enthält dagegen Beimengungen von Löß oder wird von einer geringmächtigen Lößdecke gebildet. Die Mächtigkeit der Deckschichten nimmt zu den Unterhängen hin zu. In den Unterhangbereichen und in den ebenen und sehr schwach geneigten Lagen des Lößbeckens gehen die Lößbeimengungen in eine reine Lößdecke über, die zwei Meter und mehr erreicht.

Der Löß überlagert in den Unterhangbereichen und im Becken alluviale Fließerden, welche teilweise die Lößdecke durchragen und oberflächlich anstehen (z. B. in der Flur "In der Heide", siehe DKG5\_Bo 4226/11). In Hangmulden und an den Unterhängen ist der Löß von teilweise mehr als zwei Meter mächtigen Kolluvien (meist von Lößböden) bedeckt. (vgl. GEOLOGISCH-BODENKUNDLICHER ÜBERBLICK DGK5\_Bo 4226/6/7/11/12)

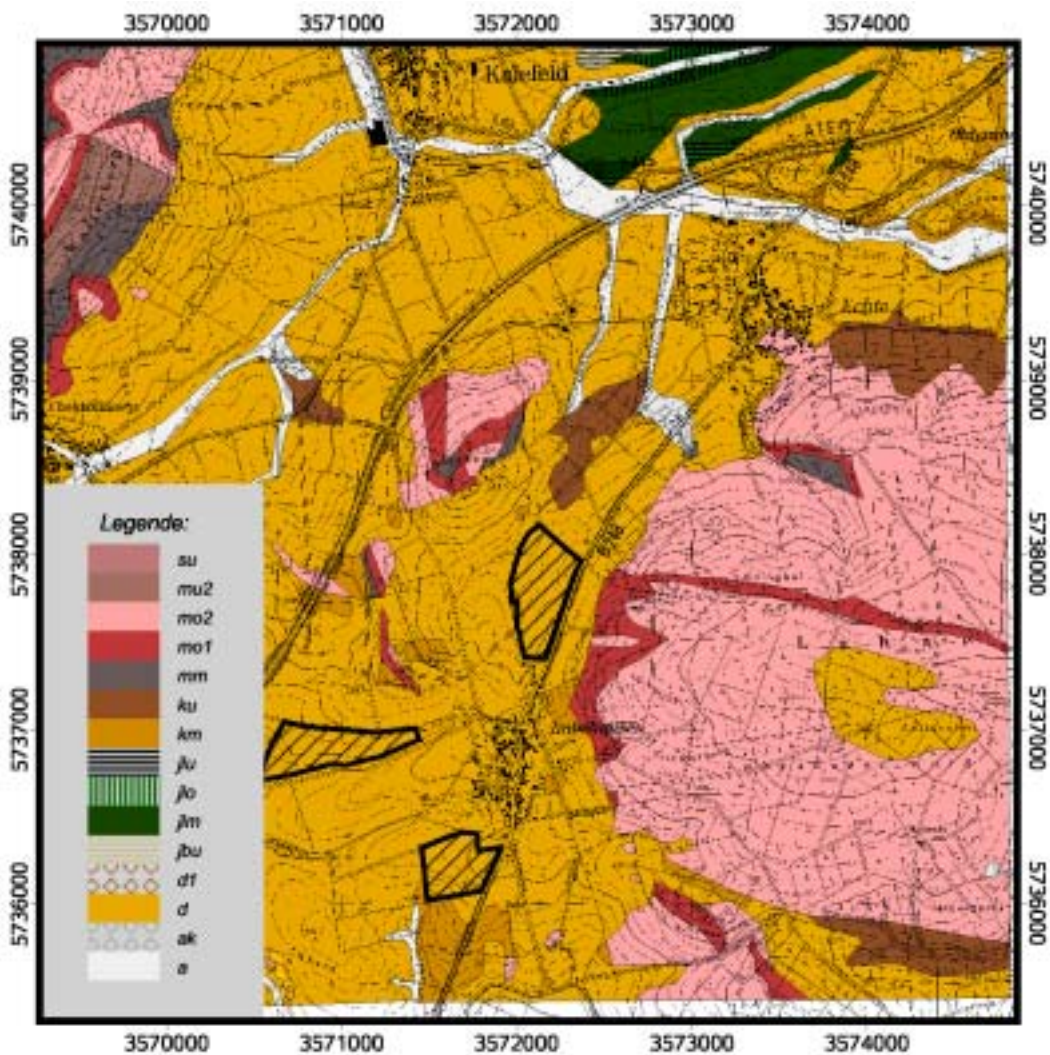


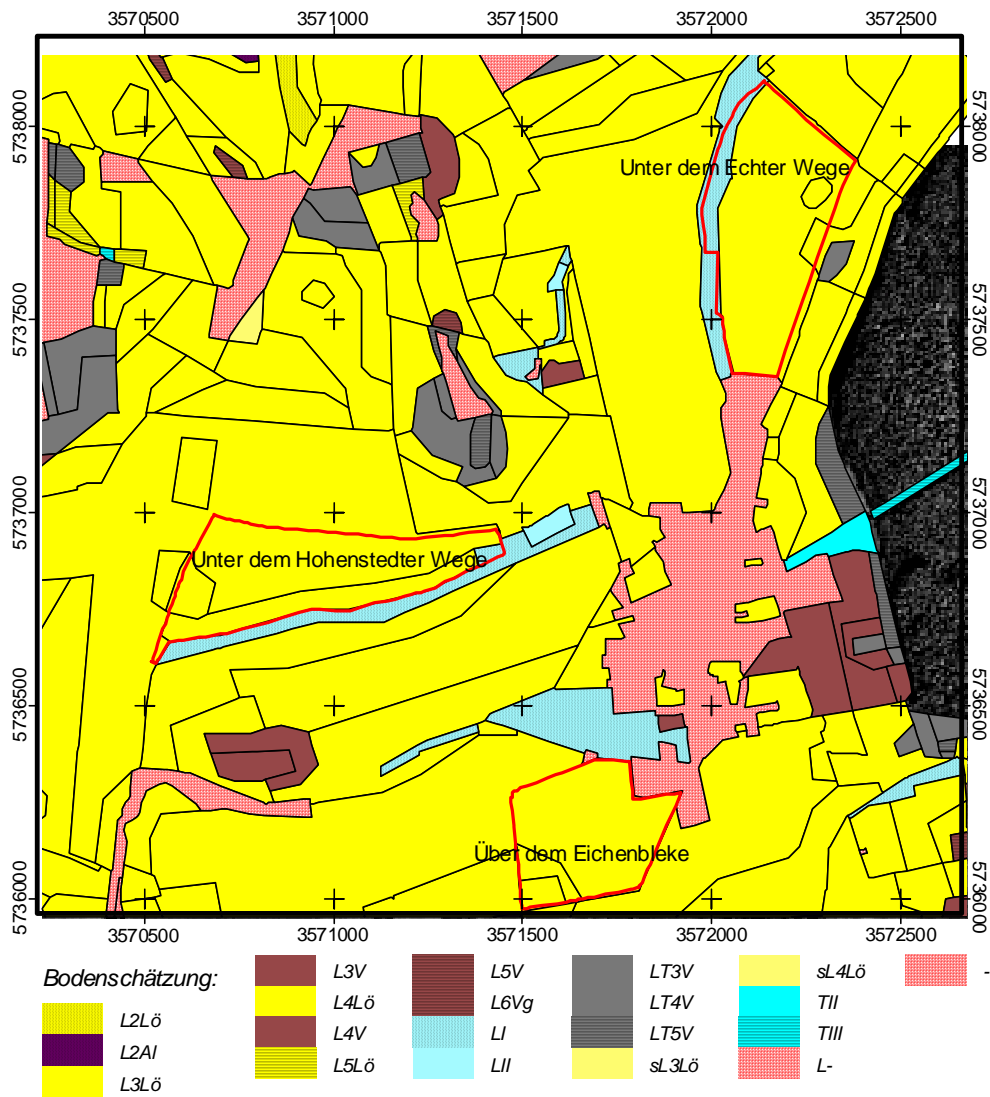
Abb. 15: Geologie im Untersuchungsgebiet Imbshausen (Testschläge sind schraffiert markiert)

### **Böden**

Aus den Kalkgesteinen des Muschelkalkes und den kalkhaltigen Fließerden, die z. T. von einer geringmächtigen Lösschicht bedeckt sind, haben sich Rendzinen und Rendzina-Braunerden entwickelt. Diese treten vor allem auf den exponierten Anhöhen (Aßberg, Windmühlenberg) auf. Aus den Fließerden ohne oder mit geringer Lößbedeckung sind Braunerden hervor gegangen (z. B. „In der Heide“, nördlich des Windmühlenbergs). Die am weitesten verbreitete Bodeneinheit stellen die Parabraunerden und Pseudogley-Parabraunerden aus mächtigen, entkalkten Lössen dar. Diese sind in den oberen und mittleren Hanglagen bei längerer intensiver ackerbaulicher Nutzung bereits bei schwachem Gefälle z. T. stark erodiert. Das erodierte Bodenmaterial hat sich im Akkumulationsbereich der Hangmulden und Unterhangbereiche über dem autochthonen Bodenmaterial abgelagert. In den Tälern erreicht das verschwemmte Bodenmaterial z. T. Mächtigkeiten von mehr als zwei Metern. Aus diesem haben sich bei guter Durchlüftung und Mächtigkeit > 4 dm Kolluvien, Pseudogley-Kolluvien oder Gley-Kolluvien gebildet. Dort, wo die Lößauflagen dichte Fließerden bedecken, kommt es zur Ausbildung von Pseudogleyen und Parabraunerde-Pseudogleyen, wie z. B. in Mittelhanglagen des Aßberges und Windmühlenberges. In den Tälern haben sich bei hohen Grundwasserständen aus umgelagertem Bodenmaterial Gleye und Gley-Kolluvien entwickelt. (vgl. GEOLOGISCH-BODENKUNDLICHER ÜBERBLICK DGK5\_Bo 4226/6/7/11/12)

Auf den drei Winterweizenschlägen des Testgebietes Imbshausen ("Über dem Eichenbleke", "Unter dem Hohenstedter Wege", "Unter dem Echter Wege") herrschen Parabraunerden aus einer relativ einheitlichen, mächtigen, entkalkten Lößdecke vor. Bei schwacher Staunässe hat sich in der SW Ecke des Schlags "Über dem Eichenbleke" ein mittlerer Pseudogley ausgebildet.

Die für die spektroradiometrischen Messungen bearbeiteten Testflächen befinden sich in privater Bewirtschaftung in direkter Nachbarschaft zur Ortschaft Imbshausen (vgl. Abb. 16). Die untersuchten Weizenschläge innerhalb des Untersuchungsgebiets Imbshausen weisen eine überwiegend homogene Bodenartenstruktur auf. Es dominieren Lehmböden mit einer mehr oder minder mächtigen Lößdecke (Bodentyp: Parabraunerde / Pseudogley-Parabraunerde).



**Abb. 16: Lage der Testflächen und Bodenartenkartierung im Untersuchungsgebiet Imbshausen<sup>9</sup>**

<sup>9</sup>Die digitale Bodenartenkartierung wurde in der 1. Interpretationsstufe vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover zur Verfügung gestellt. © NLfB, Hannover

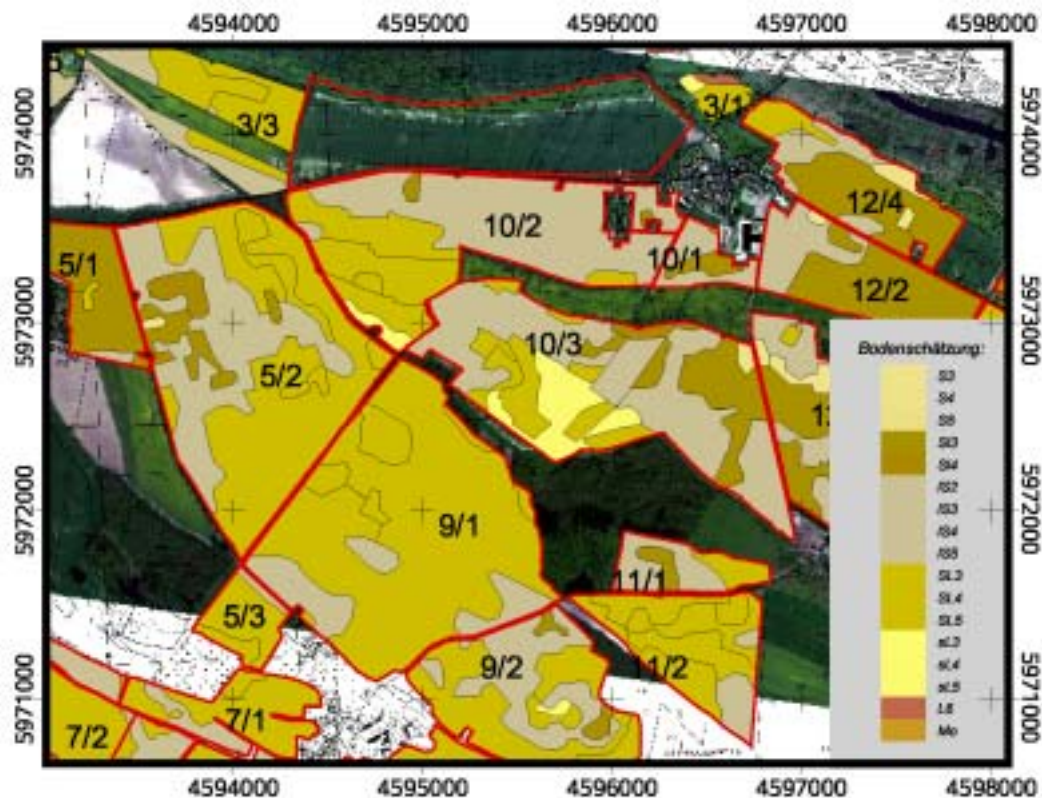


### 3.1.2 Das Untersuchungsgebiet "Neetzow" (Mecklenburg-Vorpommern)

Die Testflächen des Untersuchungsgebiets "Neetzow" in Mecklenburg-Vorpommern umfassen mehrere Schläge der Neetzower Agrarhof Peenetal GmbH, ca. 20 km westlich von Anklam.

Das Untersuchungsgebiet liegt innerhalb eines ca. 5 km breiten Streifens in den seenarmen flachen Grundmoränenplatten Vorpommerns, entlang der Peeneniederung zwischen Jarmen und Anklam. Es wird begrenzt durch die Lage des Flugstreifens des Hyperspektralscanners HyMap® und befindet sich in einem Kulturlandschaftsraum, der geprägt ist durch seine großräumige Agrarstruktur. Die landwirtschaftlichen Betriebe sind nach dem betrieblichen Strukturwandel der neunziger Jahre überwiegend in der Hand von "juristischen Personen" (60% der Fläche) und weisen eine durchschnittliche Größe von 1300 ha auf (WEIß [Hrsg.] 1996).

In der Peeneniederung haben sich auf anlehmigen bis stark lehmigen, äolischen, weichselzeitlichen Sanden Braunerden, und Parabraunerden ausgebildet, die durch die intensiv landwirtschaftliche Nutzung (Beackerung, Tiefumbruch) starke anthropogene Überprägungen aufweisen. In den Senkenbereichen kommt es vor allem in Flussbettnähe zu Vergleyungsercheinungen, bei starker Tonanreicherung im Unterboden zu Pseudovergleyung.



### 3.2 Auswahl und Beschreibung der Testflächen

Die Schläge der Untersuchungsgebiete weisen, bedingt durch die historische und gegenwärtige Entwicklung der Agrarraumstrukturen, sehr unterschiedliche Größen auf. Informationen zur Schlaggröße und Schlagbezeichnung können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

In keinem der Betriebe, welche die Testschläge bewirtschaften, wurden bisher automatisierte teilschlagspezifische Bearbeitungsmaßnahmen durchgeführt.

**Tab. 6: Übersicht über die untersuchten Winterweizenschläge**

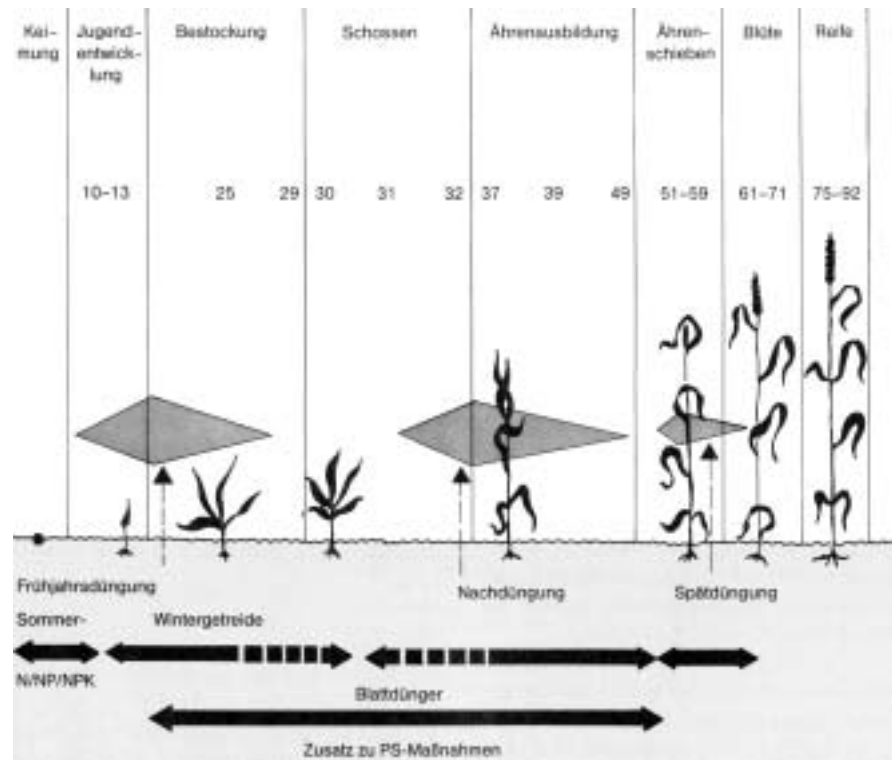
Untersuchungsgebiet	Betrieb	Schlagbezeichnung	Kurzbez.	Größe (ha)	Sorte
<b>Neetzow</b>	Littmann	3/2	Litt1	86,9	Flair
	Littmann	5/2	Litt2	155,0	Bussard
	Littmann	9/1	Litt3	159,6	Flair
<b>Imbshausen</b>	v. Plate	Unter dem Echter Wege	Plate1	18,7	Contur
	v. Plate	Unter dem Hohenstedter Wege	Plate2	16,7	Bandit
	v. Plate	Über dem Eichenbleke	Plate3	12,0	Contur

#### 3.2.1 Anbaufrüchte

Für beide Untersuchungsgebiete konzentrierte sich die Auswahl der einzelnen Testflächen auf Winterweizenbestände (Saatweizen, *triticum aestivum*) unterschiedlicher Sorten (siehe Tab. 6). Saatweizen nimmt in Norddeutschland und insgesamt in Mitteleuropa eine dominierende Stellung innerhalb des Kulturpflanzenbaus ein (vgl. Kap. 1.1) und weist daher erhöhten Forschungsbedarf bei der Entwicklung ertragssteigernder Maßnahmen und Konzepte auf. Daneben spricht die Anzahl vergleichbarer und ergänzender Studien und die Nachvollziehbarkeit der phänologischen Stadien sowie Bearbeitungsmaßnahmen in unterschiedlichen Naturräumen für die Auswahl dieser Kulturpflanzenart.

Obwohl der Saatweizen eine hohe Sortenvielfalt aufweist, gibt es nur geringe Unterschiede in der Ausbildung der wesentlichen oberirdischen Bestandteile von Weizenpflanzen (Ähre, Blatt, Halm) und im Gesamtaussehen. Der Halm besteht in seiner vollen Ausprägung aus 4 bis 7 Halmknoten, an denen die Blätter entspringen. Die Blüten (Körner, Karyopsen) sind in einer Ähre angelegt und in Blütenständen zusammengefasst. Die Blätter haben als Assimilationsstätten für die Photosyntheseprodukte einen entscheidenden Einfluss auf die Wachstumsleistung und Kornausbildung und damit auf die Ertragsbildung der Pflanze (nähere Ausführungen siehe z. B. AUFHAMMER 1998, FRAHM 1993).

Der Saatweizen durchläuft von der Keimung bis zur Reife eine Reihe phänologischer Stadien, die innerhalb der EU einheitlich mit Ziffern von "00" bis "92" gekennzeichnet werden. Die Phasen des vegetativen und des generativen (reproduktiven) Wachstums gehen fließend ineinander über. Für die Höhe des Ertrags (dz/ha) sind schließlich die Bestandsdichte (=Zahl ährentragender Halme/m<sup>2</sup>), die Kornzahl je Ähre und das Gewicht der Körner je Ähre (bzw. das Tausendkorngewicht, TKG) verantwortlich. Während des Pflanzenwachstums muss ständig eine optimale Versorgung mit den wichtigsten Nährstoffen gewährleistet sein. Mangelt es an einem Wachstumsfaktor während einer phänologischen Phase (z. B. Stickstoffversorgung während der Bestockung und des Schossens), so kann dies zu irreversiblen Schädigungen von Pflanzenorganen führen. Daher gehen mit den Entwicklungsstadien bestimmte Maßnahmen der Bestandsführung einher (Abb. 18).



**Abb. 18: Entwicklungsstadien und Maßnahmen der Bestandsführung bei Getreide (nach FRAHM 1993)**

Kulturpflanzenbestände weisen in bestimmten phänologischen bzw. physiologischen Stadien signifikante Merkmale in der Signatur der solaren Reflexion elektromagnetischer Strahlung auf. Dies wurde von SCHNEIDER (1994) für Getreide und weitere Kulturpflanzen anhand deskriptiv statistischer und qualitativer Merkmale der Spektralsignaturen eingehend untersucht. Die Beschreibung und qualitative Bewertung der während der Felduntersuchungen und Befliegungskampagnen erhobenen Weizenspektren erfolgt in Kap. 6.4. Der Schwerpunkt der Arbeiten zur spektroradiometrischen Analyse der Pflanzenbestände liegt auf der quantitativen Ableitung ertragsbildender Pflanzenbestandteile aus spektraler Information. Hierzu muss vorab auf die Bruttozusammensetzung von Pflanzen und deren Nährmechanismus eingegangen werden.

### 3.2.2 Pflanzenzusammensetzung und -ernährung

Um die Möglichkeiten und Chancen einer effektiven Nutzung fernerkundlicher Informationen für den teilflächenspezifischen Anbau bewerten zu können, ist die Kenntnis über die biochemische Zusammensetzung der betrachteten Pflanze sowie deren Interaktionen mit dem Nährmedium Boden unerlässlich. Dies soll an dieser Stelle jedoch nur ansatzweise erläutert werden. Für die detaillierte Beschreibung des Organismus Pflanze sowie der Ernährung von Kulturpflanzen wird auf die einschlägigen Lehrbücher verwiesen (z. B. AMBERGER 1996, AUFHAMMER 1998, BERGMANN 1993, MENGEL 1991, SCHILLING 2000, SMITH & HAMEL 1999).

Die Bruttozusammensetzung beschreibt die in einer Pflanze vorkommenden wichtigsten Stoffgruppen und Elemente, ohne auf deren einzelne Verbindungen einzugehen (SCHILLING 2000). Zunächst erfolgt die Aufgliederung der Frischsubstanz in Trockensubstanz und Wasser (i. A. durch Erhitzen bis zur Gewichtskonstanz). Wasser stellt in der Regel den weitaus größten Teil der Frischsubstanz in Blättern, Früchten, Stängeln, Wurzeln und Knollen (75 bis 90 %), macht in reifen Samen dagegen nur 8 bis 15 % aus. Das Wasser ist ein entscheidender

Faktor bei fast allen Stoffwechsel- und Lebensprozessen in der Pflanze. Es dient als Lösungsmittel, als Quellungsmittel (Turgeszenz), als Baustoff (Wasserstoff) und als Temperaturstabilisator (hohe Wärmekapazität, hohe Verdampfungswärme).

Die elementare Zusammensetzung der Trockensubstanz von Weizen ist in Tab. 7 exemplarisch für Korn- und Strohanteile dargestellt (Näherungswerte). Der Anteil der Nährelemente in der Trockensubstanz liegt im Durchschnitt bei ca. 1 bis 5 % für Getreide (SCHILLING 2000), der übrige Teil der Trockenmasse entfällt auf die organische Substanz. Dennoch ist die Verteilung der Nährelemente von entscheidender Bedeutung für das Wachstum der Pflanze, da die Nährelementkonzentration die ertragbildenden Stoffwechselprozesse und deren Produkte maßgeblich beeinflusst. Der für die Ertragsbildung von Weizen bedeutendste Stoffwechselvorgang in der Pflanze ist die Proteinbildung. Charakteristisch für die Proteine ist ihr hoher und weitgehend konstanter Stickstoffgehalt, weshalb eine direkte Beziehung zwischen dem Rohproteingehalt einer Pflanze und dessen Stickstoffgehalt hergestellt werden kann:

$$N_{tot} * 6,25 = \text{Rohprotein}$$

Gl. 12

Die Gesamt-Stickstoff-Menge wird laboranalytisch bestimmt und in Beziehung gesetzt zu den spektrometrischen Labor- und Feldmessungen der Pflanze (Kap. 7).

Neben der Proteinbildung ist der Stickstoffgehalt auch für den Chlorophyllaufbau und damit für die Strahlungsassimilation unersetzlich. Ein N-Mangel schlägt sich deshalb direkt in der Hemmung der Chlorophyllsynthese und damit in der Färbung der Pflanzenteile nieder (gelbgrüne bis gelbe Verfärbung mit zunehmendem N-Mangel).

**Tab. 7: Elementarzusammensetzung von Weizenbestandteilen (nach BERGMANN 1993)**

Zuordnung	Element	Gehalt (Anteil an der Trockensubstanz)		Einheit
		Korn	Stroh	
<b>organische Substanz</b>	C	im Mittel 40 bis 50		%
	H	im Mittel 5 bis 7		%
	O	im Mittel 42 bis 48		%
<b>Makronährelemente</b>	N	1,8 – 2,5	0,4 – 0,6	%
	P	0,35 – 0,5	0,1 – 0,13	%
	K	0,5 – 1,41	0,74 – 1,16	%
	Mg	0,12	0,06 – 0,12	%
	Ca	0,06	0,24	%
	S	0,2	0,1	%
	<b>Mikronährelemente</b>	Fe	500	300
Mn		50	50	ppm
Zn		40	30	ppm
Cu		6	80	ppm
Mo		0,3	60	ppm
Na			700	ppm

Die skizzierten Beziehungen zwischen Stoffwechselprodukten und Nährelementgehalt müssen berücksichtigen, dass die Anzahl der möglichen Verbindungen nicht immer auf eine bestimmte Stoffwechselreaktion beschränkt ist und dass die Konzentration der Nährelemente von Ihrer Verfügbarkeit im Nährmedium Boden abhängig ist. Das Nährstoffangebot des Bodens wiederum richtet sich nach den Eigenschaften des Bodenkörpers im Wurzelbereich der Pflanze.

Grundsätzlich besteht ein Zusammenhang zwischen Nährelementgehalt des Bodens und dem der Pflanze. Die im Boden enthaltenen oder durch Düngung (organisch und mineralisch) zugeführten Nährstoffe sind ein wesentlicher, aber nur ein Faktor unter vielen, die das



Wachstum und die Entwicklung der Pflanze und den daraus resultierenden Ertrag und die Qualität der Ernteprodukte mitbestimmen. Genauer gesagt, wird die Verfügbarkeit der Nährstoffe von zahlreichen standortabhängigen Faktoren beeinflusst.

Entscheidend für den Erfolg pflanzenbaulicher Maßnahmen ist nicht nur das Wissen über die im Boden und in der Pflanze enthaltenen Nährstoffe, sondern in weitaus höherem Maße, die Berücksichtigung derjenigen Parameter, die beeinflussen, wie diese Nährstoffe an die Pflanze angeliefert werden und von ihr aufgenommen und umgesetzt werden können (BERGMANN 1993). Die Gesamtheit dieser Faktoren wird bestimmt durch die drei wesentlichen Wachstumsfaktoren, die die Entwicklung von Kulturpflanzenbeständen beeinflussen:

⇒ Licht

⇒ Temperatur

⇒ Wasser

Diese Faktoren interagieren hinsichtlich ihrer Ausprägung und Auswirkung auf den Pflanzenbestand. Daraus folgt, dass es bei der Betrachtung des Pflanzenbestands mit Hilfe spektrometrischer Verfahren für die Ableitung teilflächenspezifischer Applikationsmaßnahmen im Pflanzenbau nicht genügt, ein Abbild des Pflanzenzustands zu erstellen. Vielmehr ist eine möglichst umfassende Einbeziehung von Einflussfaktoren bei der Modellierung von Maßnahmen der Bestandspflege notwendig.



## 4 Spektralsensoren und andere Aufnahmesysteme

Zur Erfassung der räumlichen und zeitlichen Inhomogenitäten innerhalb der untersuchten Getreideschläge wurden verschiedene berührungslose bzw. nicht-destruktive Verfahren eingesetzt, welche als Fernerkundungsverfahren im weiteren Sinne angesehen werden können.

Neben der ausführlichen spektralanalytischen Untersuchung der oberirdischen Pflanzenmasse mit Hilfe eines nicht-abbildenden Spektrometers (Kap. 4.1) erfolgten Befliegungen mit einem abbildenden Spektrometer (Kap. 4.2) sowie mit einer Mittelformatkamera (Kap. 4.3.1).

Die Variabilität der oberen Bodenschichten wurde mit Hilfe eines aktiven elektromagnetischen Sensors erfasst (Kap. 4.3.2). Zusätzlich stehen die Daten der Ernte-Ertragskartierung sämtlicher Winterweizenschläge für das jeweilige Anbaujahr zur Verfügung.

### 4.1 ASD FieldSpec® Pro JR Spektrometer

Feldspektroskopie beinhaltet die Beschreibung und Analyse der Zusammenhänge zwischen spektralen Charakteristika von Objekten und deren biophysikalischen und biochemischen Eigenschaften in einer natürlichen Umgebung. Im Gegensatz zu bildgebenden Fernerkundungssensoren handelt es sich bei den Spektrometern um nicht-abbildende Systeme, welche immer nur einen durch den Öffnungswinkel der verwendeten Optik beschränkten Ausschnitt der Oberfläche punkthaft erfassen.

Die spektralen Messungen beruhen hierbei auf den in Kap. 1 aufgezeigten strahlungsphysikalischen Prinzipien und Interaktionen der solaren Strahlung mit natürlichen Oberflächen bzw. der Emission thermaler Strahlung von einem Körper.

Die Feldspektroskopie leistet einen wesentlichen Beitrag zu verschiedenen Teilbereichen der Fernerkundung:

- ⇒ Kalibrierung von luft- und satellitengestützten Sensoren
- ⇒ Bestimmung der optimalen Spektralbänder / Wellenlängenbereiche, Abbildungsgeometrie und des Aufnahmezeitpunktes für eine bestimmte fernerkundliche Fragestellung
- ⇒ Entwicklung, Verbesserung und Test von Modellen zur Beschreibung biophysikalischer und biochemischer Parameter aus Strahlungswerten (multivariate Regressionsmodelle, Wachstumsmodelle, Strahlungstransfer-Modelle).

Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Messungen konzentrieren sich auf den zweiten und dritten Anwendungsaspekt. Insbesondere werden mit Hilfe der spektroradiometrischen Aufnahmen folgende Aspekte untersucht:

- ⇒ Validierung der bestehenden spektralen Kennwerte / Indizes / Ratios zur Ableitung biophysikalischer Bestandsparameter, insbesondere die
- ⇒ Validierung der bestehenden multivariaten Modelle zur Ableitung biochemischer Pflanzenparameter aus Spektralinformationen
- ⇒ Beschreibung des Zustands von Pflanzenbeständen aus spektralen Reflexionsdaten durch
- ⇒ Entwicklung eigener multivariater Regressionsmodelle zur Zustandsbeschreibung von Pflanzenbeständen

Hierzu wurde ein Feldspektrometer der Fa. Analytical Sepctral Devices (ASD), CO, USA eingesetzt, welches am Geographischen Institut der Georg-August-Universität zur Verfügung steht (ASD FieldSpec® Pro). Eine detaillierte technische Beschreibung des Gerätes kann Kap. 4.1.1 entnommen werden. Der Vorgang der Datenaufnahme und –prozessierung ist in Kap. 5.2 dargelegt.

### 4.1.1 Technische Beschreibung

Das ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro JR Spektrometer setzt sich aus drei einzelnen Detektoren zusammen, die gemeinsam den Wellenlängenbereich von 350 bis 2500 nm abdecken. Im UV/VNIR Bereich von 350 bis 1000 nm wird ein Silizium-Detektor mit einem starren Beugungsgitter verwendet, der bei Raumtemperatur betrieben wird. Im SWIR-1 und SWIR-2 (1000 bis 1800 nm bzw. 1800 bis 2500 nm) werden zwei separate thermoelektrisch gekühlte Indium-Gallium-Arsenid-Detektoren (InGaAs) mit oszillierenden Beugungsgittern verwendet. Das minimale Messintervall beträgt 0,1 Sekunden. In den meisten Anwendungen werden einzelne Messungen über einen Mittelwertmodus zu einer Gesamtmessung integriert um den systemimmanenten Rauschanteil des auszuwertenden Signals zu unterdrücken (Signal-to-Noise-Ratio, *SNR*, vgl. hierzu Kap. 4.1.3).

Der Öffnungswinkel des Sichtfelds (*field of view*, FOV) der standardmäßig mitgelieferten Optik beträgt 25°. Die Öffnung befindet sich am Ende eines externen, 1,5 m langen Fiberglaskabels, welches zur leichteren Handhabung in einen Pistolengriff eingefasst ist<sup>10</sup>. Die Strahlung wird von dem gebündelten Fiberglaskabel weiter geleitet. Innerhalb des Gehäuses wird der Kabelstrang in drei Bündel separiert, die die Strahlung an die Detektoren liefern.

Die Spektrometer, incl. Kühlung und Stromversorgung, befinden sich in einem robusten Aluminium-Gehäuse, welches im Labor als Standgerät funktioniert und im Gelände an einem Tragegriff oder in der mitgelieferten Rucksackvorrichtung transportiert werden kann. Das Gerät wird durch ein Notebook über eine Parallelschnittstelle bedient. Die Stromversorgung erfolgt im Feldbetrieb durch Nickel-Cadmium-Akkus, im Laborbetrieb kann das Gerät über ein 220 V-Adapter mit Wechselstrom betrieben werden.

Die technischen Standard-Spezifikationen des ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro JR sind zur Übersicht in Tab. 8 zusammengefasst<sup>11</sup>.

**Tab. 8: Standard-Spezifikationen des ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro JR (nach ASD INC. 1999)**

<b>Spektralbereich (spectral range)</b>	350 – 2500 nm
<b>Spektrale Auflösung (spectral resolution)</b>	3 nm (350 – 1000 nm) 30 nm (1000 – 2500 nm)
<b>Spektrale Empfindlichkeit (spectral sampling interval)</b>	1,4 nm (350 – 1000 nm) 2,0 nm (1000 – 2500 nm)
<b>Spektrale Bandbreite (spectral bandwidth)</b>	1 nm (resampled)
<b>Zeitliche Auflösung</b>	0,1 s
<b>Detektoren</b>	1 Si-Photodiode (350 – 1000 nm) 2 InGaAs-Photodioden (1000 – 2500 nm)
<b>radiometrische Empfindlichkeit (Noise Equivalent Radiance, NER)</b>	2,8*10 <sup>-9</sup> W/cm <sup>2</sup> /nm/sr (350 – 1000 nm) 2,4*10 <sup>-9</sup> W/cm <sup>2</sup> /nm/sr (1000 – 1800 nm) 8,8*10 <sup>-9</sup> W/cm <sup>2</sup> /nm/sr (1800 – 2500 nm)
<b>Öffnungswinkel</b>	25°
<b>Gewicht</b>	7,2 kg (+ 2,2 kg NiCad Akku)

<sup>10</sup> Zur Fixierung der Optik wird dieser Griff in der Regel auf ein Stativ montiert.

<sup>11</sup> Die Erläuterung der radiometrischen Begriffe in Tab. 8 erfolgt in Kap. 4.1.3 (Kalibrierung).

## 4.1.2 Zubehör

### 4.1.2.1 Spectralon®-Referenzstandard

Sämtliche Außen- und Laboraufnahmen wurden als Relativmessungen der gerichteten spektralen Reflexion einer natürlichen Oberfläche im Verhältnis zu einer Referenzfläche mit annähernd idealer, lambertscher Oberfläche durchgeführt. Als Referenzstandard wurde eine 10" x 10" (Zoll) große Spectralon®-Platte verwendet. Diese weist keine vollkommen diffuse Reflexion auf, da sich vor allem bei großen Zenitwinkeln  $\theta$  der Einstrahlung die spiegelnde Komponente der Reflexion vergrößert. Für die Ermittlung der spektralen Reflexionsfaktoren im Rahmen dieser Arbeit ist die annähernde Isotropie der Reflexionsfunktion als ausreichend zu betrachten, da der Zenitwinkelbereich keine kritischen Werte  $\theta$  annimmt. Trotz der unvollkommenen Isotropie kann laut MEISTER (1995) von der vereinfachenden Annahme einer rotationssymmetrischen Oberfläche ausgegangen werden, d.h., es ergeben sich keine signifikanten Änderungen der reflektierten Strahldichte, wenn die Spectralon®-Platte um ihre vertikale Achse gedreht wird.

Spectralon® steht für ein eingetragenes Warenzeichen der Firma Labsphere Inc. sowie für ein patentiertes Reflexionsmaterial aus PTFE-Staub (Polytetrafluoroethylen). Dieser wird in einer Schicht von 0,1 bis 1,0 mm Dicke ohne Einsatz von Bindungsmitteln ausgehärtet, was die hohe Temperaturbeständigkeit von bis zu 350 °C und die Wasserundurchlässigkeit begünstigt. Einfallende Strahlung im Wellenlängenbereich von 0,2 bis 2,5  $\mu\text{m}$  wird an der Spectralon®-Oberfläche entweder reflektiert oder sie durchdringt diese. Eine Absorption elektromagnetischer Strahlung findet nicht statt. Die Signatur der Variationskoeffizienten von Spectralon® ist im Wellenlängenbereich von 0,25 bis 2,5  $\mu\text{m}$  relativ flach, d.h., die spektralen Reflexionsfaktoren sind relativ konstant. Dies gilt auch für die H<sub>2</sub>O-Absorptionsbereiche im NIR, die aufgrund der wasserabweisenden Eigenschaft des Spectralon® keine Rolle spielen. Die Abweichungen liegen im Bereich von <0,5 % für den Spektrumsausschnitt von 300 nm bis 2200 nm und < 2 % für den Bereich von 250 nm bis 2500 nm<sup>12</sup>.

**Tab. 9: Physikalische Eigenschaften des Spectralon®-Reflexionsstandards SRT-99-100**

Eigenschaft	Wert
Spektrale Empfindlichkeit	0,2 – 2,5 $\mu\text{m}$
Reflexion	Ø 98 – 99 %
Dichte	1,25 – 1,5 $\text{g}/\text{m}^3$
Wasserpermeabilität	< 0,001 % (hydrophobisch)
linearer Ausdehnungskoeffizient	5,5 – 6,5 * 10 <sup>-4</sup> in/C°
thermale Beständigkeit	bis 350 °C
Entzündbarkeit	nicht entzündbar

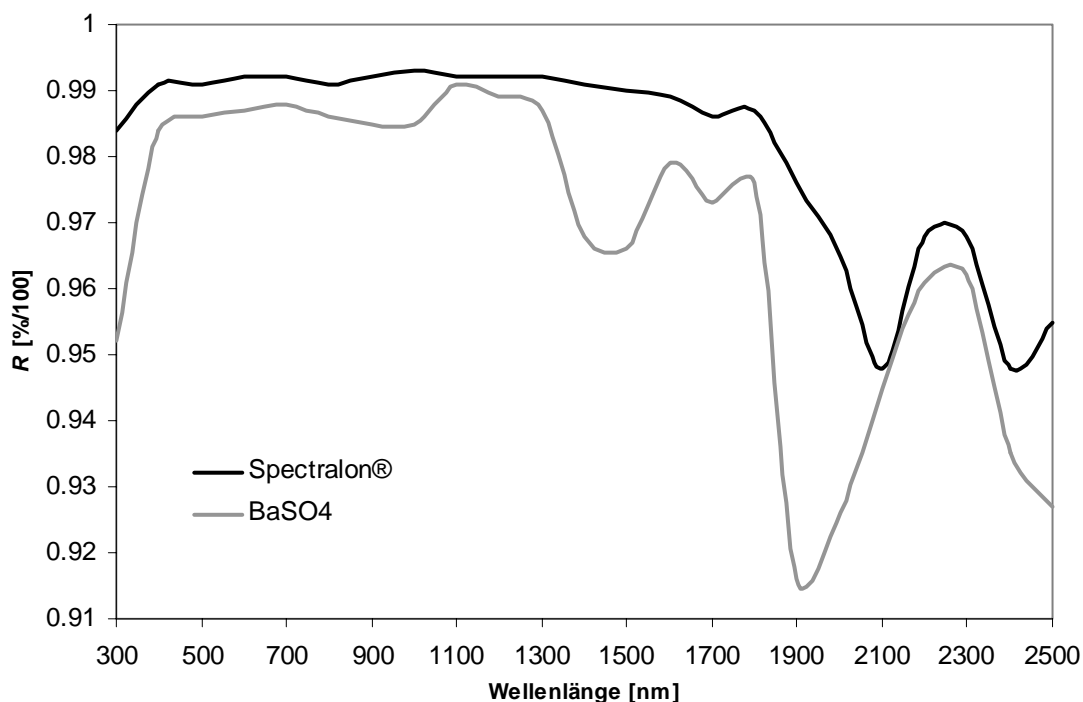
Quelle: LABSPHERE (2001)

Für die durchgeführten Kalibrierungs- und Feldmessungen wurde ein Spectralon SRT-99-100 Reflexionsstandard verwendet, der in einen eloxierten schwarzen Aluminiumrahmen eingebettet ist.

<sup>12</sup> Die Angaben entstammen dem Kalibrierungszertifikat für das verwendete Spectralon® SRT-99-100. Die Kalibrierung wurde durchgeführt entsprechend der Vorgaben des NIST (National Institute of Standards and Technology) mit einem Perkin-Elmer-Spektrophotometer und einer Ulbrichtkugel als Lichtquelle.

Neben Spectralon<sup>®</sup> (synonym: "Halon", "Sintered Halon", "PTFE") existieren eine Reihe weiterer Reflexionsstandards, wie z. B. Bariumsulfat ( $\text{BaSO}_4$ ), Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und Siliziumnitrit ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Die meisten dieser Standards sind jedoch nur bedingt konkurrenzfähig zu Spectralon<sup>®</sup>, da sie v. a. im UV/VIS starke Absorptionsbereiche, bedingt durch winzige enthaltene Farbpigmente oder Bindungsmittel, aufweisen (SCHAEPMAN 1998).

Die Signaturkurve der Reflexionsfaktoren für eine Spectralon<sup>®</sup>-Oberfläche im Vergleich zu einer bariumsulfatbeschichteten Oberfläche ist in Abb. 19 aufgezeigt. Bezogen auf eine ideal diffus reflektierende Lambert-Oberfläche kommt es im VIS/NIR/SWIR-1-Bereich zu Strahlungsverlusten von unter 2 %, im SWIR-2 tritt ein Absorptionsband des PTFE-Materials bei 2000 nm auf, was zu Verlusten von ca. 6 % führt. Bei der  $\text{BaSO}_4$ -Beschichtung treten deutlich die Wasserabsorptionsbanden bei 1400 und 1900 nm hervor, was zu erhöhten Messungenauigkeiten in diesen Bereichen führt.



**Abb. 19:** Typische Spektralsignaturen einer Spectralon<sup>®</sup> und einer  $\text{BaSO}_4$ -Oberfläche (nach LABSPHERE 2001)

#### 4.1.2.2 Quartz-Tungsten-Halogen-Lampe

Für die Laborspektrometernmessungen wird eine künstliche Beleuchtungsquelle benötigt. Diese muss für den zu messenden Bereich des elektromagnetischen Spektrums eine möglichst konstante Strahlungsleistung erbringen.

Die verwendete Strahlungsquelle ist eine Quartz-Tungsten-Halogenlampe mit 14,5 Volt / 50 Watt (Lowel Pro-Lamp<sup>®</sup>), die auf ein schwenkbares Stativ montiert und somit auf die gewünschten Zenitwinkel  $\theta_i$  einstellbar ist. Diese Punktlichtquelle liefert eine hohe und gleichbleibende Strahldichte für den Wellenlängenbereich von 350 bis 2500 nm.

### 4.1.3 Systemspezifische Kalibrierung

Bei den mit dem ASD FieldSpec® Pro JR Spektrometer durchgeführten Messungen handelt es sich ausschließlich um Relativmessungen, d. h. ein Messwert setzt sich aus zwei Einzelmessungen (Referenz und Objekt) zusammen. Da keine Absolutmessungen (radiance) durchgeführt werden, sind absolute radiometrische Kalibrierungen auf internationale Standardeinheiten (SI-Einheiten) nicht notwendig. Für die Verlässlichkeit der Messungen ist es aber erforderlich, das Gerät vor den Messungen auf dessen spektroradiometrische Eigenschaften zu überprüfen.

Für die relative radiometrische Kalibrierung ist die Kenntnis einer Reihe von Charakteristika notwendig, die die Leistungsfähigkeit eines Spektrometers beschreiben. Dies sind im einzelnen:

- ⇒ Signal-Rausch-Verhältnis (signal-to-noise-ratio, *SNR*)
- ⇒ Radiometrische Empfindlichkeit (Noise-Equivalent-Radiance, *NER*)
- ⇒ spektrale Auflösung (spectral resolution)
- ⇒ Spektral-Intervall / spektrale Empfindlichkeit (sampling interval / spectral sampling)
- ⇒ spektrale Bandbreite / Stützstellenabstand (spectral bandwidth)
- ⇒ Wellenlängenfehler (wavelength error)

Rauschen ist ein Bestandteil fast sämtlicher von einem Detektor aufgezeichneter Signale. Die Ursache des Signalrauschens ist vielfältig und reicht von mechanischen Schwingungen der optischen Komponenten, gerichtetem Streuungsanteil reflektierter Strahlung, elektrischem Rauschen (z. B. elektromagnetischer Felder durch Drehstrommotoren), bis hin zu internem Rauschen der Detektoren und der Bestandteile der Prozessierungskette (SCHAEPMAN 1998).

Der verbleibende Anteil des vom Detektor gemessenen Wertes ist das eigentliche Signal. Das Verhältnis zwischen Signal- und Rauschanteil einer Messung wird als **Signal-Rausch-Ratio (SNR)** quantifiziert. Der *SNR*-Index wird in der Fernerkundung in verschiedenen Formen angegeben. Die Problematik der Berechnung des *SNR* liegt hierbei in der eindeutigen Definition des Signal- und des Rauschanteils. Sind diese Faktoren bekannt, bestehen zahlreiche Möglichkeiten zu Ihrer Verhältnisbestimmung. Als Rauschen wird hierbei in den meisten Fällen die Standardabweichung ( $\sigma$ ) oder die Varianz ( $\sigma^2$ ) des Rauschanteils oder des Gesamt-Signals angegeben (vgl. SCHOWENGERDT 1997, KOSTKOWSKI 1997). Der in dieser Arbeit verwendete *SNR* basiert auf der Definition des Rauschens als Varianz des Dunkelstroms:

$$SNR = \frac{\sigma}{N} = \frac{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DN_{Total}) - (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DN_{Rauschen})}{\sigma^2 (DN_{Rauschen})} \quad Gl. 13$$

<u>mit</u>	
<i>SNR</i>	: Signal-Rausch-Verhältnis (signal to noise ratio)
$\sigma$	: Standardabweichung
$\sigma^2$	: Varianz
<i>DN</i>	: Messwert (digital number)

Die Messung des Signals und des Rauschens erfolgt unter Laborbedingungen mit einem Referenzstandard und einer Halogenlampe (siehe Kap. 4.1.2). Die erste Messung registriert das Signal, welches von dem Referenzstandard reflektiert wird. Die zweite Messung erfolgt bei geschlossener Optik und registriert somit ausschließlich das interne Rauschen des Gerätes

(Dunkelstrom). Die Geräteeinstellungen entsprechen denen für Feldmessungen (Mittelwertmodus, Wiederholungsintervall)<sup>13</sup>.

In Abb. 20 sind die *SNR*-Werte (120 Wiederholungsmessungen) für das verwendete ASD FieldSpec® Pro JR als Funktion der Wellenlänge aufgetragen. Für die Werteachse ist aufgrund des großen Schwankungsbereichs der *SNR*-Werte eine logarithmische Skalierung erforderlich. Deutlich wird, dass jeweils an den Übergängen der Detektoren eine starke Änderung der Werte auftritt und dass die Werte im SWIR-2 und im UV/VIS stark abnehmen. Die Auswirkungen dieser kritischen *SNR*-Werte (hohe Fehlerwahrscheinlichkeit im SWIR2 und im UV/VIS) sind im weiteren Verlauf der Arbeit zu berücksichtigen (siehe Kap. 6.4).

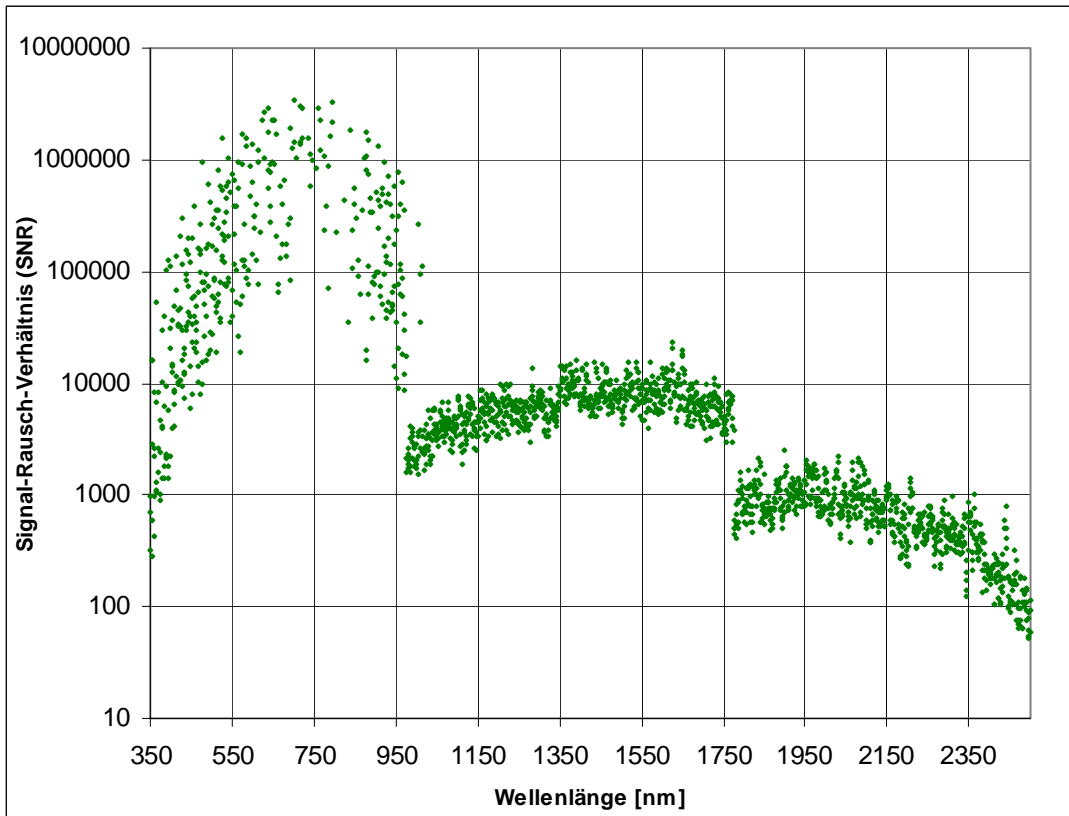


Abb. 20: Signal-to-Noise-Ratio (*SNR*) des ASD FieldSpec® Pro JR ( $n=120$ ;  $\Delta t=10$  s)

Die **radiometrische Empfindlichkeit** (*NER*) ist durch die Strahlungsleistung definiert, die erforderlich ist, um ein einen Wert  $SNR=1$  gemäß Gleichung 13 zu erhalten. Sie beschreibt die kleinstmögliche vom Detektor registrierbare Strahlungsänderung<sup>14</sup>.

Die Begriffe spektrale Auflösung, Aufnahmeintervall und spektrale Bandbreite werden oftmals synonym verwendet, beschreiben jedoch grundsätzlich unterschiedliche Sachverhalte. Zur vergleichbaren Charakterisierung von Spektrometern sind einige Anmerkungen notwendig.

Die nachfolgenden Erläuterungen (siehe hierzu auch Abb. 21) beruhen auf der Darstellung idealer, normalverteilter Spektral-Resonanzfunktionen (spectral response function), die das Resultat theoretischer infinit kleiner Emissionslinien sind, die am Detektor je Wellenlängenelement registriert werden (SCHAEPMAN 1998).

Unter dieser Voraussetzung ergibt sich die **spektrale Auflösung** (spectral resolution) aus der Halbwertsbreite der Resonanzfunktion. Sie beträgt beim ASD FieldSpec® Pro JR für den

<sup>13</sup> Zum Messaufbau und der Systemkonfiguration siehe Kap. 5.2.2.

<sup>14</sup> Die Abkürzung *NER* steht für noise-equivalent-radiance. Werden keine Strahldichtemessungen durchgeführt spricht man allgemein von *NES* (noise-equivalent-signal).



VNIR-Bereich 3 nm und für den SWIR-Bereich 15 nm (vgl. Tab. 8). Die **Zentrumswellenlänge** ist hierbei mit dem Maximum bzw. Mittelwert der Resonanzfunktion gleichzusetzen.

Das **Spektralintervall**  $\Delta\lambda$  (sampling interval / spectral sampling) beschreibt den Abstand auf der Wellenlängenachse zwischen zwei aufeinanderfolgend aufgenommenen spektralen Reflexionswerten, d. h. zwischen zwei Zentrumswellenlängen. Die jeweiligen Halbwertsbreiten (full width half maximum, FWHM) überlappen sich zu einem gewissen Betrag, der in der Regel 50 % nicht übersteigen sollte, um eine Übersättigung des Spektrums zu vermeiden. Wenn sich andererseits die Halbwertsbreiten nicht überlappen, wird das Spektrum nicht kontinuierlich abgetastet.

Die von den Detektoren im gegebenen Abstand  $\Delta\lambda$  (Spektralintervall) registrierten spektralen Strahlungsflusswerte werden von einigen Geräten (u. a. ASD FieldSpec<sup>®</sup>) für die Weiterverarbeitung automatisch auf einen einheitlichen Stützstellenabstand der Funktionskurve für die jeweiligen Detektor-Bereiche umgerechnet. Diese **spektrale Bandbreite** (spectral bandwidth) beträgt für das ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro JR für den gesamten Aufnahmebereich 1 nm. Die Umrechnung der Zentrumswellenlängen in die Stützstellen der Funktionskurve (**Wellenlängenkanäle**) erfolgt über die Anpassung an eine Spline-Funktion 4. Grades (ASD INC. 1999).

Eine Wellenlängenkalibrierung wurde vom Hersteller des ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro JR vor der Auslieferung im März 2001 und erneut im Februar 2002 durchgeführt. Für die Kalibrierung werden mit Hilfe eines Monochromators eng begrenzte, hochsignifikante Emissionslinien produziert, die von den Detektoren aufgezeichnet werden. Zwischen der Wellenlänge der Emissionslinie und den Wellenlängenkanälen des Detektors wird eine lineare Beziehung der Form

$$\text{Wellenlänge}_{\text{Emission}} = a + b * \text{Wellenlängenkanal} \quad \text{Gl. 14}$$

hergestellt. Die Wellenlängengenauigkeit für das verwendete ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro JR wird vom Hersteller mit +/- 5 nm angegeben.

Die Empfindlichkeit der ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro JR Detektoren verändert sich im Laufe einer Messperiode vor allem während der Aufwärmphase des Gerätes in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur (SALISBURY 1998). Dieses Phänomen der Empfindlichkeitsschwankungen (sensitivity drift) wurde unter Laborbedingungen durch Messungen der gerichteten Reflexionsfaktoren in einer konstanten Umgebung, nach einer Aufwärmphase des Gerätes von ca. 30 min., für einen Zeitraum von 60 min. dokumentiert. Wie aus Abb. 22 hervorgeht, treten die Schwankungen vornehmlich in bestimmten Wellenlängenbereichen auf. Der VNIR- sowie der SWIR2-Bereich ist an beiden Enden instabil, während im SWIR1-Bereich nur sehr geringe Schwankungen auftreten. Diese hohe Stabilität im SWIR1-Bereich wird von der ASD-Software benutzt, um automatisch eine Angleichung der Gitterübergänge bei 1000 und 1800 nm durchzuführen. Um allgemein unter Feldbedingungen und insbesondere im Bereich kurzer Wellenlängen die Messgenauigkeit zu erhöhen, sollten regelmäßig Dunkelstromkorrekturen durchgeführt werden (zur Durchführung der Feld- und Labormessungen siehe Kap. 5.2.2).

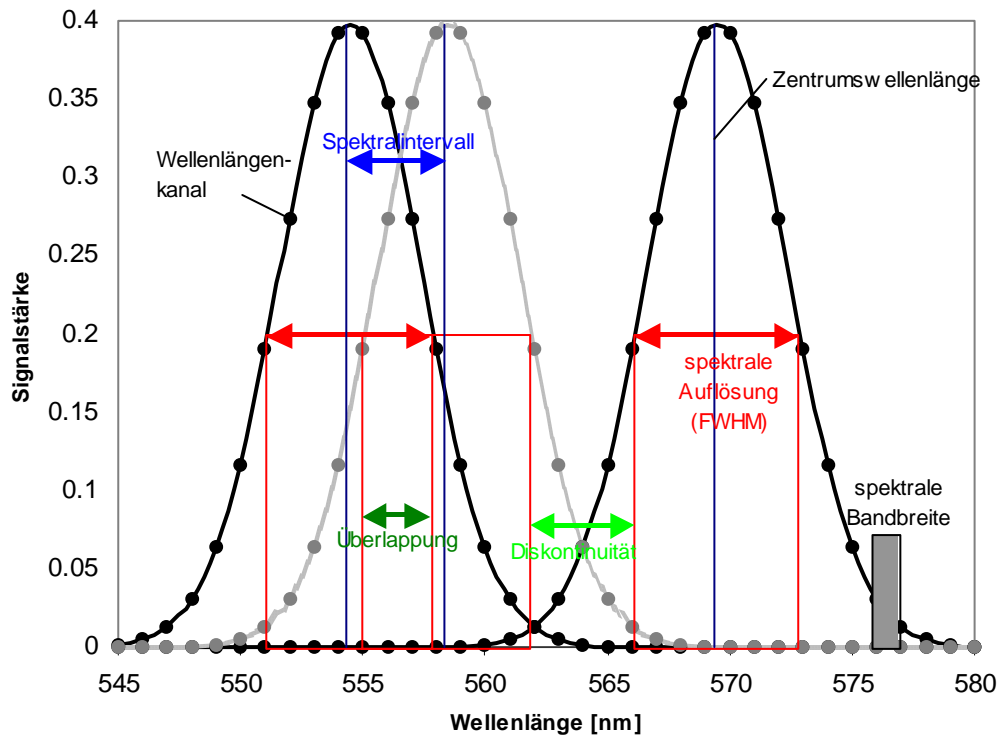


Abb. 21: Spektrale Merkmale einer Funktionssignatur am Beispiel einer Gaußschen Resonanzfunktion

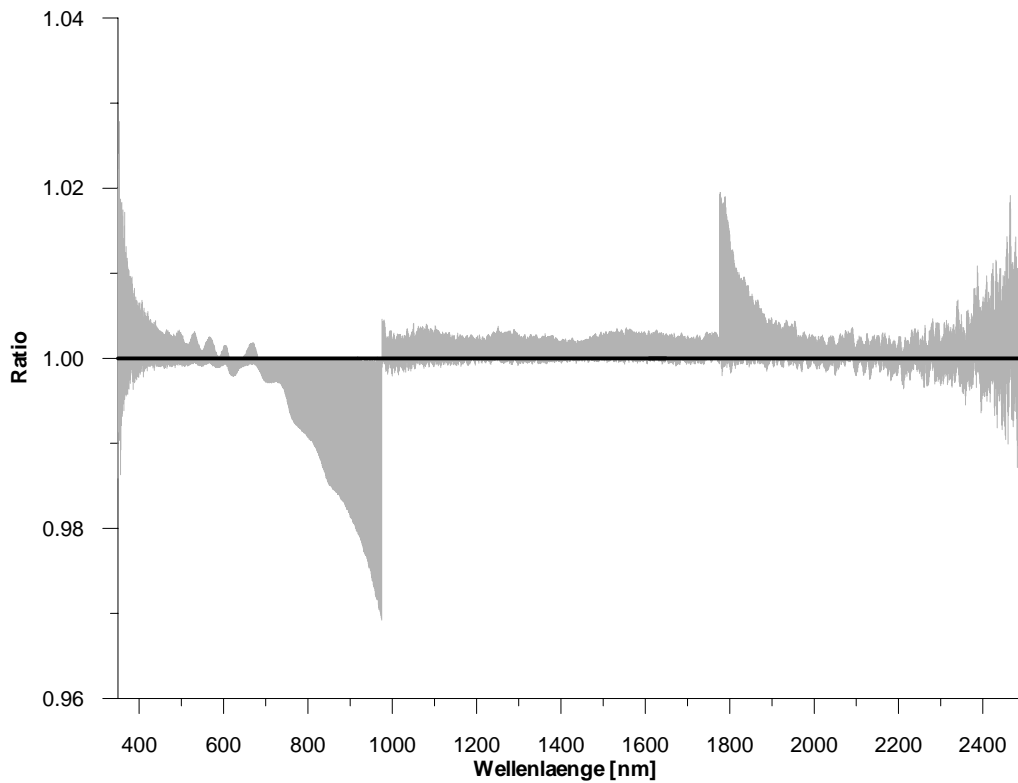


Abb. 22: Empfindlichkeitsschwankungen des ASD FieldSpec Pro JR ( $n=120$ ,  $\Delta t=30$  s)

## 4.2 HyMap<sup>®</sup>-Hyperspektralscanner

Die Befliegung der Testgebiete in Mecklenburg-Vorpommern (Untersuchungsgebiet "Neetzow") erfolgte 1999 im Rahmen der "ProSmart"-Initiative während zweier Flugkampagnen, am 06. Mai und am 20. Juni mit dem HyMap<sup>®</sup>-Sensor.

"ProSmart" ist ein Gemeinschaftsvorhaben der Astrium GmbH (ehem. DornierSatellitensysteme GmbH) und dem DLR-Bonn (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) zur Entwicklung von innovativen Geo-Informationsprodukten auf der Basis von Fernerkundungstechnologien (SAR, Hyperspektralsensoren, Digitalkameras), die in zukünftigen Satellitensystemen bereit gestellt werden können.

HyMap<sup>®</sup> ist ein kommerziell verfügbares sog. abbildendes Spektrometer, welches von der Fa. Integrated Spectronics Ltd., NSW Australia betrieben wird. Es handelt sich hierbei um einen Whiskbroom-Scanner, der Daten quer zur Flugrichtung durch einen mechanischen Scanner aufnimmt, wobei die zweite Dimension des Bildes durch die Vorwärtsbewegung des Flugzeugs entsteht. Aufgenommen wird die spektrale solare Strahlendichte (Radiance) im VIS und SWIR (0,4  $\mu\text{m}$  bis 2,5  $\mu\text{m}$ ), abgesehen von den Bereichen der atmosphärischen Wasserdampfabsorption bei 1,4 und 1,9  $\mu\text{m}$ . Das Kontinuum des elektromagnetischen Spektrums wird in bis zu 200 diskrete Bereiche (Wellenlängenkanäle) zerlegt. Daneben bietet der Sensor noch jeweils einen Kanal für das MIR und einen für das TIR an, die aber während der Befliegung ausgeschaltet blieben.

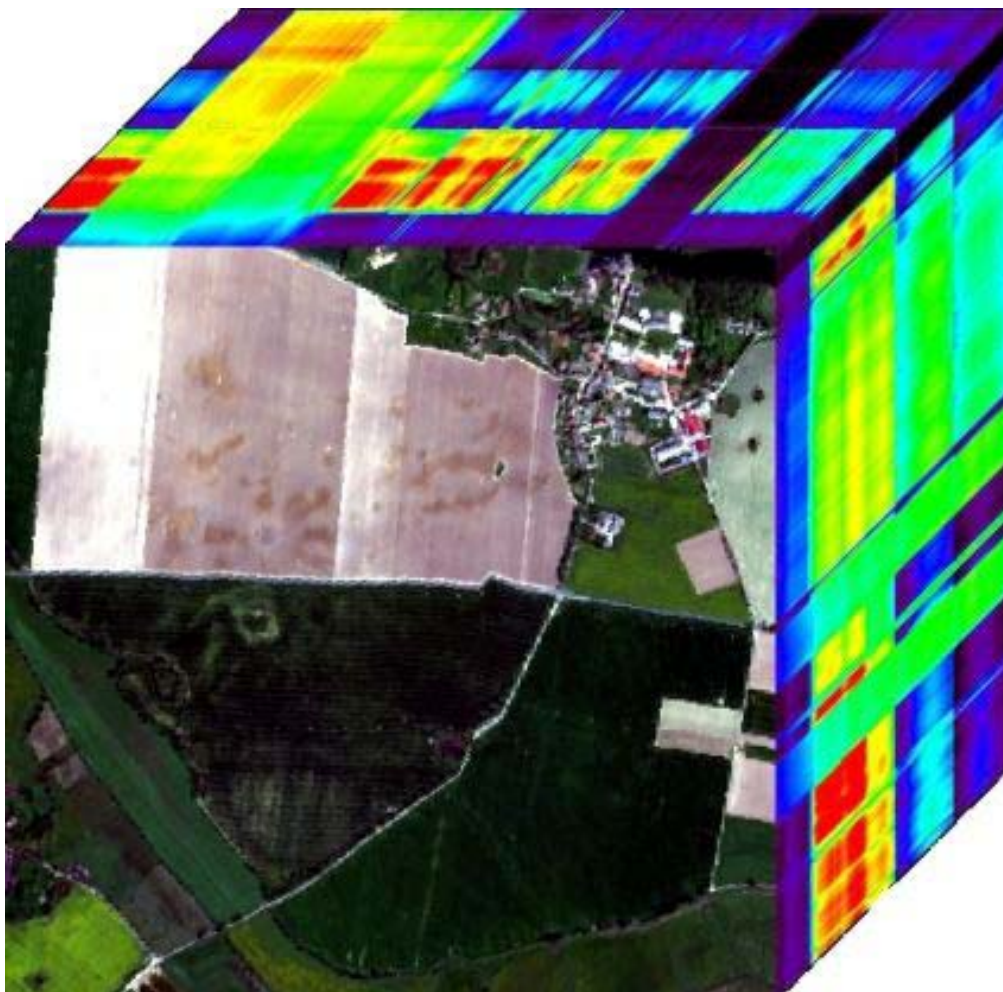


Abb. 23: Ausschnitt aus der HyMap<sup>®</sup>-Befliegung, dargestellt als Bildwürfel

Die maximale Auflösung beträgt bei 2500 m Flughöhe 5 m Bodenpixelgröße. Die Befliegung der Testgebiete fand in einer Höhe von ca. 3500 m statt, entsprechend mit einer Bodenauflösung von 7 m. Eine Übersicht der Systemkonfiguration zur Zeit der Befliegungen befindet sich in Tab. 10.

**Tab. 10: Technische Daten und überflugspezifische Systemkonfiguration des HyMap<sup>®</sup>-Sensors**

	Standardkonfiguration	Konfiguration Neetzow 1999
Spektralbereich	0,44 – 2,50 $\mu\text{m}$ , 8 – 10 $\mu\text{m}$	0,44 – 2,48 $\mu\text{m}$
Wellenlängenkanäle	100 – 200	128
spektrale Bandbreite	10 – 20 nm	13 – 17 nm
Aufnahmehöhe	2000 – 5000 m ü. G.	3500 m ü. G.
Bodenauflösung (IFOV)	max. 2,0 m (in Flugrichtung) max. 2,5 m (in Azimutrichtung)	7,0 m
Öffnungswinkel (FOV)	60°	
Streifenbreite	max. 4,6 km (bei IFOV: 10,0 m)	3,5 km

Quelle: COCKS et al. 1998, eigene Erhebungen

### Datenprozessierung

Die geometrische Entzerrung der Daten erfolgte durch die Montage des Sensors auf einer Kreisel-Stabilisierungsplattform, wodurch die Flugzeug-GPS-Positionsdaten automatisch auf die Nadirpixel bzw. das gesamte Bild übertragen werden können. Bei der zweiten Befliegung kam es leider zu einem Ausfall des Kreisel-Systems, wodurch eine manuelle geometrische Korrektur notwendig wurde. Diese erfolgte durch eine Bild-zu-Bild-Entzerrung auf die simultan aufgenommenen Daten des HRSC-Scanners (High-Resolution-Spectral-Camera des DLR) und durch die Geocodierung auf Basis der Blätter der TK 1:10.000.

### Kalibrierung

Die Kalibrierung und Atmosphärenkorrektur der Rohdaten erfolgte am DLR-Oberpfaffenhofen mit Hilfe des Moduls MODTRAN4 und einer interaktiven "Inflight"-Kalibrierung, wobei die atmosphärischen Parameter und die Kalibrierungsdaten verändert und an bekannte Bodenspektren angepasst wurden.

Das Resultat der geometrischen und atmosphärischen Korrektur ist ein Bilddatensatz, der mit einer hohen Lagegenauigkeit die spektrale Reflexion des aufgenommenen Geländeausschnittes darstellt.

## 4.3 Sonstige Datenerfassungsgeräte

### 4.3.1 Luftbildaufnahmen

Im Testgebiet Imbshausen wurde am 16.07.2001 eine Luftbildbefliegung durchgeführt<sup>15</sup>.

Die Bilder wurden aus einer einmotorigen Cessna C-172N mit Hilfe einer aus der Seitentür herausragenden Querstange aus einer mittleren Höhe von 400 m annähernd senkrecht aufgenommen. Hierzu diente eine Mittelformatkamera des Typs "Zenza Bronica" mit 6x7cm-Bildformat und einem 65 mm Objektiv. Neben einem Farbdiafilm (220/100 ASA, Kodak

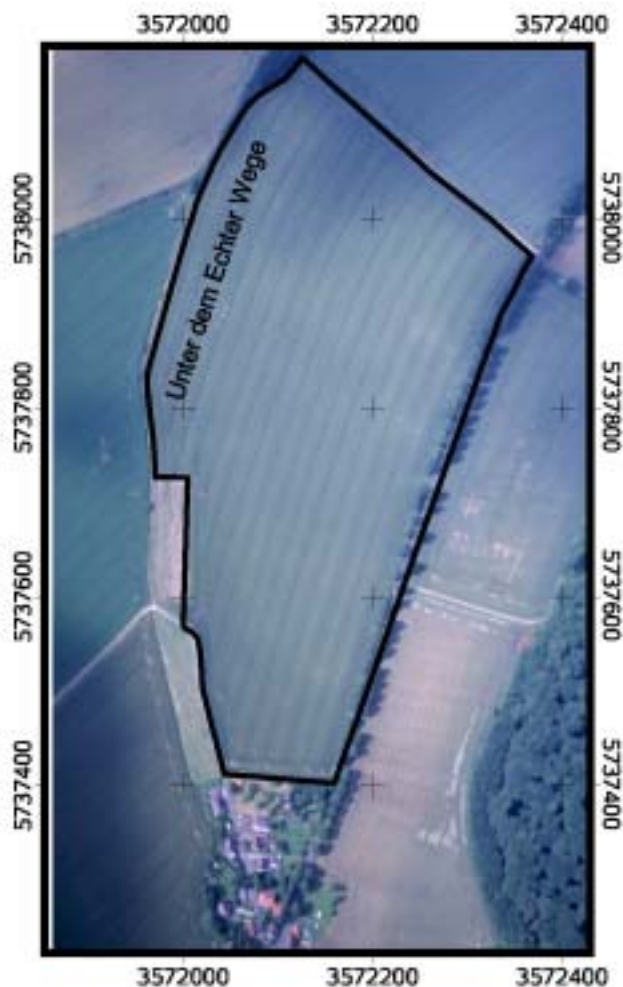
<sup>15</sup> Die Befliegung und Luftbildaufnahme wurde von Dipl.-Geogr. Lars Gleitsmann im Auftrag des Verfassers durchgeführt.

Ectachrome) wurde ein S/W-IR-Film eingesetzt, der zusätzlich den Einsatz eines Schwarzfilters erforderte.

Die Aufnahmebedingungen während der Befliegung entsprachen leider nicht denen, die für eine optimale Auswertung der aufgenommenen landwirtschaftlichen Flächen notwendig wären.

Das Klima im Untersuchungszeitraum im Mai / Juni 2001 war, abgesehen von den Schönwetterperioden während der ASD FieldSpec<sup>®</sup>-Messkampagnen, geprägt von mäßiger bis starker ganztägiger Bewölkung. Aus diesem Grunde konnte eine Luftbildbefliegung erst zu einem späten Zeitpunkt, bereits während der reproduktiven Phase der Getreideentwicklung, durchgeführt werden. Trotzdem geben die Aufnahmen einen guten Überblick über die räumlichen Strukturen innerhalb des Testschläge im Untersuchungsgebiet. Zum Zeitpunkt der Aufnahme betrug die Wolkenbedeckung 7/10, die Bewölkung in Form von Cumuluswolken wirft teilweise Schatten auf die während einer Phase der Wolkenauflockerung aufgenommenen Schläge.

Die Luftbilder wurden mittels einer Polynomanpassung geometrisch auf eine Zentralperspektive entzerrt (Abb. 24).



**Abb. 24:** Entzerrte Luftbildaufnahme der Luftbildbefliegung am 16.07.2001 im Untersuchungsgebiet Imbshausen (Schlag: "Unter dem Echter Wege")

Daneben liegen für das Untersuchungsgebiet Imbshausen digitale S/W-Orthophotos des Landesvermessungsamtes Niedersachsen, Hannover (LGN) mit einer synthetischen Auflösung von 30 cm (resampled) vor.

### 4.3.2 Elektrische Leitfähigkeit

Geophysikalische Verfahren werden in vielfältiger Weise zur Messung von Unterschieden physikalischer Boden- und Gesteinseigenschaften, wie z. B. Dichte, elektrischer Leitfähigkeit sowie elastischer und thermischer Kenngrößen eingesetzt. In der Landwirtschaft hat sich die Messung der elektrischen Leitfähigkeit in den letzten Jahren als effektive Methode zur ortsdifferenzierten Erfassung von Bodenmerkmalen herausgestellt. Die hierfür in den meisten Fällen verwendete Messanordnung kann im weiteren Sinne ebenfalls als Fernerkundungsverfahren angesehen werden, da es berührungslos, d.h. ohne direkten Bodenkontakt arbeitet.

Das Messprinzip der Elektromagnetik besteht aus zwei Spulenordnungen, die sich in einem definierten Abstand zueinander befinden. Die Sendespule erzeugt ein elektromagnetisches Feld, das einem Bodensegment aufgeprägt wird und dort in Abhängigkeit von seinen Eigenschaften bzw. seiner elektrischen Leitfähigkeit verändert wird. An der Empfangsspule wird das durch die Interaktion mit dem Bodenkörper veränderte Primärsignal registriert. Aus dem Verhältnis des ausgesendeten und des empfangenen Feldsignals wird die elektrische Leitfähigkeit des Untergrundes ermittelt (LÜCK et al. 2000).

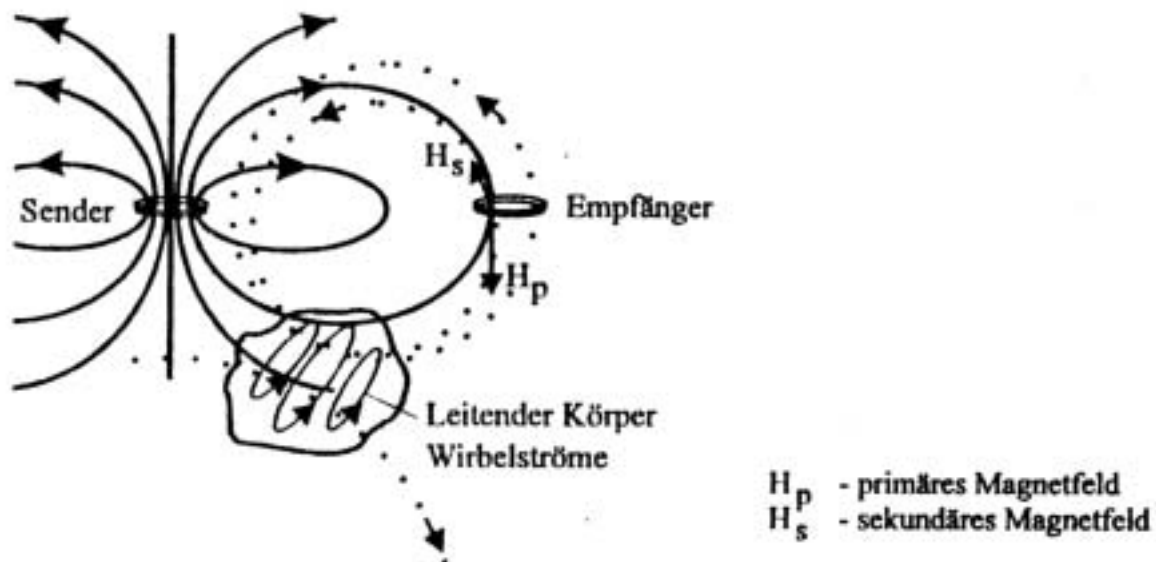


Abb. 25: Messprinzip der Elektromagnetik (nach LÜCK et al. 2000)

Das eingesetzte Messgerät ist ein EM-38 der Firma Geonics Ltd., Ont., Canada. Bei diesem Gerät sind die beiden Spulen im Gerät mit einem Abstand von 1 m fest installiert. Durch Kippen des Gerätes in der Tragevorrichtung besteht die Möglichkeit der Messung entweder mit einem vertikalen Dipol oder mit einem horizontalen Dipol zu messen. Die Messungen wurden ausschließlich bei vertikaler Orientierung der Spulenachsen zur Bodenoberfläche durchgeführt. Die räumliche Lage der Spulen beeinflusst neben der Frequenz und der Leitfähigkeit des Untergrundes die Eindringtiefe des Feldsignals. Diese beträgt nach Herstellerangaben für einen vertikalen Dipol max. 1,5 m, wobei die stärkste Beeinflussung des Signals in einem Tiefenbereich von 30 – 50 cm erfolgt (LÜCK et al. 2000). Die ermittelten Messwerte liefern somit eine integrale Aussage über ein gewisses Volumenelement des Bodens und werden in Kap. 5.1.3 auf ihre Zusammenhänge zu den erhobenen Bodenparametern überprüft.



Die Kartierungen der elektrischen Leitfähigkeit wurden für die Testfelder im Untersuchungsgebiet Imbshausen am 09. April 2001 durchgeführt<sup>16</sup>. Der Kartierungstermin ergab sich aus der Vorüberlegung, dass zur Erfassung der Bodenartenvariabilität möglichst andere, das Feldsignal beeinflussende, variable Faktoren auszuschließen sind. Hierzu sollte der betrachtete Bodenkörper möglichst wassergesättigt sein, mindestens aber Feldkapazität erreicht haben.

Daneben spielt die Befahrbarkeit der Testfelder eine Rolle. Diese ist nur solange gegeben, wie der Aufwuchs zwischen den Fahrrienen nicht zu einer Behinderung des Messschlittens führt. Die Messanordnung ist in Abb. 26 dargestellt. Die Verortung der Signale erfolgt in Echtzeit über einen DGPS-Empfänger, der auf dem Schlitten montiert ist. Die Langwellenantenne des Korrekturdatenempfängers muss hierzu einen Mindestabstand von 50 cm zum EM-38 aufweisen, um Feldstörungen durch mögliche Interferenzen der Signale zu minimieren.



**Abb. 26:** Messanordnung für die Kartierung der elektrischen Leitfähigkeit (EM-38, ATB-Bornim e. V.)

---

<sup>16</sup> Die Durchführung der Messungen erfolgte durch Herrn Dr.-Ing. Horst Domsch, Inst. für Agrartechnik-Bornim e. V. (ATB), Potsdam.





## 5 Konzept zur Datenerfassung

### 5.1 Referenzdatenerhebung

Die in Kap. 4.1 bis 4.3 beschriebenen spektroradiometrischen und pflanzenbaulichen Erhebungen wurden in den Untersuchungsgebieten Neetzow und Imbshausen im Vegetationszeitraum 1999 und 2001 zu pflanzenbaulich relevanten Terminen durchgeführt (Abb. 27). Begleitend zu den Spektralmessungen wurden auf den Testschlägen die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Datenerhebungen durchgeführt.








Imbshausen				
April	Mai	Juni	Juli	August
				
EM-38 (09.04.2001)	ASD FieldSpec® (03.-24.05.2001)		IR-/Farbbefliegung (13.07.2001)	Ertragskartierung (12.08.2001)
Neetzow				
April	Mai	Juni	Juli	August
				
	HyMap® (06.05.1999)	ASD FieldSpec® / HyMap® (12.-20.06.1999)		Ertragskartierung (10.08.1999)

Abb. 27: Spektroradiometrische und pflanzenbauliche Erhebungen in den Untersuchungsgebieten

#### 5.1.1 Verfahren der Probenahme

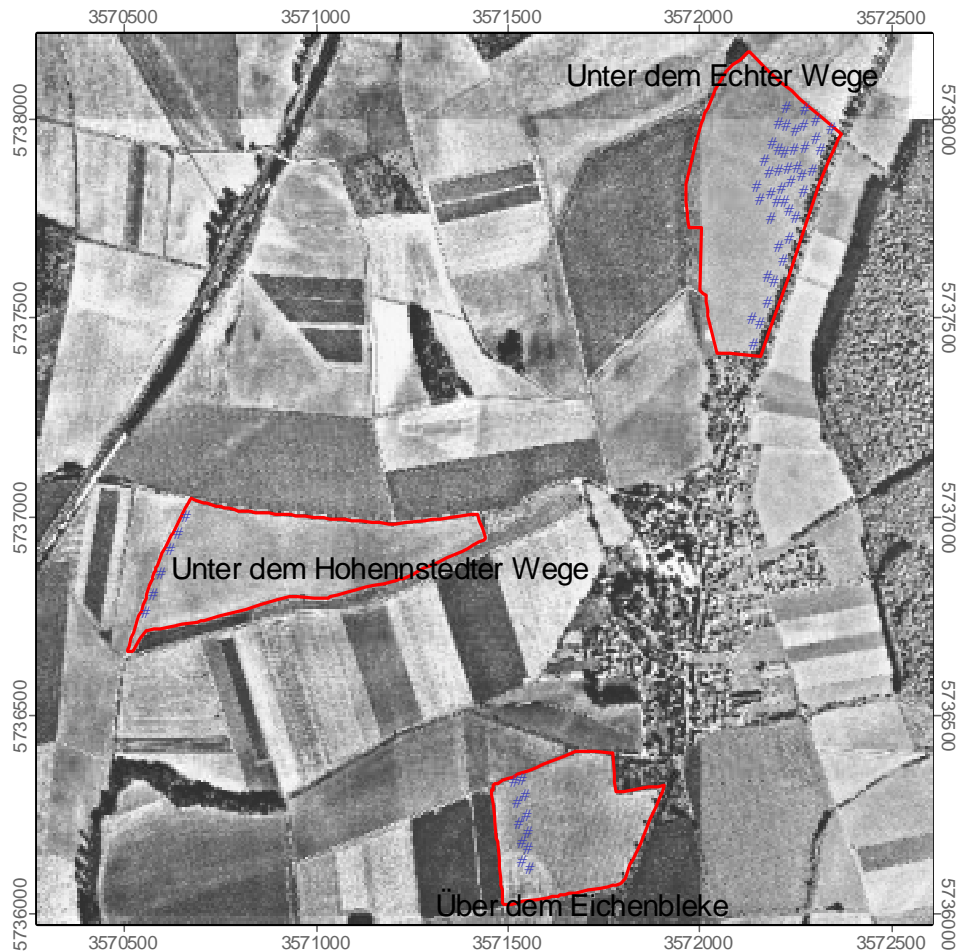
Die Planungen zur Probenahme basieren auf der Tatsache, dass die beabsichtigten punktuellen Datenerhebungen immer nur in einem beschränkten Maße die Variabilität der gesamten untersuchten Testareale beschreiben können. Eine komplette Erhebung eines Testgebietes in der gewünschten Zielauflösung (z. B. gewünschte Auflösung eines Ertragskartierungssystems) ist bei der Referenzdatenerhebung in der Regel nicht durchführbar (SADLER et al. 1998).

Aus diesem Grunde ist bei der Planung von Feldarbeiten vorab eine Einteilung der ausgewählten Testflächen in Teilflächen notwendig, welche möglichst einen homogenen Ausschnitt der Gesamtfläche repräsentieren. Die Festlegung des Musters für die Stichprobenerhebung innerhalb einer solchen Teilfläche sollte hierbei nach einem vorab festgelegten Verfahren erfolgen. Die Auswahl des geeigneten Verfahrens richtet sich in der Praxis vor allem nach dem minimal notwendigen Stichprobenumfang und der für die Erhebungen zur Verfügung stehenden Zeit.

Die Verteilung der durchgeführten Felderhebungen stellt einen Kompromiss zwischen verschiedenen Sampling-Strategien dar. Nach Abwägung der Zielsetzung mit den effektiv vorhandenen Möglichkeiten zur Referenzdatenerhebung erschien es sinnvoll, eine Kombination von zufälliger Verteilung der Probepunkte mit *a priori*-Wissen über die Heterogenität der Schläge anzuwenden. Das Ziel der Vorüberlegungen zur Probenahme ist die Erhebung von Stichproben, welche für die jeweilige Gesamtfläche ein möglichst breites Spektrum der zu erwartenden Messwertvariabilität abdecken. Für die Testschläge im

Untersuchungsgebiet Imbshausen erfolgte deshalb unter Berücksichtigung der zu erwartenden engen Zeitfenster während der Beprobung (Strahlungswetterlage, Sonnenstand, etc. siehe Kap. 5.1.4) zunächst eine Probenahme entlang von Transekten, welche sich an vorhandenen raumbezogenen Informationen orientierten. Zur Verfügung standen hierzu neben den Angaben aus der DGK5-Bo (Reichsbodenschätzung) die in Kap. 4.3.2 beschriebenen Messungen der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens sowie Orthophotos des Landesvermessungsamtes, Niedersachsen (LGN). Im Untersuchungsgebiet "Neetzow" standen zum Zeitpunkt der Beprobungen keine Informationen zur Teilschlagvariabilität zur Verfügung. Die Beprobung erfolgte ebenfalls entlang von Transekten.

Der Abstand der Stichprobenpunkte beträgt 50 m (UG "Imbshausen") bzw. 100 m (UG "Neetzow"), wobei die Probenahmen und Messungen immer in ca. 1 m Vertikalabstand zu den Fahrspuren im Bestand erfolgten. Für den Schlag "Unter dem Echter Wege" (Imbshausen) wurde zusätzlich ein Raster über einen ca. 6 ha großen Teilbereich des Gesamtschlages beprobt. Das Raster ergibt sich aus dem Stichprobenabstand von 50 m und dem Fahrspurabstand von 21 m (Abb. 28).



**Abb. 28:** Stichprobenverteilung im Testgebiet Imbshausen

### 5.1.2 Pflanzenparameter

Die Auswahl der zu erhebenden Pflanzenparameter richtete sich aus pflanzenbaulicher Sicht nach deren Anteil an der Bruttozusammensetzung höherer Pflanzen (vgl. Kap. 3.2.2) und aus fernerkundlicher Sichtweise nach den theoretischen Möglichkeiten der Ermittlung dieser Bestandteile aus spektraler Information im Bereich der solaren Reflexion (vgl. CIHLAR et al. 1987) (vgl. Kap. 2.2).

#### Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- ⇒ Bestimmung des Entwicklungsstadiums nach der EC-Skala (nach ZADOKS et al. 1974)
- ⇒ Bestimmung der Trockenmasse (Biomasse) durch Ernten der oberirdischen Pflanzenteile (gesamter Spross ab 5 cm über dem Boden) innerhalb eines Schätzrahmens von 0,5x0,5 m und anschließender Trocknung bis zur Gewichtskonstanz bei 45°C im Trockenschrank
- ⇒ Bestimmung des Pflanzenwassergehalts und der Trockenmasse durch Wiegen direkt nach der Feldentnahme und erneuter Wägung nach dem Trocknen bis zur Gewichtskonstanz
- ⇒ Bedeckungsgrad / Schatten (Senkrechtaufnahmen mit Digitalkamera mit vergleichbarem Blickfeld zu den ASD FieldSpec<sup>®</sup>-Aufnahmen, d.h., Aufnahme senkrecht ca. 50 cm über Pflanzenbestand, Öffnungswinkel 25° entspricht Brennweite  $f \cong 80$  mm)
- ⇒ **Laboranalysen:**
  - Elementaranalyse (CHN-Analysator 1000 Fa. Leco) zur Bestimmung des Humus- und Stickstoffgehalts (C, N, C/N)
  - HNO<sub>3</sub>-Druckaufschluss des Pflanzenmaterials, dann
  - Multi-Elementanalyse mit OES-ICP (Optima 4300 DV, Fa. Perkin Elmer) zur Bestimmung der Nährstoffanteile (P, K, Ca, Na, Mg, S, Cu, Zn),

Die Referenzdatenerhebungen wurden begleitend zu den spektroradiometrischen Messungen bzw. Befliegungen zu den in Tab. 11 aufgelisteten Terminen durchgeführt.

Die deskriptiv statistischen Merkmale der erhobenen Pflanzendaten gehen aus den folgenden Tabellen hervor. Die relativen Konzentrationsangaben [% bzw. mg/kg] beziehen sich jeweils auf die gesamte Trockenmasse. Für die nasschemischen Analysen konnten im Labor jeweils 3 Parallelmessungen durchgeführt werden, deren lineare Korrelationen jeweils ein hohes Bestimmtheitsmaß aufweisen ( $r^2 > 0,95$ , entspricht einem Signifikanzniveau von 99,9 %).

Die Laborergebnisse wurden vor der anschließenden Weiterverarbeitung einer Plausibilitätskontrolle unterzogen, die nach Ausreißern in den Werteverteilungen sucht. Die Kontrolle führte für die ICP-Nährelementanalysen der Proben aus dem Untersuchungsgebiet Imbshausen zum Ausschluss von fünf Proben. Zusätzlich konnten von der zweiten Kampagne vier Lösungen nicht aufgeschlossen werden. Dies schlägt sich entsprechend in der Anzahl der Stichproben in Tab. 12 nieder.

**Tab. 11: Referenzdatenerhebung (Pflanze) während der Feldkampagnen**

	Imbshausen_I (IH1) 03. – 11.05.2001	Imbshausen_II (IH2) 24.05.2001	Neetzow_I (NE1) 05./06.05.1999	Neetzow_II (NE2) 12. – 20.06.1999
<b>EC-Stadium</b>	<b>30/32</b>	<b>39/41</b>	<b>30/31</b>	<b>55/59</b>
<b>C/N-Analyse</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Nährelemente</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Wassergehalt</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		
<b>Biomasse</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		

Die spektroradiometrischen Aufnahmen im Untersuchungsgebiet Imbshausen wurden zu zwei pflanzenphysiologisch und pflanzenbaulich prägnanten Zeitpunkten aufgenommen. Während der ersten Feldkampagne Anfang Mai befand sich der Winterweizen am Beginn des Schossens, d.h., die Bestockung war abgeschlossen und die Haupt- und Nebentriebe richteten sich stark auf. Die zweite Messkampagne fand Ende Mai statt, gegen Ende des Schossens, d.h., das Blatthütchen (Ligula) des letzten Blattes (Fahnenblatt) war vollständig entwickelt und die Blattscheide stark geschwollen. Diese beiden Termine gehen in der Regel mit Düngemaßnahmen einher, da sich die Pflanze zu diesen Zeitpunkten inmitten der vegetativen Phase bzw. am Übergang zu der generativen Phase befindet, was mit einem stark erhöhten Nährstoffbedarf verbunden ist.

**Tab. 12: Deskriptive Statistik der erhobenen Pflanzendaten (Imbshausen)**

		gültige Fälle ( <i>n</i> )	Mittelwert	rel. Variationskoeffizient (%)	Min.	Max.	Spannweite
dm [g/m <sup>2</sup> ]	IH1	58	290.01	25.36	145.82	497.41	351.59
	IH2	16	761.33	7.90	646.43	881.66	235.22
H <sub>2</sub> O [%]	IH1	58	84.76	1.17	82.12	86.83	4.71
	IH2	16	79.90	1.70	77.10	82.50	5.40
N <sub>tot</sub> [%]	IH1	58	3.93	10.54	3.08	4.77	1.69
	IH2	16	2.16	6.68	1.87	2.37	0.50
P <sub>tot</sub> [%]	IH1	53	0.53	9.05	0.43	0.66	0.23
	IH2	12	0.33	9.56	0.28	0.38	0.10
K <sub>tot</sub> [%]	IH1	53	4.42	6.93	3.69	5.02	1.34
	IH2	12	2.79	6.44	2.46	3.07	0.61
Mg <sub>tot</sub> [%]	IH1	53	0.12	7.69	0.10	0.14	0.04
	IH2	12	0.09	10.33	0.08	0.11	0.03
Ca <sub>tot</sub> [%]	IH1	53	0.50	10.54	0.41	0.61	0.20
	IH2	12	0.37	15.63	0.32	0.54	0.22
S <sub>tot</sub> [%]	IH1	53	0.52	8.75	0.43	0.61	0.18
	IH2	12	0.33	8.97	0.28	0.40	0.12
Fe <sub>tot</sub> [mg/kg]	IH1	53	192.80	103.63	13.38	899.17	885.78
	IH2	12	95.83	49.56	53.74	233.44	179.70
Mn <sub>tot</sub> [mg/kg]	IH1	53	58.95	22.31	36.69	97.65	60.96
	IH2	12	42.30	25.74	33.02	72.61	39.59
Zn <sub>tot</sub> [mg/kg]	IH1	53	27.94	47.66	0.00	85.78	85.78
	IH2	12	19.42	20.48	14.30	26.51	12.22
Cu <sub>tot</sub> [mg/kg]	IH1	53	4.92	25.66	0.74	9.17	8.43
	IH2	12	5.67	41.30	2.76	11.02	8.26
Na <sub>tot</sub> [mg/kg]	IH1	53	39.31	69.43	0.00	107.26	107.26
	IH2	12	34.79	13.59	27.04	40.26	13.22

**Tab. 13: Deskriptive Statistik der erhobenen Pflanzendaten (Neetzow)**

		gültige Fälle ( <i>n</i> )	Mittelwert	rel. Variationskoeffizient (%)	Min.	Max.	Spannweite
H <sub>2</sub> O [%]	NE1	26	80.50	3.48	74.58	84.96	10.38
	NE2	22	78.75	3.57	74.40	87.61	13.21
N <sub>tot</sub> [%]	NE1	26	3.67	15.67	2.61	5.00	2.39
	NE2	22	2.46	3.08	2.26	2.61	0.35
P <sub>tot</sub> [%]	NE1	26	0.413	13.50	0.313	0.510	0.197
	NE2	22	0.379	6.33	0.335	0.440	0.105
K <sub>tot</sub> [%]	NE1	26	2.646	18.45	1.760	3.513	1.753
	NE2	22	1.361	13.32	1.045	1.675	0.630
Ca <sub>tot</sub> [%]	NE1	26	0.279	24.03	0.173	0.413	0.240
	NE2	22	0.210	20.30	0.135	0.280	0.145
S <sub>tot</sub> [%]	NE1	26	0.374	20.16	0.207	0.553	0.347
	NE2	22	0.234	13.05	0.190	0.285	0.095
Mg <sub>tot</sub> [%]	NE1	26	0.380	27.09	0.233	0.553	0.320
	NE2	22	0.036	32.34	0.015	0.060	0.045
Na <sub>tot</sub> [mg/kg]	NE1	26	117	19.05	83	163	80
	NE2	22	73	22.45	35	95	60

Im Untersuchungsgebiet Neetzow fand die erste Kampagne ebenfalls zu Beginn des Schossens statt. Die zweite Periode der Felderhebungen konnte aufgrund der Befliegungsplanung und der Witterungsbedingungen erst Mitte Juni durchgeführt werden. Zu diesem Zeitpunkt befanden sich die Weizenbestände bereits im Stadium des Ährenschiebens. Dieser Zeitpunkt ist zwar für die pflanzenphysiologische Betrachtung der spektroskopischen Aufnahmen von Interesse, die Maßnahmen der Bestandsführung sind aber, abgesehen von einer eventuellen Spätdüngung und ggfs. Pflanzenschutzmaßnahmen, in der Regel abgeschlossen.

Die Mittelwerte der analysierten Pflanzennährelemente liegen in den meisten Fällen im Bereich der ausreichenden Versorgung von Getreidepflanzen für das jeweilige Wachstumsstadium<sup>17</sup>. Die Bestände der Testschläge in Neetzow weisen zu Beginn des Schossens Kalium- und Magnesiummangel auf, die Extremwerte der Mineralelementgehalte liegen auch bei den übrigen Elementen teilweise im toxischen bzw. im unterversorgten Bereich. Die Nährelement-Konzentrationen der Testschläge in Imbshausen liegen größtenteils im ausreichenden bis optimalen Wertebereich. Die relativ niedrigen N-Konzentrationen der IH2-Proben sind bedingt durch die verzögerte 3. N-Gabe (29.05.).

### 5.1.3 Bodenparameter

Für die Untersuchungsgebiete liegen jeweils digitale Bodenarten-Kartierungen auf Basis der DGK5 Reichsbodenschätzung vor (siehe Abb. 16 und Abb. 17 in Kap. 3.1). Diese geben trotz mangelnder Lagegenauigkeit und Fortführungsstand einen Überblick über die dominierenden Bodenverhältnisse auf den Testschlägen.

Die zusätzlich erhobenen bodenphysikalischen Parameter (Bodenfeuchte, pH-Wert) dienen der Zustandsbeschreibung des Bodens im Hinblick auf die Möglichkeiten der Nährstoffumsetzung im System Pflanze-Boden. Daneben liegen die Resultate der nasschemischen Analysen zum Nährelementgehalt vor.

Die Arbeiten erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit bezüglich der Erfassung von pflanzenbaulich relevanten Bodenmerkmalen. Sie liefern wertvolle Kenngrößen bzw. Indizien für eine mögliche Störung des Nährstoffumsatzes im Wurzelbereich und damit für evtl. auftretende Mangelsymptome in der Pflanze. Des weiteren sollen die erfassten Bodenparameter als Standortfaktoren in die Modellierung von Düngemaßnahmen aus spektroradiometrischen Messungen eingehen.

#### Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- ⇒ volumetrische Bodenfeuchte (0-15 cm) mit TDR-Sonde (time domain reflectivity)
- ⇒ gravimetrische Bodenfeuchte (0-30 cm) mit Pürkhauermischprobe, durch Trocknung bis zur Gewichtskonstanz im Trockenschrank bei 105°C
- ⇒ **Laboranalysen:**
  - Elementaranalyse (CHN-Analysator 1000 Fa. Leco) zur Bestimmung des Humus- und Stickstoffgehalts (C, N, C/N)
  - Ammoniumchlorid-Extraktion zur Bestimmung der effektiven KAK, dann
  - Elementaranalyse mit OES-ICP (Optima 4300 DV, Fa. Perkin Elmer) zur Bestimmung der pflanzenverfügbaren Hauptnährstoffanteile aus der Aufschlusslösung (K, Ca, Na, Mg)
  - pH-Wert-Bestimmung nach VDLUFA A.5.1.1

---

<sup>17</sup> Für Vergleichswerte der ausreichenden Nährelementversorgung von Getreidepflanzen siehe z. B. BERGMANN 1993.

**Tab. 14: Deskriptive Statistik der erhobenen Bodendaten (Imbshausen\_I)**

	<b>gültige Fälle (n)</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>rel. Variationskoeffizient (%)</b>	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>	<b>Spannweite</b>
<b>H<sub>2</sub>O [vol. %]</b>	21	20.62	10.84	16.73	26.48	9.76
<b>N [%]</b>	39	0.09	12.00	0.07	0.12	0.05
<b>C<sub>org</sub> [%]</b>	39	1.04	14.05	0.66	1.34	0.68
<b>C/N</b>	39	11.02	6.87	9.43	12.81	3.38
<b>K<sub>AK</sub>[mmol/100g]</b>	39	5.17	50.44	1.98	17.17	15.19
<b>Ca<sub>AK</sub>[mmol/100g]</b>	39	123.98	32.25	79.01	314.34	235.32
<b>Na<sub>AK</sub>[mmol/100g]</b>	39	0.84	62.97	0.17	2.84	2.66
<b>Mg<sub>AK</sub>[mmol/100g]</b>	39	6.06	27.58	3.46	12.43	8.97
<b>Al<sub>AK</sub>[mmol/100g]</b>	39	0.05	84.26	0.00	0.18	0.18
<b>Fe<sub>AK</sub>[mmol/100g]</b>	39	0.01	145.59	0.00	0.08	0.08
<b>Mn<sub>AK</sub>[mmol/100g]</b>	39	3.16	22.91	1.67	4.79	3.13

### 5.1.4 Sonstige Standortparameter

#### Klima

Zur Erfassung der Witterungsbedingungen vor und während der spektroradiometrischen Untersuchungen wurde im Untersuchungsgebiet Imbshausen eine Wetterstation mit integriertem Datenlogger errichtet. Folgende Klimaparameter werden fortlaufend erfasst:

- ✓ Luftfeuchte
- ✓ Lufttemperatur
- ✓ Niederschlag [mm]
- ✓ Windrichtung
- ✓ Windgeschwindigkeit
- ✓ Globalstrahlung

Die Messwerterfassung erfolgt im Mittelwertmodus alle vier Minuten.



Abb. 29: Aufbau der Klimaloggerstation im Untersuchungsgebiet Imbshausen

Die Kenntnis der Witterungsbedingungen ist für die spektroradiometrischen Aufnahmen von essentieller Bedeutung. Im Falle der Aufnahmekonstellation mit dem ASD FieldSpec® Pro Feldspektrometer (vgl. Kap. 5.2.2) sind Messungen der relativen solaren Reflexion im Gelände nur durchführbar, wenn sich die Umgebungsbedingungen nicht, oder nur unwesentlich ändern. Optimale Aufnahmebedingungen für spektroradiometrische Aufnahmen liegen im Allgemeinen bei einer Strahlungswetterlage vor. Ein Strahlungstag ist gekennzeichnet durch geringe bis keine Bewölkung, horizontaler Sichtweite von mind. 25 km und damit weitgehend ungehinderter solarer Einstrahlung. Die Spektral-Messungen konnten sowohl in Imbshausen als auch in Neetzow zu den genannten Terminen unter nahezu optimalen Aufnahmebedingungen durchgeführt werden.

Zwischen den drei Terminen der *in situ* Spektralmessungen gab es jeweils einen Temperaturrückgang begleitet von Regenfällen, die jedoch nicht unmittelbar vor dem jeweiligen Aufnahmetag lagen (siehe Abb. 30).

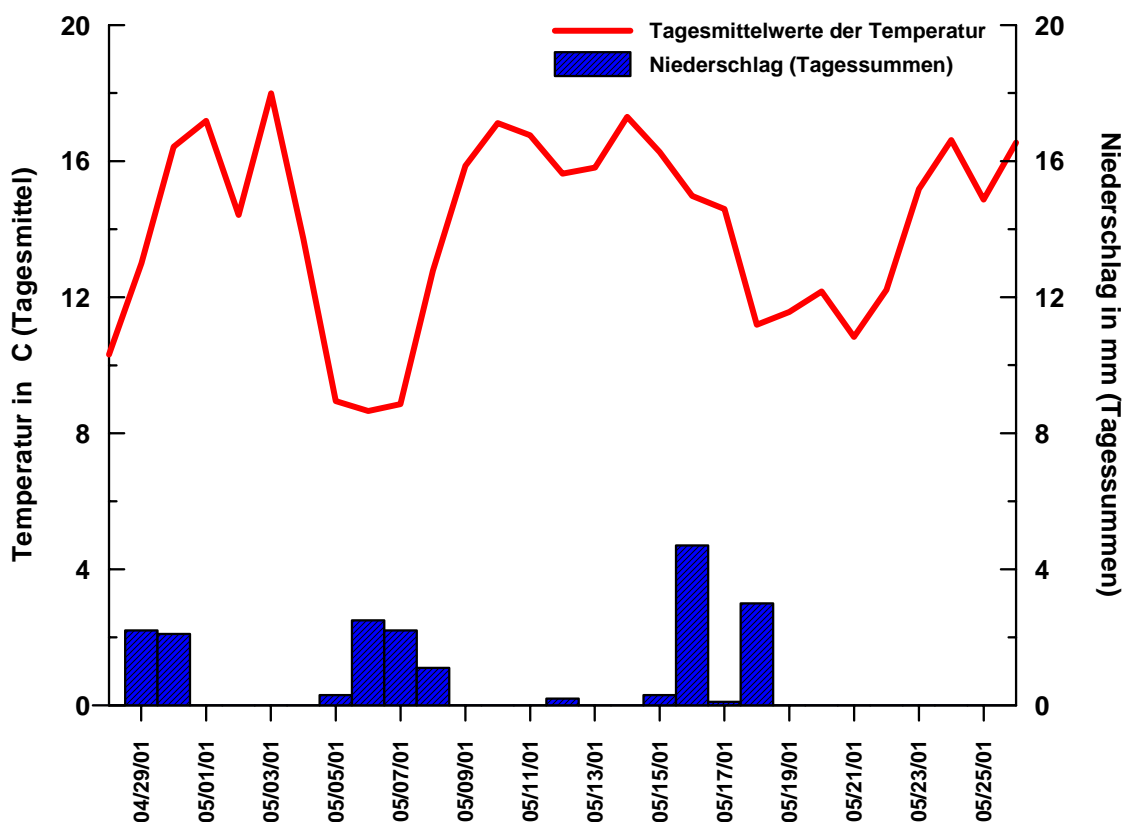
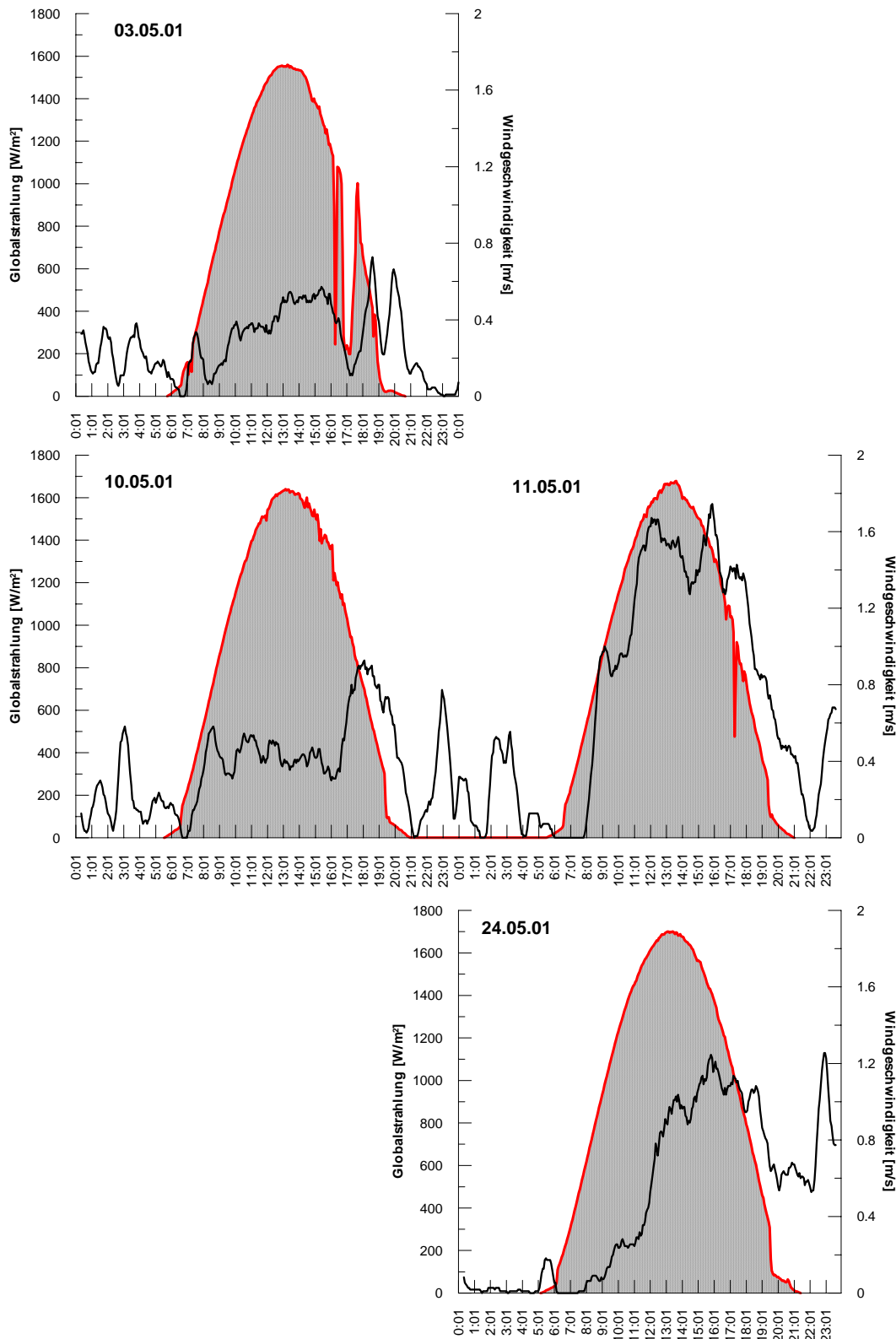


Abb. 30: Witterungsverlauf im Untersuchungsgebiet Imbshausen für den Erhebungszeitraum 2001 (Niederschlag: Summe 0-24 Uhr, Temperatur: Mittelwert 0-24 Uhr)

Die für die spektroradiometrischen Feldmessungen kritischen Witterungsparameter Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit sind in Abb. 31 gegeneinander abgetragen. Während der Aufnahmetage herrschte jeweils eine Strahlungswetterlage mit hohen, gleichmäßigen Strahlungsraten. Die Windgeschwindigkeit lag ständig unter 2 m/s, lediglich während der Aufnahmen am 11.05.2001 frischte der Wind zeitweise leicht auf, was allerdings nicht zu Turbulenzen in den Winterweizenbeständen führte. Die Bestandsgeometrie ist somit über den gesamten Aufnahmezeitraum als konstant anzunehmen.





**Abb. 31:** Witterungsparameter Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit während der ASD FieldSpec® Messungen im Untersuchungsgebiet Imbshausen

Neben ihrer Bedeutung für die Spektralmessungen hat die Witterung einen entscheidenden Einfluss auf das System Pflanze-Boden und damit auf die phänologische Entwicklung der Kulturpflanzenbestände. Sie darf daher, ebenso wie das Relief, bei einer Modellierung von Verfahrensabläufen im Teilschlagmanagement nicht außer Acht gelassen werden.

## Relief

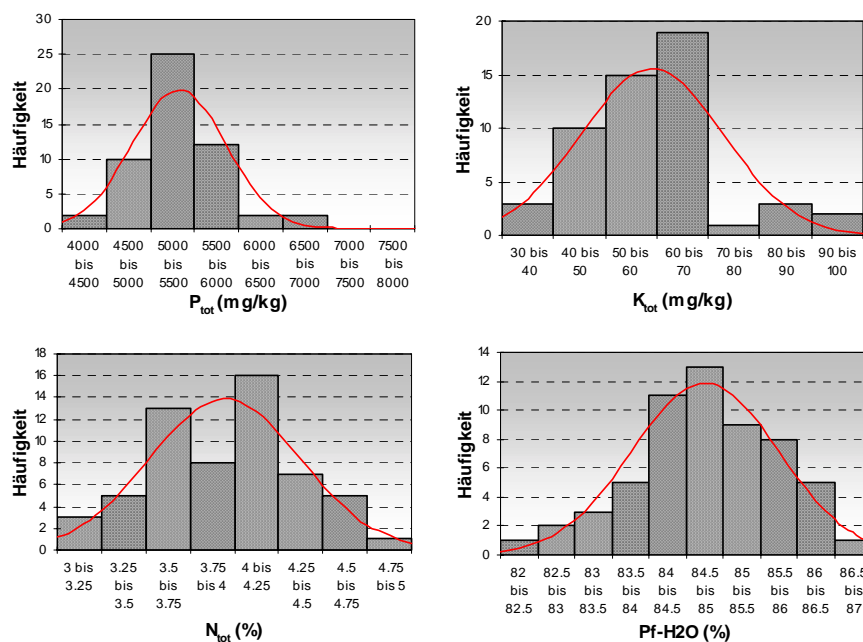
Für das UG "Imbshausen" liegen digitale Höhendaten mit einer Rasterweite von 12,5 m vor (©LGN, Hannover). Aus diesen Höhendaten wurden die wichtigsten Reliefparameter abgeleitet, die einen Einfluss auf die räumliche Variabilität der Messwerte haben können, und somit für eine spätere Modellbildung zur Applikationskartenerstellung (Kap. 7) von Interesse sind. Dies sind im einzelnen:

- ✓ Neigung
- ✓ Exposition
- ✓ Vertikalkrümmung
- ✓ Horizontalkrümmung

### 5.1.5 Beurteilung der Referenzdaten

#### Interkorrelationen der Pflanzen- und Bodenmerkmale

Die Voraussetzung für die statistische Analyse der Referenzdaten sowie für die multivariate Auswertung unter Einbeziehung der Spektraldaten ist eine Häufigkeitsverteilung der Messwerte, die der Form einer Gaußschen Normalverteilung angenähert ist. Das Kriterium der Normalverteilung ist für die Bestandsparameter bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha=0,05$  (Signifikanzniveau 95 % einseitig) gegeben (Abb. 32).



**Abb. 32: Häufigkeitsverteilung ausgewählter Konzentrationen von Pflanzenproben (Datensatz: IH\_1, n=42)**

Die Interkorrelationen geben Aufschluss über das Wirkungsgefüge zwischen Nährelementgehalten und den ertragsbildenden Prozessen der Pflanze.

Die in der Pflanze enthaltenen Komponentenkonzentrationen weisen zum Teil signifikante Korrelationen untereinander auf (Tab. 15). Abgesehen von den hohen Korrelationskoeffizienten der Beziehungen zwischen den Makronährelementen N, P, K und S lassen sich aus den dargestellten Zusammenhängen keine Regelmäßigkeiten ableiten.

Die erhobenen Komponentenkonzentrationen der Bodenproben weisen größtenteils keine signifikanten Zusammenhänge untereinander auf (Tab. 16).

**Tab. 15: Interkorrelationen (Korrelationskoeffizient  $r$  nach PEARSON) ausgewählter Pflanzenparameter (Datensatz: IH\_I)**

n=35	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	N	dm	H <sub>2</sub> O
Ca	1.00										
Fe	0.05	1.00									
K	0.14	-0.09	1.00								
Mg	<b>0.45*</b>	0.16	0.15	1.00							
Mn	0.31	0.21	0.28	<b>0.51</b>	1.00						
Na	0.07	<b>0.59</b>	-0.04	0.15	-0.14	1.00					
P	0.27	-0.03	<b>0.55</b>	0.09	0.30	-0.13	1.00				
S	0.41	-0.09	<b>0.71</b>	<b>0.48</b>	0.37	-0.14	<b>0.52</b>	1.00			
N	0.35	-0.16	-0.06	<b>0.45</b>	-0.04	-0.19	0.06	<b>0.44</b>	1.00		
dm	-0.06	0.35	<b>-0.43</b>	-0.33	-0.21	0.36	-0.11	<b>-0.64</b>	-0.35	1.00	
H <sub>2</sub> O	0.20	-0.13	<b>0.68</b>	0.19	0.38	-0.24	0.38	<b>0.66</b>	-0.06	<b>-0.44</b>	1.00

\* Korrelation ist auf dem Niveau von 99 % (zweiseitig) statistisch signifikant

**Tab. 16: Interkorrelationen (Korrelationskoeffizient  $r$  nach PEARSON) ausgewählter Bodenparameter (Datensatz: IH\_I)**

n=40	N	H <sub>2</sub> O	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na
N	1								
H <sub>2</sub> O	0.22	1							
Al	0.20	0.32	1						
Ca	0.21	-0.31	-0.24	1					
Fe	0.28	0.36	<b>0.85</b>	-0.10	1				
K	0.07	0.17	0.08	0.07	0.22	1			
Mg	-0.12	<b>-0.49</b>	-0.13	0.16	-0.15	0.09	1		
Mn	<b>0.43*</b>	0.21	0.38	-0.37	0.38	0.01	0.05	1	
Na	0.31	0.03	0.13	-0.03	0.23	0.06	0.20	<b>0.45</b>	1

\* Korrelation ist auf dem Niveau von 99 % (zweiseitig) statistisch signifikant

### Korrelationen zwischen Pflanzen- und Bodenmerkmalen

Die für die Modellierung der pflanzenverfügbaren Nährstoffe interessanten Zusammenhänge zwischen Boden- und Pflanzennährelementen sind in Tab. 17 dargestellt. Nur für den Mg- und den Wassergehalt bestehen eindeutige Beziehungen zwischen der Konzentration in der Pflanze und dem Vorkommen im Boden. Daneben sind eine Reihe von Kovarianzen zu beobachten, deren Ursache und Bedeutung nicht nachvollziehbar ist.

Insgesamt können die überwiegend schlechten Korrelationen zwischen Boden und Pflanzennährelementkonzentrationen auf die verschiedenen Extraktionsverfahren zu deren Bestimmung zurückgeführt werden.

**Tab. 17: Kovarianzmatrix ausgewählter Boden- und Pflanzenparameter (Datensatz: IH\_I, n=40)**

Boden	Pflanze							
	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	N	H <sub>2</sub> O
Ca	0.18	0.15	-0.22	0.10	0.18	0.19	0.09	-0.27
Fe	0.01	0.07	-0.02	-0.28	0.00	-0.11	0.20	0.17
K	0.15	0.18	-0.08	0.02	0.07	-0.21	0.25	0.11
Mg	0.23	-0.06	-0.35	<b>0.46*</b>	0.13	-0.07	0.39	<b>-0.41</b>
Mn	-0.10	-0.08	0.23	-0.05	-0.05	-0.28	<b>0.43</b>	0.28
Na	-0.07	-0.26	0.21	0.20	0.18	-0.22	0.22	0.35
N	0.16	0.09	0.31	0.18	0.34	-0.15	0.29	<b>0.47</b>
H <sub>2</sub> O	-0.04	0.00	0.12	-0.04	<b>-0.43</b>	-0.09	<b>0.56</b>	<b>0.43</b>

\* Korrelation ist auf dem Niveau von 99 % (zweiseitig) statistisch signifikant

## 5.2 Spektroradiometrische Messungen

Die folgenden Ausführungen beziehen sich ausschließlich auf die Aufnahme nicht-abbildender spektroradiometrischer Messungen mit dem ASD FieldSpec® Pro. Diese bilden die Grundlage für sämtliche weitere Arbeitsschritte, weshalb ausführlich auf den Versuchsaufbau und den Prozess der Datenverarbeitung eingegangen wird.

### 5.2.1 Vorüberlegungen zur Reflexionsmessung

Die Theorie spektraler Reflexionsmessungen wurde bereits ausführlich in Kap. 2.1.2 erläutert. Reflexionsmessungen sind immer relative Messungen und erfordern einen Referenzstandard, gegen den die Objektmessung verrechnet werden kann. Bei den mit dem ASD FieldSpec® durchgeführten Messungen wird die gerichtete spektrale reflektierte Strahldichte  $\Delta L(\theta_r, \varphi_r)$  eines Oberflächenausschnitts erfasst und zur Reflexion einer Referenzfläche (Spectralon®, vgl. Kap. 4.1.2.1) in die Richtung  $\theta_r, \varphi_r$  ins Verhältnis gesetzt. Das Resultat ist der **spektrale Reflexionsfaktor  $R_\lambda$** .

Die spektroradiometrischen Messungen mit dem ASD FieldSpec® wurden sowohl unter natürlichen Bedingungen im Gelände (*in situ*) als auch im Labor durchgeführt. Hierbei wurde jeweils der spektrale Reflexionsfaktor  $R_\lambda$  gemessen. Die Messungen des spektralen Reflexionsfaktors sind nur aussagekräftig, wenn bei Ihrer Durchführung eine Reihe von Restriktionen beachtet werden. Vor allem die Feldmessungen sind neben den geometrischen Parametern des Messaufbaus von zahlreichen äußeren Eigenschaften beeinflusst. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über die bei der Messung der spektralen Reflexion einzuhaltenden Grundannahmen bzw. Einschränkungen.

#### Grundannahmen / Einschränkungen für Reflexionsmessungen (allgemein):

- ⇒ Der Öffnungswinkel der Optik (FOV, Sichtfeld) sollte möglichst klein sein, um bidirektionale Effekte zu minimieren (FOV max. 25°).
- ⇒ Der Reflexionsstandard muss das Sichtfeld des Sensors ausfüllen.
- ⇒ Die Reflexionseigenschaften des Reflexionsstandards sind bekannt und ändern sich nicht während der Messkampagne (vgl. Kap. 4.1.2.1).
- ⇒ Es treten keine Änderungen der Bestrahlungsstärke  $E$  zwischen der Messung von  $\Delta L_t$  und  $\Delta L_r$  auf.
- ⇒ Es treten keine Änderungen der Aufnahmegeometrie (Beleuchtungsquelle und Sensor) zwischen der Referenz- und der Objektmessung auf.
- ⇒ Die Aufnahmegeometrie ist über den Zeitraum der Messkampagne konstant bzw. die Geometrieparameter sind bekannt.
- ⇒ Das Sensorsignal verhält sich zu Änderungen der am Sensor ankommenden Strahldichte linear.

#### Grundannahmen / Einschränkungen für Reflexionsmessungen (Feldmessungen):

- ⇒ Direkte Sonneneinstrahlung dominiert die Strahlungsumgebung (Idealfall: Sonne scheint aus einem schwarzen Himmel, kein diffuses Himmelslicht).
- ⇒ Die Zeitdifferenz  $\Delta t$  zwischen der Referenz- und der Objektmessung muss minimiert werden,
  - um den Einfluss möglicher Änderungen der atmosphärischen Zusammensetzung zu minimieren.
  - damit die Aufnahmegeometrie zwischen beiden Messungen konstant ist.
- ⇒ Die Zeitdifferenz  $\Delta t$  zwischen zwei Feldmessungen muss minimiert werden, um den Einfluss der Aufnahmegeometrie auf das Messsignal zu minimieren.

Aus diesen Vorgaben resultiert der Messaufbau für die Feld- und Labormessungen, wie er im Folgenden skizziert wird.

## 5.2.2 Messaufbau für die Reflexionsmessungen

### 5.2.2.1 Allgemeine Aufnahmeconfiguration

Die allgemeine Aufnahmeconfiguration muss die Vorgaben, die durch das Sichtfeld des Sensors (FOV) und die Größe der Referenzfläche des Reflexionsstandards gegeben sind, berücksichtigen.

Das Sichtfeld ist als der Raumwinkel, durch den Strahlung aus einer bestimmten Richtung am Sensor registriert werden kann, definiert (nähere Erläuterungen siehe ROBINSON & DE WITT 1983, SCHAEPMAN 1998). Für das ASD FieldSpec Pro wird der Öffnungswinkel des Sichtfelds in der Standardconfiguration mit  $25^\circ$  angegeben (ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES Inc. 1999). Die Spectralon<sup>®</sup>-Referenzfläche hat eine Kantenlänge des sichtbaren Felds von 25,4 cm (10"). Aus dieser Konstellation ergibt sich – unter der Bedingung, dass die Aufnahmegeometrie zwischen Referenz- und Objektmessung identisch ist – die maximale Höhe des Sensors über dem zu betrachtenden Objekt (Messhöhe) aus Abb. 33 und Gl. 15 zu 54 cm. Die Maximal aufzunehmende Fläche beträgt gemäß Gl. 16 ca.  $500 \text{ cm}^2$ .

$$\tan \theta_f = 2 \frac{r_o}{h_M} \quad \text{Gl. 15}$$

$$F_o = \pi * \frac{\tan^2(\theta_f) \times h^2}{4} \quad \text{Gl. 16}$$

mit

- $\theta_f$  : Öffnungswinkel des Sichtfelds
- $r_o$  : Radius der Objektfläche
- $h_M$  : Aufnahmehöhe über dem Objekt (Messhöhe)
- $F_o$  : Fläche des Objektausschnitts

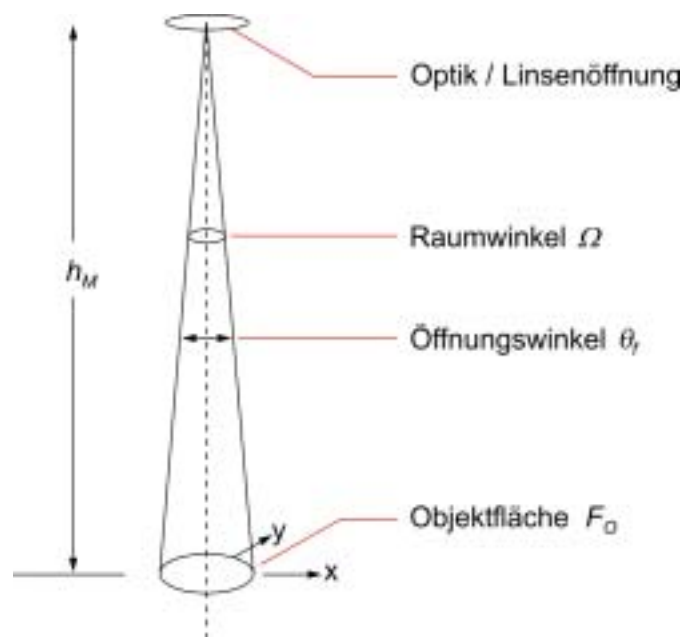


Abb. 33: Geometrische Konstellation des Sichtfelds für das ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro (Standardconfiguration mit FOV=25°)

### 5.2.2.2 *in situ* Messungen

Die *in situ* Messungen wurden, unter Berücksichtigung der Vorgaben aus Kap. 5.2.1, an Aufnahmetagen mit Strahlungswetterlage (vgl. Kap. 5.1.4) durchgeführt. Die geringsten Einstrahlungsveränderungen treten gewöhnlich um den mittäglichen Sonnenhöchststand auf. Für die durchgeführten Feldmessungen wurde davon ausgegangen, dass ca. 2 ½ h vor und nach dem Sonnenhöchststand die Veränderungen der Einstrahlungsverhältnisse vernachlässigbar sind, was einen maximalen Messzeitraum von 5 h ermöglicht. Die untersuchten Getreidebestände sind in der Regel homogen mit vertikal gering gegliederter Oberfläche. Dies bedeutet, dass die bestandsgeometrischen Parameter, d.h. die Morphologie des Bestands, richtungsunabhängig ist.

Diese Annahme wird durch die Tatsache gestützt, dass eventuell vorhandene multiplikative Effekte der Bestandsreflexion bereits bei der Berechnung des Reflexionsfaktors  $R$  eliminiert werden. Die Effekte weiterer, den Reflexionsfaktor beeinflussende Oberflächen- und Aufnahmeparameter werden im Rahmen der Kalibrierung des Messsignals in Kap. 6.3 untersucht. Die Beschränkungen der Messhöhe und des Öffnungswinkels gehen bereits aus den vorherigen Erläuterungen zum allgemeinen Versuchsaufbau hervor. Die Referenzmessungen mit dem Spectralon<sup>®</sup>-Standard werden in der gleichen Messhöhe wie die Bestandsmessungen durchgeführt. Die absolute Höhe der Optik (Stativhöhe) ergibt sich aus der Bestandshöhe und der Messhöhe (Abb. 34). Um das Auftreten von Artefakten bei der Messung des Reflexionsstandards im Gelände zu vermeiden, wird die maximale Messhöhe auf 50 cm über dem Bestand beschränkt. Eine Feldmessung beinhaltet jeweils die Referenz- und die Objektmessung. Das Messintervall zwischen Referenz- und Objektmessung beträgt max. eine Minute. Die Zeitdifferenz zwischen den Feldmessungen ergibt sich aus dem maximalen Messzeitraum (s.o.).



Abb. 34: Messanordnung und Durchführung der *in situ* Messungen (ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro)

Die Sensorgeometrie ist über den gesamten Messzeitraum als konstant zu betrachten. Die Messoptik wird durch ein Libellenlot parallel zur Flächennormalen einer gedachten horizontalen Ebene (Sensorzenitwinkel  $\theta_r = 0^\circ$ ) ausgerichtet. Das Stativ sowie das Spektrometer (sowie die das Gerät bedienende Person) befinden sich jeweils in konstanter Exposition zur Messoptik, d.h. der Azimutwinkel der Gerätekomponenten zur Messoptik bleibt über den Messzeitraum gleich. Veränderungen des Messsignals, wie sie z. B. von SALISBURY (1998) durch unterschiedliche Orientierung des Geräts und des Benutzers beobachtet wurden, werden hierdurch minimiert bzw. konstant gehalten.

Die Gerätekonfiguration für die Feldmessungen muss berücksichtigen, dass es während der Messung durch äußere Einflüsse (z. B. Wind) oder systemspezifische Eigenschaften (SNR, vgl. Kap. 4.1.1), zu geringfügigen Änderungen der Bestandsgeometrie des aufzunehmenden Oberflächenausschnitts kommen kann, was wiederum zu Änderungen der spektralen Reflexionsfaktoren führen kann. Um die Auswirkungen dieser Effekte zu minimieren, werden die Feldmessungen im Intervallmodus durchgeführt, der aus einzelnen Parallelmessungen  $P_1$  bis  $P_n$  in einem bestimmten Zeitintervall  $\Delta t_n$  besteht. Eine Parallelmessung  $P$  setzt sich wiederum zusammen aus der Integration einer Anzahl von  $m$  Wiederholungsmessungen mit einem Minimalabstand von  $\Delta t_m = 0,1$  s.

Für die Feldmessungen wurde folgende Systemkonfiguration eingehalten:

- ✓ Integrationszeit:  $\Delta t_m = 0,1$  s
- ✓ Wiederholungen:  $m = 40$  (nach SALISBURY 1998)
- ✓ Intervalle:  $n = 4$  im Abstand von  $\Delta t_n = 10$  s

Daraus ergibt sich eine Gesamtdauer von 46 Sekunden je Messung. Der Prozess einer Feldmessung, bestehend aus den Wiederholungsmessungen jeweils für den Referenzstandard und den Bestandsausschnitt, beläuft sich insgesamt auf ca. 2 Minuten. Dieser geringe Zeitaufwand für eine Feldmessung kann als Nettozeit bei der Planung einer Geländeaufnahme herangezogen werden. In die Kalkulation maximal möglicher Stichprobenzahlen für die Feldaufnahme von spektrometrischen Messungen sind jedoch immer die folgenden Faktoren mit einzubeziehen:

- ⇒ Optimierung der Detektorbereiche
- ⇒ Dunkelstromkorrektur
- ⇒ Umsetzen des Geräts zwischen zwei Messungen
  - zurückzulegende Wegstrecke
  - Neuausrichten der Optik
  - Neuausrichten der Gerätekomponenten
- ⇒ Protokollführung
- ⇒ Aufwärmphase des Spektrometers
- ⇒ Wechseln des Spektrometer-Akkus
- ⇒ ggfs. Pausen bei Atmosphärenbeeinträchtigung

Die Zeit, die für das Umsetzen des Gerätes erforderlich ist, schwankt hierbei sehr stark, je nach Zielsetzung und den Entfernungen zwischen den Messpunkten. Im vorliegenden Fall wurde beim Umsetzen besonderer Wert auf die Einhaltung der Aufnahmegeometrie gelegt, weshalb sich die Bruttozeit für eine Feldmessung auf ca. 8 Minuten verlängerte. Unter diesen Umständen waren ca. 35 Feldmessungen je Geländetag möglich.

Diese Planung erwies sich jedoch in der Durchführung als nicht einhaltbar, da die Witterungsbedingungen über den Erhebungszeitraum lediglich am 09. und 10.05.01 Messungen über den maximalen Messzeitraum zuließen. Hinzu kam, dass die parallel durchzuführenden Felderhebungen von Referenzdaten einen hohen logistischen und



personellen Aufwand erforderten, so dass in der Regel pro Tag nicht mehr als 20 Bestandsausschnitte erfasst werden konnten (vgl. Kap. 5.1).

### 5.2.2.3 Labormessungen

Die spektroradiometrischen Messungen im Labor dienen im Allgemeinen der Validierung der Feldmessungen. Ziel der Messungen im Rahmen dieser Arbeit ist es, Informationen über die Ursache der Merkmale in den Spektralsignaturen der *in situ* Messungen zu erhalten, indem diese mit den Merkmalen der Laborspektren verglichen werden (Kap. 7.4). Daneben liefern die Labormessungen "reine" Spektren (Eigenvektoren), wie sie für die spektrale Entmischung von Feldmessungen benötigt werden (vgl. Kap. 6.3.3).

Die Aufnahmekonfiguration für die Labormessungen richtet sich nach den Grundannahmen für den Versuchsaufbau in Kap. 5.2.2.1. Die Berechnung der Messhöhe ergibt sich aus der Größe des Probenbehälters für die getrockneten und geschredderten Pflanzenproben (10x15 cm) zu 10,7 cm. Die Messungen werden mit gerichteter direkter Einstrahlung durch die in Kap. 4.1.2.2 beschriebene Halogenlampe in einer Dunkelkammer durchgeführt<sup>18</sup>.

Die Sensor- und Beleuchtungsgeometrie ist für sämtliche Labormessungen konstant. Die Probe wird auf einem höhenverstellbaren Messtisch im durch die Probengröße vorgegebenen Abstand unter der Messoptik positioniert. Die Optik wird senkrecht zur Probenebene ausgerichtet und die Halogenlampe in einem Zenitwinkel von 15° so ausgerichtet, dass der Mittelpunkt des durch diese erzeugten Strahlungskegels auf den Probenmittelpunkt trifft (Abb. 35).

Die Proben werden durch das Zerkleinern im Häcksler in einem ersten Schritt für die weitere chemische Analyse homogenisiert. Die Homogenisierung ist für die spektroradiometrischen Aufnahmen als ausreichend anzusehen, um von einer Richtungsunabhängigkeit der spektralen Reflexion der Proben ausgehen zu können. Die Systemkonfiguration ist identisch mit derjenigen für die Feldmessungen, d. h. es wird im Intervallmodus mit 40 Wiederholungsmessungen je Parallelmessung und 4 Intervallen im Abstand von 10 Sekunden gemessen (vgl. Kap. 5.2.2.2).



**Abb. 35:** Versuchsaufbau für die Labormessungen mit dem ASD FieldSpec® Pro

<sup>18</sup> Das Licht, welches vom 10"-Monitor-TFT-Display ausgeht, wird hierbei vernachlässigt.



Die Reflexionsspektren des ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro JR bzw. FR werden über eine parallele Schnittstelle auf ein Notebook übertragen und direkt durch die installierte Software (ViewSpec<sup>®</sup> Pro) im Binärformat abgespeichert. Für die folgenden Prozessierungsschritte erfolgt die Konvertierung der programminternen Binärdateien in ASCII-Dateien im Spaltenformat (tab-delimited).



## 6 Standardisierung spektroradiometrischer Messwerte

Die in Kap. 2.3.1 erläuterten Prozesse führen zu einer charakteristischen Spektralsignatur für Vegetationsbestände, die geprägt ist durch hohe Absorption im VIS und SWIR und hohe Reflexionswerte im NIR. Aus dem Verlauf der spektralen Reflexion in diesen beiden Wellenlängenbereichen (VNIR) können verschiedene Kenngrößen abgeleitet werden, die direkt oder indirekt Aufschluss über eine Reihe von Bestandsparametern geben. Die für die spektroskopische Analyse biochemischer Pflanzenbestandteile relevanten Absorptionsmerkmale sind bereits in Tab. 4 (Kap. 2.3.1.1) zusammengestellt. Für die vorliegende Arbeit sind hiervon vor allem diejenigen Bereiche von Bedeutung, in denen Proteine oder sonstige N-Verbindungen für die Absorptionsmerkmale verantwortlich gemacht werden können, da Stickstoff in der Bruttozusammensetzung der Pflanze (neben der organischen Substanz, siehe auch Tab. 7) eine dominierende Stellung einnimmt und an fast allen ertragsbildenden Stoffwechselfvorgängen beteiligt ist.

Die für die Quantifizierung der Nährstoffe relevanten Bindungsmechanismen (z. B. N-H-Bindung in Proteinen), die sich zumeist durch Schwingungsabsorptionen im Reflexionsspektrum niederschlagen, treten in der Regel in zahlreichen Konfigurationen und unterschiedlichen Inhaltsstoffen auf. Außerdem ist zu bedenken, dass sich ein Absorptionsbereich immer aus einer Reihe primärer und sekundärer Schwingungsbanden unterschiedlicher Bindungsstrukturen bzw. verschiedener Molekülkomplexe zusammensetzt, so dass es nicht möglich ist, eine einzelne Reflexionsmessung einer bestimmten Wellenlänge als Maß für die chemische Konzentration bestimmter Bestandteile heranzuziehen. Ein weiteres Problem bei der Messung besteht darin, dass die den zu entwickelten Modellen zugrunde liegenden Hypothesen zumeist auf Untersuchungen an getrockneten Pflanzenproben basieren. Bei der *in situ* Messung von Pflanzenspektren spielt dagegen neben der Messumgebung die Absorption des Pflanzenwassers immer eine übergeordnete Rolle und wird in vielen Fällen die im Labor als signifikant herausgestellten Absorptionsbanden maskieren.

Aus diesen Umständen erschließt sich die Hypothese, dass für die Modellierung biochemischer und biophysikalischer Parameter eines Pflanzenbestandes aus deren Spektralsignatur der Einsatz semiempirischer multivariater Methoden notwendig ist.

Die Verfahren der multivariaten Analyse basieren ausschließlich auf den mathematischen Zusammenhängen zwischen den in diese Verfahren eingehenden Datensätzen. Die Funktionskurven der Rohdaten der spektralen Reflexionsfaktoren weisen jedoch aufgrund system-, aufnahme- und objektspezifischer Eigenschaften unterschiedliche Streubereiche Ihrer Signaturmerkmale auf. Für die multivariate Datenanalyse ist deshalb eine **Standardisierung** der statistischen Eigenschaften der Funktionskurve auf einen vergleichbaren Bereich zwingend notwendig.

Für die Standardisierung spektroradiometrischer Messungen werden in den folgenden Kapiteln unterschiedliche Ansätze untersucht, die entweder Korrekturen der Auswirkungen aufnahme- und oberflächenspezifischer Parameter auf das Messsignal vornehmen (**absolute Kalibrierung**) oder ausschließlich auf den funktionsimmanenten Eigenschaften (deskriptive statistische Merkmale) der Spektralsignatur beruhen (**Normierung, relative Kalibrierung**).

Die Auswirkungen der verschiedenen Ansätze auf die Ergebnisse der multivariaten Datenanalyse werden in Kap. 7.4 verifiziert.

Vor der Standardisierung erfolgt in Kap. 6.1 eine qualitative Analyse der Spektralsignaturen zur Ausscheidung derjenigen Spektralabschnitte, welche aufgrund von Messunsicherheiten nicht für eine weitere Auswertung in Frage kommen, sowie die Glättung der Funktionskurve zur Verminderung des systembedingten Rauschens im Frequenzbereich (Kap. 6.2).

Die **Kalibrierung** der Feldspektren in Kap. 6.3 zielt auf die Berechnung absoluter Reflexionswerte (Lambert-Reflektor) und die Korrektur der Reflexionswerte um aufnahmespezifische und oberflächenspezifische Parameter ab, die einen Einfluss auf die spektrale Reflexion haben. Das Resultat der Kalibrierung ist eine "reine" Funktionskurve der absoluten spektralen Reflexion einer Vegetationsoberfläche, die von den Umgebungsvariablen der Aufnahme weitestgehend unabhängig ist.

Die **Normierung** kann entweder den gesamten aufgenommenen Wellenlängenbereich oder nur bestimmte Abschnitte des Reflexionsspektrums bzw. einzelne Wellenlängenkanäle betreffen. Die einfachste Form der Normierung ist die Kombination von zwei oder mehreren Spektralkanälen zu einem relativen Index. Ein solcher Index kann Informationen liefern, die direkt als Kennwert für relative quantitative Objekteigenschaften herangezogen werden können. In diesem Fall spricht man von einer **Parametrisierung** der spektralen Information. Die wichtigsten Parametrisierungsansätze und deren Eignung zur direkten Ableitung von Bestandsmerkmalen werden in Kap. 6.5 behandelt. Solche Verfahren finden in der Regel in der Multispektralanalyse Verwendung zur Zustandsbeschreibung von Oberflächen. Besteht die Möglichkeit der Aufnahme einer spektralen Signatur einer Oberfläche mit einer sehr viel höheren Anzahl von Stützstellen (Spektralkanälen), bieten sich zusätzlich mathematische Verfahren der **Funktionsanalyse** (Kap. 6.6) als Normierungsverfahren an.

Diese allgemeingültigen mathematischen Normierungsverfahren zielen auf eine Transformation der Eingangsdaten auf einen vergleichbaren Wertebereich ab (**Skalierung**). Nach ihrem Wirkungsbereich werden diese Skalierungsverfahren unterschieden in Orts- und Frequenzverfahren. Die Ortsverfahren betrachten die Variabilität der spektralen Reflexion für eine Wellenlänge  $\lambda$  über den kompletten Datensatz (quasi-räumlich), die Frequenzverfahren verwenden statistische Merkmale der Spektralsignatur bzw. eines Kurvenausschnitts um den Wertebereich zu normieren.

Die nach einem dieser Verfahren standardisierten Messwerte können – bei vorhandener Kausalität – über multivariate Methoden bzw. einfache lineare Regressionen in Beziehung gebracht werden zu Merkmalen des aufgenommenen Objekts und ermöglichen relative quantitative Aussagen über Komponentenkonzentrationen (Kap. 7). Der gesamte Prozessierungsablauf zur Standardisierung der spektroradiometrischen Messungen ist in Abb. 36 zusammengefasst.

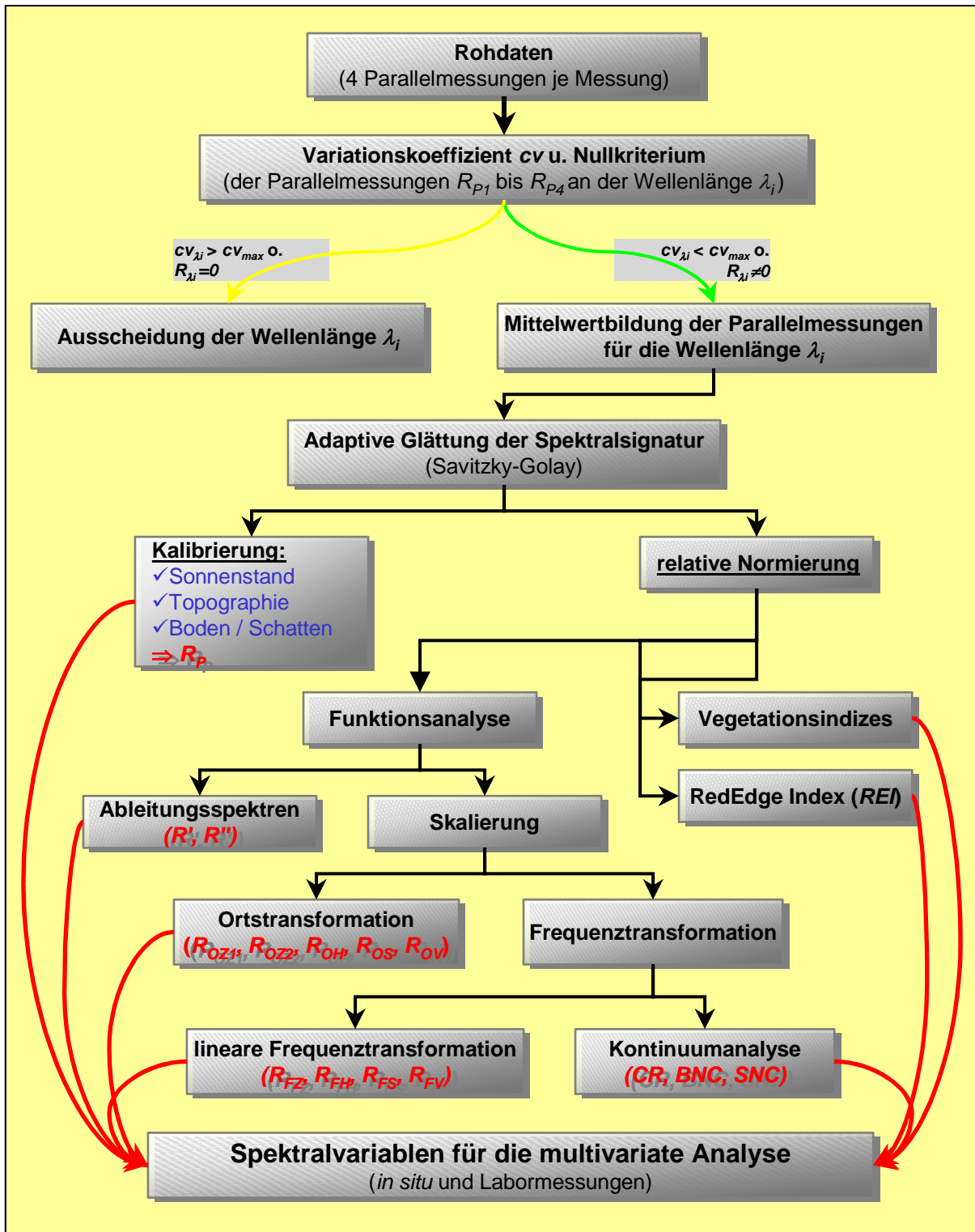


Abb. 36: Ablaufschema der Datenprozessierung für die ASD FieldSpec®-Messungen

## 6.1 Qualitative Analyse der Spektralsignaturen

Als Eingangsdatensatz für die Prozessierung der spektrometrischen Feldmessungen erhält man eine Funktionskurve  $f(\lambda)$  mit spektralen Reflexionsfaktoren  $R_\lambda$  für jede Stützstelle der Funktion, d.h. für jede Zentrumswellenlänge  $\lambda_i$ .

Die bei Feldaufnahmen durch den Wasserdampf der Atmosphäre gestörten Bereiche wurden durch ein Null-Kriterium sowie eine Varianzanalyse der Parallelmessungen  $f(\lambda)_{P1}$  bis  $f(\lambda)_{P4}$  detektiert ("Varianz-Null-Kriterium"), wobei der Reflexionsfaktor  $R$  einer Wellenlänge  $\lambda$  nur für die weitere Betrachtung in Frage kommt, wenn der ermittelte Variationskoeffizient  $cv$  (*coefficient of variation*) über die Parallelmessungen für diese Wellenlänge im Mittel aller Intervallmessungen einen Grenzwert  $cv_{max}$  nicht übersteigt:

$$cv = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad ; \text{ wobei } cv_{max}=0.1 \quad \text{Gl. 17}$$

mit:

$cv$	:	Variationskoeffizient
$\sigma$	:	Standardabweichung
$\bar{x}$	:	Mittelwert der Messungen $f(\lambda)_{P1}$ bis $f(\lambda)_{Pn}$

Die hieraus für die weiteren Analysen der Feldspektren verbleibenden Spektralbereiche sind Abb. 37 zu entnehmen. Neben den bekannten H<sub>2</sub>O-Absorptionsbanden bei 1,4 und 1,9  $\mu\text{m}$  scheiden durch die qualitative Analyse ebenso sämtliche Messungen im Bereich  $\lambda > 2340 \text{ nm}$  von einer weiteren Betrachtung aus. Zusätzlich werden alle Messungen unterhalb von 400 nm ausmaskiert, obwohl das Varianzkriterium für diesen Bereich erfüllt ist. Aufgrund der starken O<sub>3</sub>-Absorption ist dieser Bereich für fernerkundliche Auswertungen der Erdoberfläche nur bedingt brauchbar.

In den Spektralsignaturen der unter Laborbedingungen gemessenen Pflanzenproben treten diese Merkmale nicht auf. Zwar sind aufgrund der Probenumgebung im luftgefüllten Raum auch hier die H<sub>2</sub>O-Absorptionsbanden bei 1,4 und 1,9  $\mu\text{m}$  sichtbar, das Varianzkriterium wird jedoch über den gesamten Messbereich eingehalten. Dennoch werden die Laborspektren ebenfalls um die genannten Wellenlängenbereiche bereinigt, was die weiteren Rechenoperationen vereinfacht.

Die Analyse des Variationskoeffizienten bestätigt die in Kap. 5.2.2.2 geäußerte Annahme, dass es zwischen den Einzelmessungen durch spontane Änderungen der Umgebungsvariablen (Wind, Beschattung, etc.) und durch systemspezifische Einflüsse zu kurzzeitigen Schwankungen der Reflexionsfaktoren auch in den relativ konstanten Wellenlängenbereichen kommen kann. Wie aus Abb. 37 hervorgeht, weist die durch das "Varianz-Null-Kriterium" reduzierte Funktionskurve in den Bereichen niedriger SNR-Werte und in den Übergangsbereichen der Beugungsgitter weiterhin relativ große Schwankungen bzw. Unsicherheiten auf. Diese sind nicht zuletzt auch dadurch bedingt, dass die Wellenlängengenauigkeit des ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro über der nominellen Bandbreite des Gerätes liegt (vgl. Kap. 4.1.1), wodurch es zu Verschiebungen der Funktionsmerkmale bei Parallelmessungen kommen kann.

Die Funktionskurve der Spektralsignatur wird aus diesen Gründen bereits in der Vorverarbeitung einem Glättungsverfahren unterzogen.

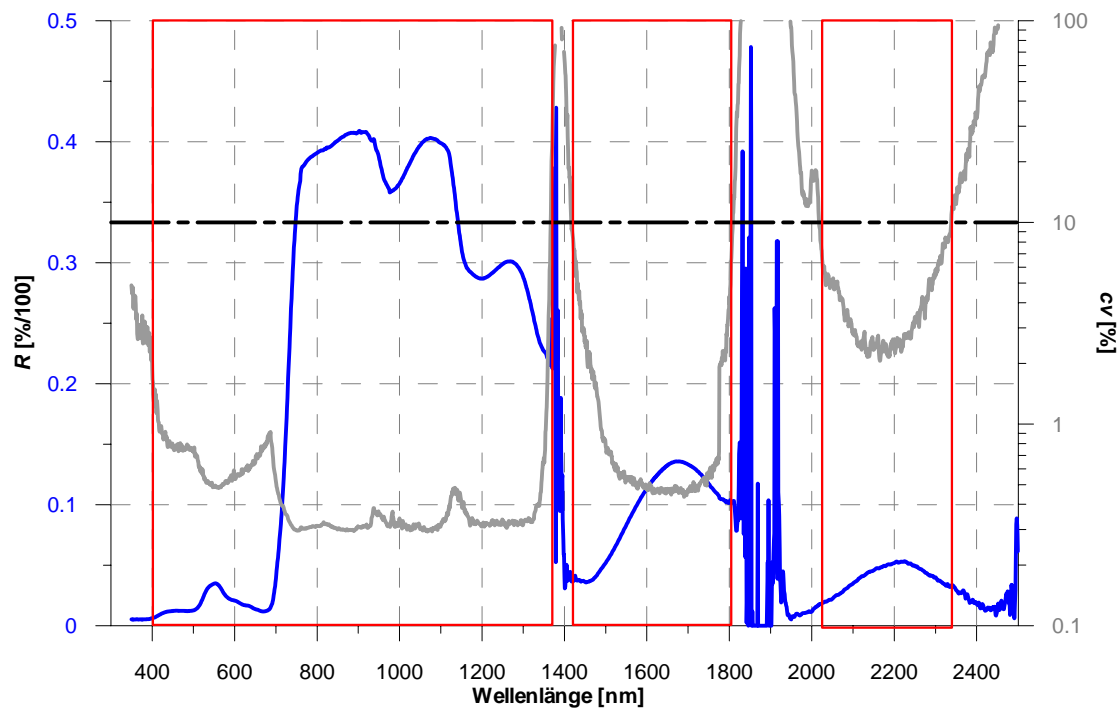
Dieses besteht aus einer gleitenden Mittelwertbildung im Ortsbereich der Parallelmessungen, d.h. die Reflexionsfaktoren  $R_{P_1}$  bis  $R_{P_n}$  werden zu einer Gesamtmessung zusammengefasst.

$$R_{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{P_i} \quad \text{Gl. 18}$$

mit:

$n$  : Anzahl der Parallelmessungen

$R_{P_i}$  : Reflexionsfaktor  $R$  der Parallelmessung  $P_i$



**Abb. 37:** Mittlere spektrale Variationskoeffizienten der Parallelmessungen ( $n=4$ ) eines Getreidebestands mit dem ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro JR

## 6.2 Adaptive Glättung der Funktionskurve

Der örtlichen Glättung durch Mittelung der Parallelmessungen (Kap. 6.1) folgt eine Glättung im Frequenz- bzw. Wellenlängenbereich der Funktionskurve. Die Frequenzfilterverfahren beabsichtigen die Unterdrückung von Artefakten des Signaturverlaufs, die vor allem durch systemspezifische Beschränkungen (Dunkelstrom, *SNR*, *NER*, Bandbreite, etc., vgl. Kap. 4.1.1) und Umgebungsvariablen zustande kommen können.

Als Glättungsalgorithmus für die Frequenzfilterung können ebenfalls einfache Mittelwertprozeduren verwendet werden. Für die Auswahl eines geeigneten Glättungsalgorithmus sollten aber einige Regeln bedacht werden:

- ⇒ Die Filterbreite / das Filterfenster sollte ungefähr maximal der Halbwertsbreite (FWHM<sup>19</sup>) der zu betrachtenden Signaturmerkmale entsprechen. Wird dieser Wert zu klein gewählt, bleiben unerwünschte Rauscheffekte erhalten, ist das Filterfenster zu groß, kann es zu Lage- und Formverzerrungen der Merkmale kommen.
- ⇒ Steht bei der Auswertung der Daten die Höhe bzw. Tiefe (Peak oder Absorptionstief) und nicht die Fläche unter der Funktionskurve im Vordergrund, sollte generell eine kleinere Fensterbreite gewählt werden, da sich die Verzerrungen eher auf die Höhe als auf die Fläche auswirken.
- ⇒ Ein einzelner Filterdurchgang erreicht in der Regel den größten Glättungseffekt (> 95 %). Werden weitere Filterschritte durchgeführt ist wiederum auf die o.g. Verzerrungen zu achten.

Die Wirkung unterschiedlicher Filter ist in Abb. 38 für zwei Ausschnitte der Spektralsignatur einer Winterweizenprobe (Feldaufnahme) dargestellt. Ein gleitender Mittelwertfilter führt zu einer starken Glättung der gesamten Funktionskurve und damit zur Eliminierung wesentlicher Signaturmerkmale. Ein Gaußscher-Tiefpassfilter erzielt bereits deutlich bessere Resultate bei der Erhaltung der Funktionsmerkmale, da eine gewichtete Mittelung in Abhängigkeit von der Entfernung zum Zentrum erfolgt.<sup>20</sup>

Für die ASD FieldSpec<sup>®</sup>-Spektralsignaturen wurde zur Glättung unter Berücksichtigung der oben aufgezählten Regeln ein adaptiver Frequenz-Filter ausgewählt. Dieser bereits in den 60-er Jahren von SAVITZKY & GOLAY beschriebene Algorithmus (SAVITZKY & GOLAY 1964) führt zu einer effektiveren Glättung als die gängigen Tiefpass-Filter, da für die zu glättende Funktionskurve je nach deren Komplexität individuelle Gewichtungsfaktoren in die Filtermatrix einbezogen werden. Diese Gewichtung basiert auf der Anpassung der Daten an ein Polynom 2., 3. oder höheren Grades. Die Annahme eines quadratischen bzw. kubischen Polynoms für die Funktionskurve führt je nach Grad des angenommenen Polynoms zur Ausweisung von Filterkoeffizienten für die jeweils verwendete Filterbreite<sup>21</sup>. Die Filterbreite muss immer einen ungeraden ganzzahligen Wert annehmen, der sich ergibt aus dem Zentrumswert, der gefiltert wird sowie den rechts und links davon liegenden Datenpunkten, die in die Filterprozedur mit einbezogen werden sollen.

<sup>19</sup> FWHM = full width half maximum, siehe Abb. 45

<sup>20</sup> Die Gewichte zur Gaußschen Tiefpassfilterung können bei SCHÖNWIESE (2000) nachgeschlagen werden.

<sup>21</sup> Die Filterkoeffizienten für die unterschiedlichen Polynom Anpassungen und Filterbreiten können SAVITZKY & GOLAY (1964) und z. T. OTTO (1998) entnommen werden.

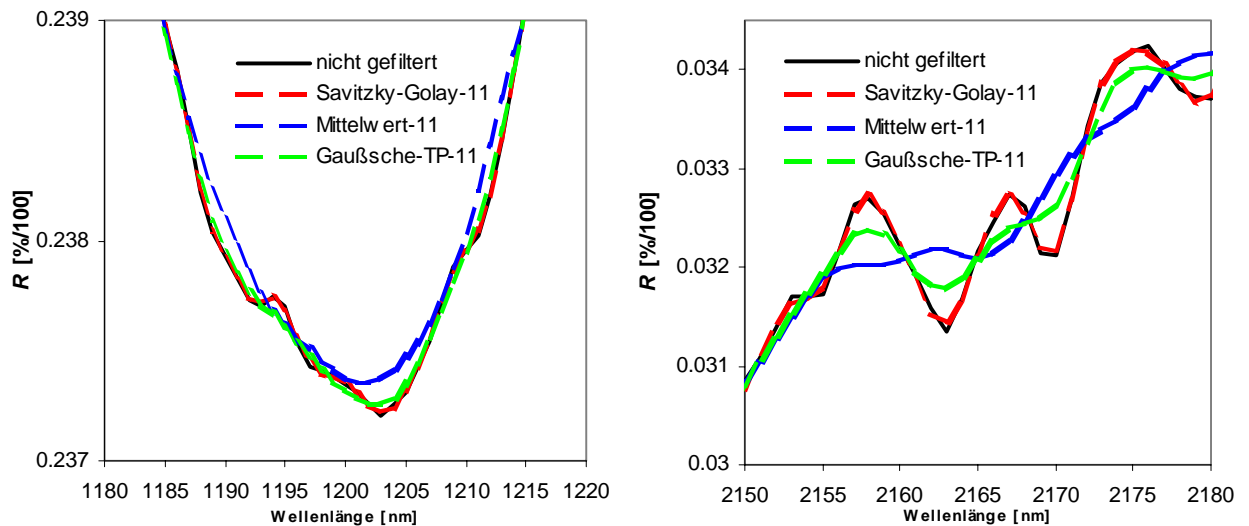


$$R_{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=-m}^{i=m} c_i * R_{\lambda+i}$$

Gl. 19

mit: $N$  : Normalisierungsfaktor, der sich aus der Summe der Koeffizienten  $c_i$  ergibt $c_i$  : Filterkoeffizient für den Datenpunkt  $i$  $m$  : Variable zur Festlegung der Filterbreite ( $=2m+1$ )

Auf die Spektralsignaturen wurden unterschiedliche Filterbreiten zwischen 3 und 33 Punkten angewendet. Das beste Resultat wurde mit einem Savitzky-Golay-Filter mit einer Filterbreite von 11 Stützstellen erzielt. Für die Funktionskurve wurde ein Polynom 5. Ordnung angenommen. Hiermit konnten sowohl die schmalen Absorptionsbanden im SWIR zwischen 2000 und 2300 nm als auch die relative breiten Absorptionsbereiche im VIS/NIR in Ihren Merkmalsausprägungen (Lage, FWHM, Tiefe, Steigung, siehe auch Abb. 45) bestmöglich erhalten bleiben. Gleichzeitig werden systembedingte oder umgebungsbedingte Unregelmäßigkeiten des Reflexionsverlaufs unterdrückt (siehe Abb. 38).



**Abb. 38:** Glättung der Spektralsignaturkurve mit unterschiedlichen Filtern (11-Punkt-Mittelwertfilter, 11-Punkt-Gaußfilter, 11-Punkt-Savitzky-Golay-Filter)

## 6.3 Kalibrierung der Messdaten

### 6.3.1 Vorüberlegungen zur Kalibrierung

Die Kalibrierung spektroradiometrischer Daten soll im Idealfall alle unerwünschten Beeinträchtigungen auf das Messsignal „ausschalten“, um die Messwerte für quantitative, vergleichende Studien vergleichbar zu machen. Für spektroradiometrische Messungen unter Laborbedingungen sind die nachfolgenden Kalibrierungsansätze nicht erforderlich, da die Messkonfiguration durch den Versuchsaufbau eindeutig rekonstruierbar ist.

Die Vorüberlegungen zur Kalibrierung von Messwerten müssen sich zunächst mit der Gesamtheit der möglichen Einflussvariablen, welche das Signal verändern können auseinandersetzen und aus diesen eine Zielvariable definieren, für welche die Daten „entzerrt“ werden sollen. Im Fall der Aufnahme von Vegetationsbeständen in einer natürlichen Umgebung kommen eine Reihe von Parametern in Frage, die eine Auswirkung auf Spektralmessungen haben können. Auf die Interaktionsmechanismen zwischen elektromagnetischer Strahlung und natürlichen Oberflächen wurde zu diesem Zwecke in Kap. 2.3 bereits ausführlich eingegangen. In Merkmalsgruppen zusammengefasst können als Einflussvariablen folgende Komponenten definiert werden, die die spektrale Reflexion von Pflanzenbeständen beeinflussen, welche an einem Sensor gemessen wird:

- ⇒ physikalische Pflanzenkomponenten (Pflanzen-/ **Bestandsgeometrie**)
- ⇒ physikalische **Bodenkomponenten** (Oberflächenstruktur)
- ⇒ biochemische **Bodenkomponenten** (mineralische und chemische Zusammensetzung)
- ⇒ **Aufnahmekonfiguration** (Sensor, Strahlungsquelle, Topographie)
- ⇒ **Atmosphäre**
- ⇒ **biochemische Pflanzenkomponenten** (Pflanzeninhaltsstoffe)

Aus der Gesamtheit der Variablen wird für die quantitative fernerkundliche Auswertung in der Regel ein Einflussfaktor als Zielvariable definiert. Die Aufgabe einer Kalibrierung besteht darin, den Einfluss der übrigen Variablen auf das Messsignal zu quantifizieren, um für die anschließende Analyse einen robusten, vergleichbaren Datensatz zu erhalten. Das Problem der Kalibrierung besteht in den meisten Fällen und auch in der vorliegenden Arbeit darin, dass es nicht möglich ist, sämtliche Einflussfaktoren welche, neben der Zielvariable, das Messsignal beeinflussen, zu erheben. Diese fehlenden Faktoren gehen durch die vereinfachte Annahme eines konstanten, wellenlängenunabhängigen Koeffizienten in die Berechnungen ein.

Die Zielvariable für die Analyse der durchgeführten spektroradiometrischen Messungen wird allgemein als biochemischer Pflanzenzustand definiert. Die Möglichkeiten zur Korrektur des Einflusses der übrigen Aufnahmekomponenten werden im Folgenden kurz skizziert und die für den vorhandenen Datensatz durchzuführenden Maßnahmen der Kalibrierung abgeleitet.

**Bestandsgeometrie:**

Der Einfluss der Bestandsgeometrie auf das Reflexionssignal wurde im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht in Form von BRDF-Messungen quantifiziert. Für die Abschätzung des spektralen Verhaltens der aufgenommenen Vegetationsoberflächen in Abhängigkeit von ihrer Physiognomie wird deshalb für die folgenden Arbeiten von einer Reihe von Grundannahmen ausgegangen:

- ⇒ Die Oberfläche der betrachteten Pflanzenbestände ist als relativ homogen anzunehmen mit vertikal gering gegliederter Oberfläche.
- ⇒ Die Morphologie des Bestands wird als über den gesamten Bestand relativ gleichförmig angenommen (Abb. 39).
- ⇒ Bestandsgeometrische Parameter, wie Blattwinkelverteilung oder Bestandsdichte werden verallgemeinernd als additive bzw. subtraktive Komponenten der spektralen Reflexion angesehen (siehe hierzu auch SCHNEIDER 1994 und HILDEBRANDT 1996).
- ⇒ Die Reflexionsfunktion zu beiden Seiten der Hauptebene der Sonneneinstrahlung (principal plane) ist als symmetrisch anzunehmen (siehe z. B. BAUER et al. 1986 und MANAKOS et al. 2001)



**Abb. 39:** Morphologie eines Winterweizenbestands (Senkrechtaufnahme) zum Zeitpunkt der spektroradiometrischen *in situ* Messungen (10.05.2001)

**Bodenkomponenten:**

Der Anteil der reflektierten solaren Einstrahlung eines Objektes ist immer eine Funktion der einzelnen Komponenten, aus denen sich dieses Objekt zusammensetzt. Für die weiteren Analysen werden die aufgenommenen Feldspektren im Anschluss an die Sonnenstandskorrektur in die drei Bestandskomponenten Pflanze, Boden und Schatten zerlegt (Kap. 6.3.3). Für die Zerlegung wird das Verfahren der spektralen Mischung auf die Zielvariable invertiert, in diesem Fall den Anteil der Pflanze an dem spektralen Reflexionssignal. Die jeweiligen Anteile der einzelnen Komponenten werden über eine vorgeschaltete Clusteranalyse von Senkrechtaufnahmen des Bestands bestimmt.

Die Auswirkungen der physikalischen und biochemischen Bodenparameter auf das Mischsignal der Bestandsaufnahme gehen durch die Berücksichtigung einer für den jeweiligen Bestand charakteristischen Bodensignatur in die spektrale Entmischung ein.

**Aufnahmegeometrie:**

Unterschiede in der geometrischen Aufnahmekonstellation, d. h. Änderungen des Sonnenstands und der Sensororientierung verursachen Änderungen im Reflexionsverlauf elektromagnetischer Strahlung, wenn diese auf eine Oberfläche trifft. Dies führt zu Schwankungen im Messsignal, das am Sensor registriert wird. Die komplette quantitative Erfassung dieser Reflexionsanisotropien ist wiederum nur durch Messungen der bidirektionalen Reflexionsfaktoren (BRF) möglich (vgl. Kap. 2.1.2).

Für den vereinfachten Fall der Beobachtung, der ausschließlich die gerichtete Rückstreukomponente innerhalb eines begrenzten Einfallswinkelbereichs betrachtet, ist die Korrektur des Sonnenstandseinflusses durch ein lineares Verfahren möglich. Unter dieser Annahme wird für die Feldmessungen ein Verfahren zur wellenlängenunabhängigen linearen Korrektur des Sonnenstandseinflusses auf den gerichteten Reflexionsfaktor unter Berücksichtigung der Topographie des Geländeausschnitts abgeleitet, das in Kap. 6.3.2 erläutert wird.

**Atmosphäre:**

Bei der Auswertung von Luft- oder Satellitenbildern für die quantitative Vegetationsfernerkundung ist der Einsatz von Atmosphärenkorrekturmodellen, welche die vom Detektor gespeicherten Grauwerte in Reflexions- oder Strahldichtewerte transformieren, unumgänglich. Die Modellierung der Reflexionsfaktoren für die HyMap<sup>®</sup>-Daten am DLR, Oberpfaffenhofen erfolgte deshalb durch das Strahlungstransfermodell MODTRAN4.

Auf eine absolute Kalibrierung der spektroradiometrischen Feldmessungen (ASD FieldSpec<sup>®</sup>) durch Strahlungstransfermodelle kann verzichtet werden, da bei konstanter Strahlungswetterlage gemessen wurde und der Abstand zwischen Sensor und Objekt gering war (<1m). Außerdem erübrigt sich für die ASD FieldSpec<sup>®</sup>-Messungen eine Atmosphärenkorrektur, da bereits *in situ* Reflexionsfaktoren durch die zeitnahen Messungen des Referenzstandards (Spectralon<sup>®</sup>) vorlagen. Durch die direkte Berechnung der Reflexionsfaktoren werden bereits alle multiplikativen Effekte, welche die Objektreflexion beeinflussen können, ausgeschaltet.

**Zusammenfassung:**

Bei *in situ* Reflexionsmessungen ist eine Atmosphärenkorrektur nicht notwendig, da durch die zeitnahe Messung eines (quasi-) absoluten Standards direkt gerichtete Reflexionswerte gemessen werden. Die ASD FieldSpec<sup>®</sup>-Feldmessungen werden für die multivariate Auswertung auf einen absoluten Reflexionsstandard kalibriert.

Bei den durchgeführten spektroradiometrischen Messungen wird von der Annahme ausgegangen, dass die betrachteten Oberflächen homogen sind. Bezogen auf die bidirektionale Komponente der reflektierten solaren Strahlung bedeutet dies, dass die auf einen Pflanzenbestand auftreffende Strahlung in Abhängigkeit vom Zenitwinkel der einfallenden Strahlung unterschiedlich stark reflektiert wird (Einfallswinkelanisotropie). Aus dieser Annahme folgt, dass für die quantitative Analyse spektroradiometrischer Messungen zumindest eine Sonnenstandskorrektur notwendig ist. Für die vorliegende Untersuchung wird deshalb eine Korrektur des Sonneneinfallswinkels auf einen Referenzwinkel durchgeführt, der dem Sonnenhöchststand während der Aufnahmeperiode entspricht. Für die quantitative Bewertung der Vegetationskomponente im gemessenen Feldspektrum wird das Reflexionsspektrum durch ein linear-subtraktives Verfahren in einzelne Spektralkomponenten zerlegt (siehe Kap. 6.3.3).

### 6.3.2 Sonnenstands- und Reliefkorrektur

Die komplette quantitative Erfassung der Änderungen des Reflexionssignals in Abhängigkeit von der Aufnahmegeometrie ist nur durch Messungen der bidirektionalen Reflexionsfaktoren (BRF) möglich, wie sie z. B. von SANDMEIER & ITTEN (1999) für Getreideflächen durchgeführt wurden. Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass es, ausgehend von einem mittleren Einfallswinkel (Blickwinkel Strahlungsquelle-Sensor), zu starken wellenlängenabhängigen Anisotropien der Rückstreuwerte kommt. Diese sind abhängig von der relativen Orientierung des Sensors zur Strahlungsquelle, wodurch entweder die in Richtung der Strahlungsquelle reflektierte gerichtete Reflexionskomponente (backward scattering) oder die von der Strahlungsquelle weg gerichtete reflektierte Strahlung gemessen wird (forward scattering). Der Gesamtverlauf der daraus resultierenden Anisotropiefaktoren für die einfallswinkelabhängige gerichtete Rückstreuung kann durch ein Polynom 3. Ordnung für jede einzelne Wellenlänge angenähert werden (DUGGIN 1980).

Betrachtet man dagegen nur die von der Strahlungsquelle weg gerichtete Rückstreuanteile innerhalb eines begrenzten Einfallswinkelbereichs, ist die Annäherung durch ein lineares Verfahren möglich (siehe auch BAUER et al. 1986). Durch die geometrische Konfiguration des Sensoraufbaus (vgl. Kap. 5.2.2.2) und die Aufnahmezeiträume bewegen sich die Sonnenzenitwinkel  $\theta_i$  und damit auch die Blickwinkel (Strahlungsquelle-Sensor) für die spektroradiometrischen Feldmessungen in einem Bereich von  $30^\circ < \theta_i < 55^\circ$ . Die auf die Topographie der Testschläge korrigierten Einfallswinkel der Sonnenstrahlung  $\theta_\beta$  bewegen sich zwischen  $29^\circ < \theta_\beta < 59^\circ$ .

Die Linearität der Abhängigkeiten zwischen den Standorten der Strahlungsquelle bzw. des Sensors und der gerichteten Reflexion wird durch Kontrollmessungen der mittleren solaren Reflexion für den Spektralbereich des ASD FieldSpec<sup>®</sup> über einer Weizenfläche bestätigt ( $r^2=0,55$ ).

Auf der Basis dieser Vorarbeiten wird für die Feldmessungen ein Verfahren zur wellenlängenunabhängigen linearen Korrektur des Sonnenazimut- und Zenitwinkels bei gleichzeitiger Normierung auf die Ebene entwickelt (**EL-SOL**, correction of **e**levation and **s**olar inclination for spectroscopic measurements).

Unter Vernachlässigung des Anteils der diffusen Streuung der einfallenden solaren Strahlung ist der Einfallswinkel der direkten solaren Einstrahlung nur von den geometrischen Beziehungen zwischen Sonne und Erde, des Standorts auf der Erde, sowie der jeweiligen Ortszeit abhängig. Die Richtung der direkten Sonneneinstrahlung auf eine beliebig geneigte Fläche lässt sich für jeden Punkt der Erdoberfläche nach folgender Formel berechnen (vgl. z. B. DUFFIE 1991):

$$\cos \theta_\beta = \left\{ \begin{array}{l} \sin \delta * \sin \varphi * \cos \beta - \\ \sin \delta * \cos \varphi * \sin \beta * \cos \gamma + \\ \cos \delta * \cos \varphi * \cos \beta * \cos \omega + \\ \cos \delta * \sin \varphi * \sin \beta * \cos \gamma * \cos \omega + \\ \cos \delta * \sin \beta * \sin \gamma * \sin \omega \end{array} \right\} \quad \text{Gl. 20}$$

mit:

$\theta_\beta$  : Sonneneinfallswinkel (Winkel zwischen dem einfallenden Strahl und der Normalen auf die Ebene)

$\varphi$  : geographische Breite (nördliche Hemisphäre = positiv)

- $\delta$  : Deklination der Sonne (Winkel zwischen Sonne bei Sonnenhöchststand und Äquatorebene, nördliche Hemisphäre = positiv)  
 $\beta$  : Neigung der Ebene  
 $\gamma$  : Exposition der Ebene (hier: Azimutwinkel der Ebene zur Südrichtung; Osten = negativ, Westen = positiv, Norden = 180°)  
 $\omega$  : Stundenwinkel (Sonnenhöchststand = 0°, jede Stunde entspricht 15°)

Die Reliefparameter Neigung und Exposition können, soweit vorliegend, aus DGM-Daten für die Schläge abgeleitet werden. Für das Testgebiet Imbshausen liegen Daten des DGM\_5 mit einer Rasterweite von 12,5 m vor.

Die auf die wahre Sonnenzeit korrigierte Uhrzeit ist in der Angabe des Stundenwinkels  $\omega$  enthalten. Der Kalendertag (DOY) geht als Einflussvariable in die näherungsweise Berechnung der Deklination  $\delta$  ein:

$$\delta = 23,4^\circ * \sin\left(360 * \frac{(284 + DOY)}{365}\right) \quad \text{Gl. 21}$$

$$\omega = 180 - h * 15 \quad \text{Gl. 22}$$

mit

- $h$  : Stunde des Tages (wahre Sonnenzeit)  
 $DOY$  : Kalendertag

Für den vorliegenden Datensatz wurde auf der Basis der verfügbaren Daten nach Gl. 19 ein einfaches lineares Verfahren zur Sonnenstandskalibrierung entwickelt, welches mit einem für alle Wellenlängen konstanten Korrekturfaktor  $\cos \theta_\beta$  (gültig für  $10^\circ < \theta < 60^\circ$ ) auskommt:

$$R_{SK} = R - k * \cos \theta_\beta + c_0 \quad \text{Gl. 23}$$

mit

- $R_{SK}$  : sonnenstandskorrigierter Reflexionsfaktor  
 $\theta_\beta$  : Sonneneinfallswinkel (Winkel zwischen dem einfallenden Strahl und der Normalen auf die Ebene)  
 $k$  : Maß für die Stärke des Korrekturfaktors  
 $c_0$  : Normierungskoeffizient für den Bezugswinkel  $\theta_0$

Aus der Gleichung ergibt sich ein negativer linearer Zusammenhang zwischen dem Einfallswinkel und der gerichteten Rückstreuung. Das heißt, dass innerhalb eines begrenzten Winkelintervalls der Anteil der in eine bestimmte Richtung reflektierten solaren Einstrahlung mit abnehmendem Sonnenstand zunimmt. Die Kalibrierung der Reflexionsfaktoren erfolgt nach Gl. 23 auf einen Bezugswinkel  $\theta_0$ , der dem potenziell möglichen Sonnenhöchststand während der Beobachtungsphase entspricht. Als Bezugswinkel wird für die Kalibrierung ein Sonneneinfallswinkel von 30° gewählt.

### 6.3.3 Entmischung spektraler Komponenten

Das Reflexionssignal von Vegetationsoberflächen setzt sich immer aus einer Mischung von Einzelspektren zusammen, welche jeweils charakteristisch für eine den Bestand beschreibende Komponente sind. Der Anteil der einzelnen Komponenten am Gesamtsignal ist abhängig von der Phänologie der Pflanzen und kann für Kulturpflanzenbestände anhand des Entwicklungsstadiums (EC-Skala) geschätzt werden. Für die Beschreibung des Pflanzenbestands erfolgt die Einteilung der Objektmerkmale in die drei Komponenten Pflanze, Boden und Schatten. Für Getreidebestände kann ab dem Ende des Schossens (EC 37/39) mit Bestandsschluss gerechnet werden, was bedeutet, dass sich das Reflexionssignal nur noch aus der Physiologie und der chemischen Zusammensetzung der Pflanze sowie etwaiger Schattenanteile, die durch die Bestandsgeometrie bedingt sind, zusammensetzt. Bis zu diesem Zeitpunkt ist aufgrund der in Kap. 2.3.2.1 erläuterten Beeinflussung der spektraler Reflexion von bestimmten Bodeneigenschaften der Anteil des Bodens am Erscheinungsbild des Pflanzenbestands zu quantifizieren und bei der weiteren Analyse der gemessenen Feldspektren zu berücksichtigen.

Die Abschätzung der Anteile der einzelnen Komponenten am Erscheinungsbild des Pflanzenbestands erfolgt durch eine digitale Klassifikation von Senkrechtaufnahmen, die aus der gleichen Position wie die spektroradiometrischen Aufnahmen angefertigt wurden.

Die Clusteranalyse der Senkrechtaufnahmen führt zu den in Tab. 18 ausgewiesenen Anteilen der Bestandskomponenten (Abundanzen) in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium. Auffallend ist die rasche Zunahme des Bedeckungsgrads während des Schossens innerhalb weniger Tage während der ersten Feldkampagne Anfang Mai. Der Bodenanteil liegt hierbei in der Klassifikation weit über dem im Gelände geschätzten Wert. Der Anteil der beschatteten Pflanzen- und Bodenanteile bleibt dagegen über den Betrachtungsraum weitgehend konstant. Diese Beobachtung unterstreicht die Notwendigkeit einer Berücksichtigung des Bodensignals bei der Analyse von Vegetationsspektren für die quantitative Erfassung von Pflanzenparametern.

**Tab. 18: Abundanzen der spektral relevanten Bestandskomponenten für die spektrale Entmischung**

	EC-Skala	Pflanze	Boden	Schatten
03.05.2001	30	75 %	6 %	19 %
10.05.2001	32	78 %	3 %	19 %
24.05.2001	39/41	79 %	--	21 %

Für die Berechnung der um die Einflusskomponenten Boden und Schatten korrigierten Spektralsignaturen erfolgt die Invertierung der Verfahren zur linear-additiven Mischung von Spektralsignaturen. Dieses Verfahren wird ursprünglich zur quantitativen Schätzung des Vorkommens von Oberflächeneigenschaften oder Anteilen auf der Basis Ihrer Spektralkomponenten aus multispektralen oder hyperspektralen Satellitenbildern (siehe z. B. BATESON & CURTISS 1996, GOETZ 1992) verwendet.

Hierbei wird von der Modellvorstellung ausgegangen, dass der spektrale Reflexionsfaktor einer inhomogenen Oberfläche aus der Summe der gewichteten Reflexionsfaktoren der Einzelkomponenten hervorgeht (HILL 1998). Die Gewichtung der Reflexionsfaktoren erfolgt proportional zu den Flächenanteilen der Einzelkomponenten. Der Ansatz geht von der vereinfachenden Annahme aus, dass es an der betrachteten Oberfläche zu keinen Mehrfachstreuungen kommt, d.h., Strahlung immer nur mit einer der Materialkomponenten interagiert und führt als Näherungsverfahren zu akzeptablen Resultaten.

Das invertierte Modell vollzieht entsprechend eine linear-subtraktive Entmischung des Spektralsignals, auf der Basis der Spektralcharakteristika der Komponenten Boden, Schatten und Pflanze. Zur spektralen Entmischung sind nach Gl. 24 die Endmemberspektren „Boden“ und „Schatten“ einzubeziehen und deren "spektrale Abundanz", d.h. der jeweilige relative Anteil des Signals am Gesamtsignal, der sich aus der Klassifikation der Senkrechtphotos (Tab. 18) ergibt, anzugeben.

$$R_p = \frac{R_t - k_B * R_B - k_S * R_S}{k_P}, \quad \text{wobei } k_P + k_B + k_S = 1 \quad \text{Gl. 24}$$

mit:

$R_t$  : Reflexionsfaktor der Bestandsaufnahme

$R_{P,B,S}$  : Reflexionsfaktoren der spektralen Bestandskomponenten Pflanze, Boden, Schatten

$k_{P,B,S}$  : rel. Anteil (Abundanz) der jeweiligen Komponente am Gesamtsignal  $R_t$

Das Bodenspektrum wird pro Schlag jeweils für die vorherrschende Bodenart erstellt bzw. aus einer verfügbaren Spektralbibliothek abgeleitet. Kommen innerhalb eines Schlates unterschiedliche Bodenarten vor, muss dies auf der Basis der verfügbaren Bodenkartierungen berücksichtigt werden. Für den Schattenanteil wird von der Hypothese ausgegangen, dass dieser keine spektrale Komponente hat und damit nur additiv oder subtraktiv das Signal beeinflusst.

Die Bereinigung der Spektralsignatur ergibt ein "reines" Vegetationsspektrum, das als ein Eingangsdatensatz für die multivariate Analyse zur Ableitung der biochemischen Zustandsparameter verwendet wird. Der Effekt der spektralen Entmischung ist in Abb. 40 für den NIR-Bereich dargestellt. Die Lage der Absorptionsmerkmale der Signaturkurve wird im Allgemeinen durch das Herausnehmen des Boden- und Schattenanteils nicht beeinträchtigt, es zeigt sich aber, dass die Tiefe der Absorptionsbereiche sich verändert und damit die Merkmale deutlicher herausgestellt werden.

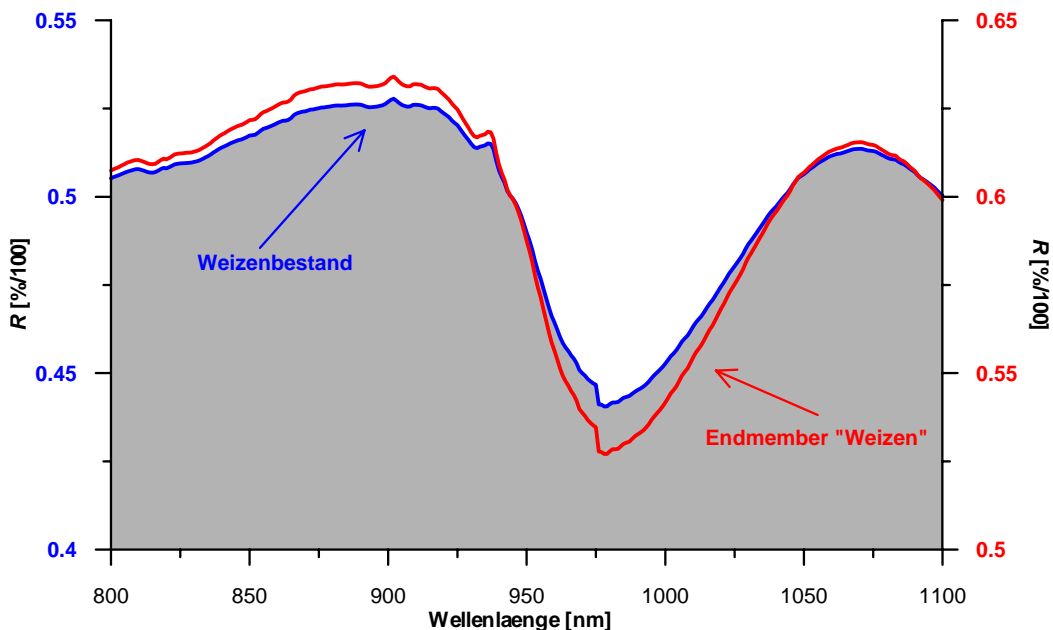


Abb. 40: Spektrale Reflexionskurve im NIR für das kalibrierte Originalspektrum und das "entmischte" Weizenspektrum



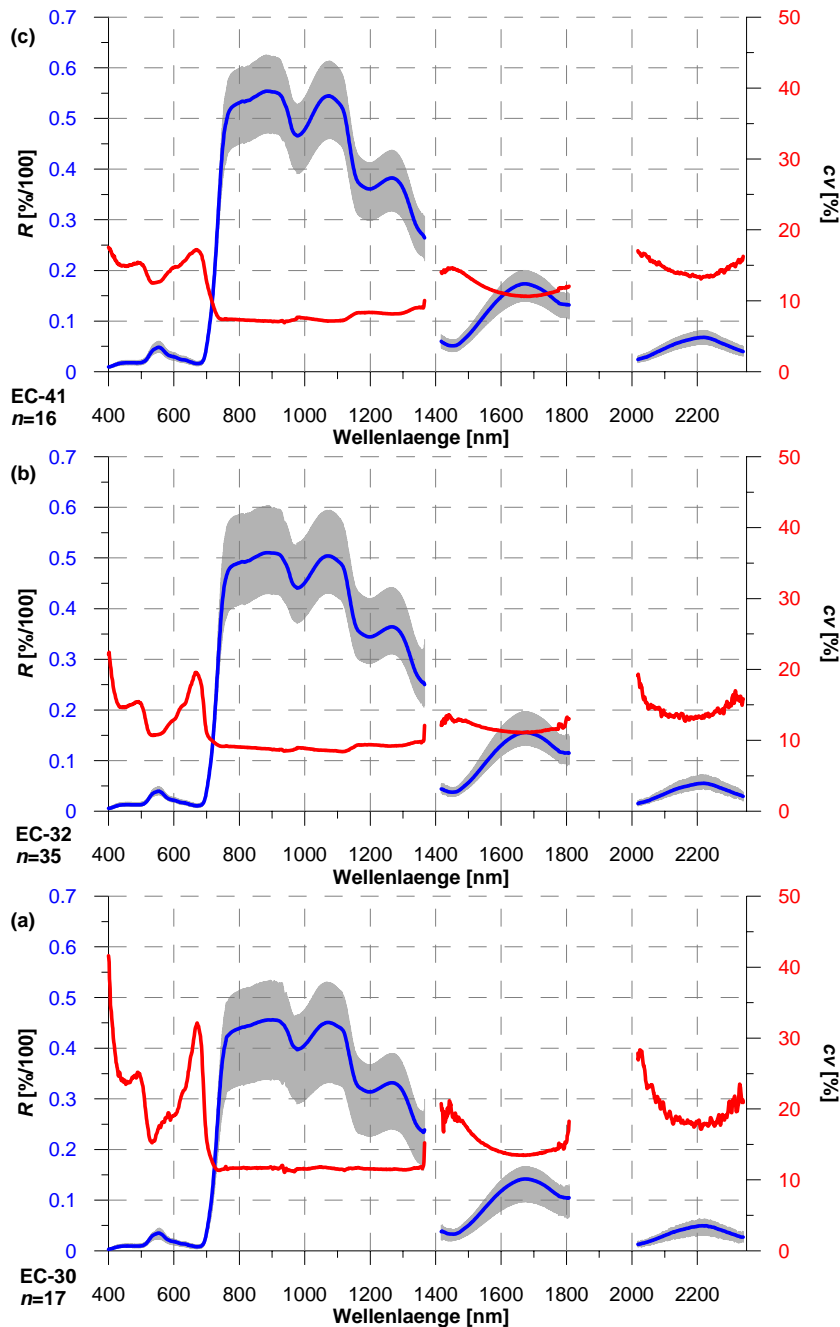
#### 6.4 Deskriptive Auswertung der kalibrierten Messdaten

Die in den vorherigen Kapiteln durchgeführten Kalibrierungsschritte resultieren in absoluten Reflexionsmessungen der Vegetationsoberfläche von Kulturpflanzenbeständen in Abhängigkeit von ihrem phänologischen Entwicklungsstand.

Die phänologische und physiologische Entwicklung der untersuchten Winterweizenbestände kann über den Untersuchungszeitraum als normal angesehen werden. Auffällig ist der Entwicklungssprung des Weizens in der Zeit zwischen dem 03.05. (EC-30) und dem 10.05.2001 (EC-32), der durch die warmen Witterungsbedingungen in diesem Zeitraum hervorgerufen wurde (vgl. Kap. 5.1.4). Obwohl sich die Bruttozusammensetzung der gesamten Pflanzenteile zwischen diesen beiden Entwicklungsstadien nicht entscheidend verändert, führt die vegetative Entwicklung zu einer starken Veränderung des Erscheinungsbildes des Pflanzenbestands. Dies schlägt sich u. a. in einer Änderung der Bodenbedeckung nieder, die während dieser Zeit um ca. 50 % abnimmt. Dieser Effekt wurde durch die digitale Klassifikation der Senkrechtpotos und anschließende subtraktive spektrale Entmischung in Kap. 6.3.3 berücksichtigt. Dennoch verbleibt bei den kalibrierten Messdaten ein signifikanter Versatz der Reflexionsniveaus im NIR und SWIR. Als Konsequenz aus diesen Beobachtungen muss der Datensatz der Spektralsignaturen für die erste Feldkampagne im Untersuchungsgebiet Imbshausen für die weiteren Untersuchungen in zwei Abschnitte getrennt werden (siehe Abb. 41). Des weiteren müssen die Aufnahmen des Schläges "Unter dem Hohenstedter Wege" (vgl. Kap. 3.1.1) separat betrachtet werden, da hier eine andere, kleinwüchsiger Weizensorte angebaut wurde ("Bandit", vgl. Kap. 3.2), was sich ebenfalls signifikant im Reflexionsniveau des NIR niederschlägt.

Sämtliche Feldaufnahmen wurden während der vegetativen Phase des Weizens durchgeführt. In diesem Zeitraum steigt die Blattfläche, die Bestandshöhe, der Deckungsgrad, die Biomasse, der Wassergehalt und die Evapotranspiration des Bestands und parallel dazu nimmt der Anteil des Bodens und damit der Einfluss des Bodensignals auf die Spektralsignatur ab. Gegen Ende der vegetativen Phase, d.h., zu Beginn des Ährenschiebens, wird gewöhnlich der Bestandsschluss erreicht. Bei den untersuchten Schlägen trat dieser bereits in der Endphase des Schossens zum Zeitpunkt der zweiten Feldkampagne im Untersuchungsgebiet Imbshausen ein. Dies ist auch gleichzeitig der Zeitpunkt der maximalen Ausbildung der Blattfläche, welche die dominierende reflektierende Vegetationsschicht im Weizenbestand darstellt und hauptsächlich für die Umwandlung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR, 400 – 700 nm = VIS) in pflanzenverfügbare Energieformen verantwortlich ist (siehe Kap. 2.3.1.1). Während der hochaktiven Phase der Bestandsausbildung und Biomasseproduktion kommt es zu einer maximalen Pigmentabsorption im VIS und ebenfalls zu einer maximalen Absorption elektromagnetischer Strahlung im NIR/SWIR-Bereich durch das in der Pflanze gebundene Wasser. Insgesamt führen die phänologisch-physiologischen Zustandsänderungen zu charakteristischen Veränderungen der Spektralsignatur spektroradiometrischer Feldmessungen, die sich zum Teil auch in den Labormessungen niederschlagen.

Die Diagramme in Abb. 41 zeigen die deskriptiv statistischen Merkmale der Gesamtheit der Spektralsignaturen (absolute Reflexion, sonnstandskorrigiert) für die unterschiedlichen phänologischen Beobachtungsstadien der Schläge "Über dem Eichenbleke" und "Unter dem Echter Wege" (Sorte "Contur"). Die Analyse der Reflexionswerte und der Vergleich der drei Diagramme belegt im Allgemeinen die weiter oben und in Kap. 2.3.1 geäußerten Zusammenhänge zwischen der vegetativen Entwicklung und der spektralen Reflexion von Getreidebeständen.



**Abb. 41:** Graphische Darstellung der deskriptiv statistischen Merkmale der *in situ* Messungen von Weizenbeständen ("Contur") zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien (EC)

Die Tendenz der zunehmenden Absorption im VIS mit steigender Biomasseproduktion ist nur sehr unscharf ausgeprägt. Deutlich nachvollziehbar ist aber die Zunahme der Reflexionswerte im NIR (Zellstruktur, Biomasse) und der damit verbundene starke Rot-Infrarot-Anstieg. Die Wasserabsorptionsbereiche im NIR/SWIR treten ebenfalls mit fortdauernder vegetativer Entwicklung ausgeprägter hervor. In den in Abb. 41 dargestellten Spektren ist dies vor allem im H<sub>2</sub>O-Absorptionsbereich um 1000 nm (2. Oberschwingung und Kombinationsschwingung der OH-Bindungen, siehe Kap. 2.2) sichtbar.

In den entsprechenden Labormessungen der homogenisierten Pflanzenteile (Abb. 42) sind die beschriebenen Zusammenhänge in ihrer Tendenz ebenfalls, wenn auch teilweise schwächer ausgeprägt, sichtbar. Die Absorptionsprozesse im VIS sind trotz der Trocknung der Frischmasse noch relativ stark. Das Reflexionsmaximum im VIS verlagert sich vom grünen zum gelben Bereich (bei ca. 600 nm), während das relative Absorptionsmaximum im blauen

Bereich des VIS nicht mehr auftritt. Dies ist bedingt durch eine starke relative Zunahme der Reflexion zwischen 550 und 600 nm. Eine naheliegende Erklärung für diese Beobachtung ist, dass durch den Abbau des Chlorophylls und der Carotinoide und die damit verbundene relative Zunahme der Reflexion im VIS die Schwingungsprozesse der Bindungen anderer Pflanzenbestandteile in den Vordergrund treten, die bei frischer Pflanzenmasse durch die Chlorophyll-Absorption maskiert werden (siehe hierzu auch Kap. 2.2).

Der NIR-Bereich ist geprägt durch eine starke Zunahme der Reflexionswerte, die absoluten Werte liegen hierbei deutlich über denen der Feldspektren. Dies ist ebenso wie die schwächeren oder ganz fehlenden Absorptionsbereiche im NIR/SWIR auf das Fehlen des in der frischen Pflanze gebundenen Wassers zurückzuführen.

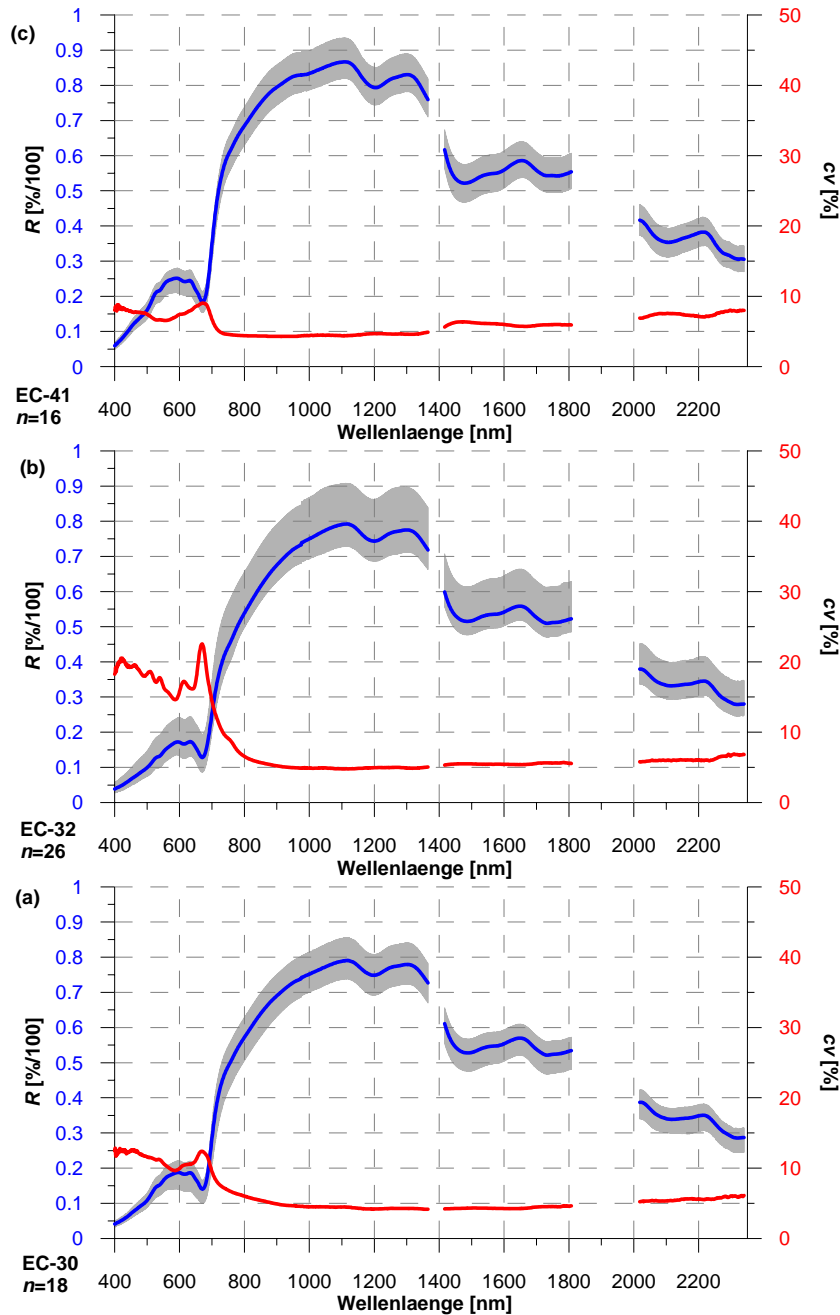


Abb. 42: Graphische Darstellung der deskriptiv statistischen Merkmale der Labormessungen von Winterweizen ("Contur") zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien

Insgesamt lassen sich die Signaturkurven spektroradiometrischer Messungen von Oberflächen vollständig durch Ihre lokalen Extrema (Minima, Maxima, Wendepunkte) beschreiben. Der Informationsgehalt der Spektralsignaturen bezüglich der Ableitung von Zustandsparametern für die Oberflächenbeschreibung muss, aufbauend auf dieser These, ebenfalls in diesen Funktionsmerkmalen enthalten sein. Ein Ziel der weiteren Prozessierungsschritte ist deshalb, diese Spektralmerkmale auf geeignete Weise für eine qualitative und quantitative Analyse aus der Funktionskurve der spektralen Reflexionswerte zu extrahieren.

Als quantitatives Maß für die Variabilität der Messwerte ist neben den Extrema der Variationskoeffizient  $c_v$  der Reflexionsfaktoren in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$  aufgetragen. Dieser gibt die Standardabweichung in Prozent des Betrags des arithmetischen Mittels aller Messungen an (siehe Gl. 17 in Kap. 6.1) und dient als Indikator für den Informationsgehalt der Spektralmessungen an einer bestimmten Wellenlänge  $\lambda$ . Die theoretische Annahme ist, dass der Informationsgehalt mit steigendem Variationskoeffizienten zunimmt. Von dieser Annahme ausgehend sind der VIS und der SWIR-2-Bereich am aussagekräftigsten hinsichtlich der Beurteilung von Vegetationsspektren. Diese These wird durch die Betrachtung von Abb. 37 (Kap. 6.1) eingeschränkt (Hinweis:  $c_v$ -Achse logarithmisch skaliert). Der Vergleich der Abbildungen Abb. 37 und Abb. 41 zeigt, dass hohe Messwertvariabilitäten auch dort auftreten wo, aufgrund systemspezifischer Einflüsse die Messunsicherheit relativ hoch ist (SWIR-2). Das heißt, wenn diese Wellenlängenbereiche in eine multivariate Analyse einbezogen werden sollen, muss bedacht werden, dass statistische Zusammenhänge auch durch zufällige Messwertschwankungen produziert bzw. durch diese maskiert werden können.

Die weiteren Analyseschritte und Modellbildungen zielen auf eine Differenzierung der Bestandsmerkmale innerhalb eines Entwicklungsstadiums, d. h. zu pflanzenbaulich relevanten phänologischen Phasen ab. Hierzu werden die in Abb. 41 und Abb. 42 beschriebenen Datensätze stets getrennt behandelt.

## 6.5 Parametrisierung der Reflexionsmessungen

### 6.5.1 Duale Spektralindizes zur Abbildung natürlicher Oberflächen

Duale Spektralindizes (Vegetationsindizes) setzen sich aus den spektralen Reflexionswerten zweier Wellenlängenbereiche zusammen. In der überwiegenden Anzahl der bekannten Indizes bilden die verwendeten Wellenlängenkanäle jeweils einen Bereich des sichtbaren Lichts (VIS) und einen Bereich des nahen oder mittleren Infrarot (NIR, MIR) ab.

Vegetationsindizes liefern dimensionslose Indexwerte für die Ableitung von Oberflächeneigenschaften, deren Verteilung durch die Verhältnisbildung in den meisten Fällen weniger anfällig ist, sowohl für Schwankungen der Umgebungsvariablen (Atmosphäre, Einstrahlung, Sensoreigenschaften), als auch für Störungen durch Objektmerkmale, welche zu gleichen Teilen in beiden Wellenlängen am Signal beteiligt sind (z. B. Bodenanteil, Schattenanteil). Auf diese Weise ist durch simple Ratiobildung die Vergleichbarkeit von Aufnahmen unterschiedlicher Aufnahmetermine oder auch unterschiedlicher Sensoren möglich, wenn diese identische Wellenlängenbereiche abdecken.

Der bekannteste spektrale Index zur Ableitung der Beziehungen zwischen spektraler Reflexion und dem Zustand natürlicher Oberflächen ist der *NDVI* (*normalized difference vegetation index*), der ursprünglich für die Auswertung von Landsat/MSS-Daten entwickelt wurde (ROUSE et al. 1974).

Das Prinzip des *NDVI* wurde seitdem in zahlreichen Untersuchungen weiterentwickelt. Das Resultat ist eine unüberschaubare Fülle von Vegetationsindizes, die in vielen Fällen eine hohe Redundanz aufweisen und jeweils das Ziel haben, möglichst unabhängig von beeinträchtigenden Umgebungsvariablen den Oberflächenzustand aus Fernerkundungsdaten abzuleiten. Die folgende Zusammenstellung (Tab. 19) gibt einen kurzen Überblick über ausgewählte Indizes, wobei das Auswahlkriterium deren postulierte Eignung zur Ableitung von Biomasse bzw. biomassebildenden Pflanzenkomponenten ist. Ergänzende und ausführlichere Übersichten finden sich z. B. bei BAUSCH & DIKER 2001, ELVIDGE & CHEN 1995, JENSEN 2000 und KNEUBÜHLER 2001.

**Tab. 19: Übersicht ausgewählter dualer Spektralindizes**

Bezeichnung	Formel	Indikator für	Quelle
simple ratio	$SR = \frac{NIR}{R}$	Biomasse / Chlorophyll	BIRTH & McVEY (1968)
normalized difference vegetation index	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	Biomasse / Chlorophyll	ROUSE et al. (1974)
transformed vegetation index	$TVI = \sqrt{\left(\frac{NIR - R}{NIR + R} + 0,5\right)}$	Biomasse / Chlorophyll	DEERING et al. (1975)
plant nitrogen spectral index	$PNSI = \frac{NIR + R}{NIR - R}$	N <sub>Pf</sub> / Chlorophyll	STONE et al. (1996)
nitrogen reflectance index	$NRI = \frac{NIR_i / G_i}{NIR_{ref} / G_{ref}}$	N <sub>Pf</sub> / Chlorophyll	BAUSCH & DUKE (1996)
ratio analysis of reflectance spectra	$RARS_a = \frac{R_{675}}{R_{700}}; RARS_b = \frac{R_{675}}{R_{650}} * R_{700}$	Chlorophyll (a+b)	CHAPPELLE et al. (1992)
pigment specific simple ratio	$PSSR_a = \frac{R_{800}}{R_{680}}; PSSR_b = \frac{R_{800}}{R_{635}}$	Chlorophyll (a+b)	BLACKBURN (1998a)

Die aufgeführten Spektralindizes zeigen laut Ihrer Autoren teils signifikante Korrelationen zu den angegebenen Pflanzenparametern. Aufgrund der in der Regel breiten Wellenlängenbereiche der den Untersuchungen zugrunde liegenden Sensoren kann ein festgestellter Zusammenhang aber nicht mehr als eine Schätzung zwischen Index und Bestandsmerkmal sein. Zur Überprüfung der Zusammenhänge wurden die in Tab. 19 aufgeführten Indizes aus den HyMap<sup>®</sup> und den ASD FieldSpec<sup>®</sup>-Daten berechnet, wobei aus den angegebenen Wellenlängenbereichen durch Angleichung bzw. Mittelung der für die Sensoren jeweils zentrale Wellenlängenkanal ausgewählt wurde. Die Bewertung der Zusammenhänge erfolgt in Kap. 7.4.1.

### 6.5.2 Parametrisierung des Rot-Infrarot-Anstiegs

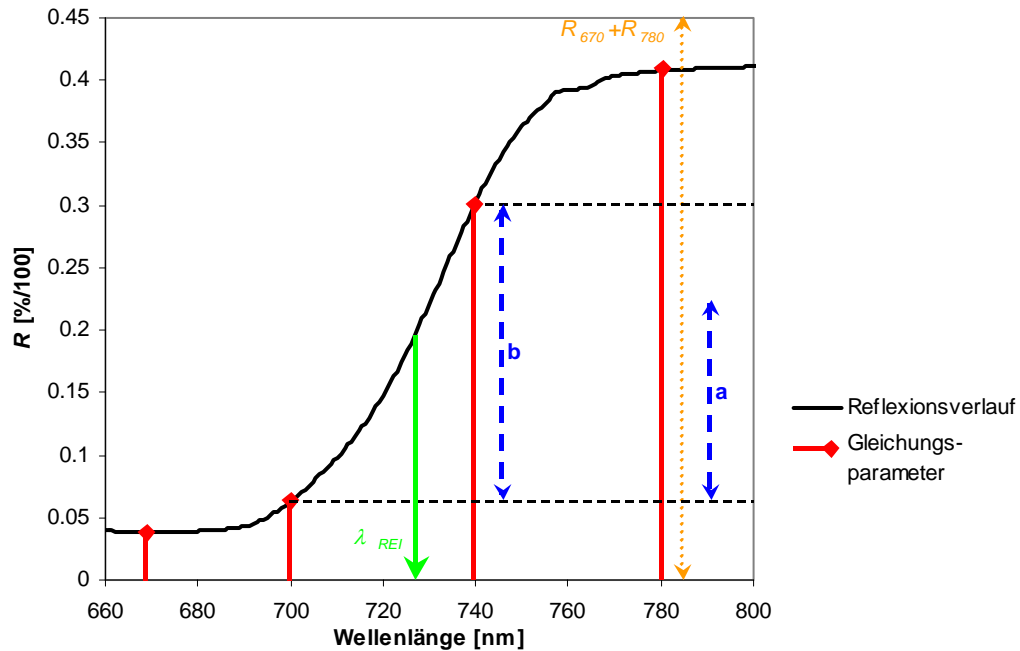
Die bisher beschriebenen Spektralindizes beruhen auf der Restriktion, dass für deren Berechnung immer nur sehr breite Spektralbänder, wie sie von den bekannten Weltraumsensoren abgedeckt werden, berücksichtigt werden können. Diese erlauben die Ableitung von Kennwerten, deren räumliche Schwankungen relative Schwankungen von Pflanzenkennwerten beschreiben können.

Eine andere Möglichkeit zur Parametrisierung des starken Reflexionsanstiegs von Rot zu Infrarot ist die Berechnung der sog. Rotschulter (*red edge index, REI*). Der *REI* bestimmt den Punkt der Signaturkurve zwischen Rot und Infrarot, an dem die Krümmung des Reflexionsverlaufs gleich null bzw. die Steigung am größten ist. Dieser Punkt des Reflexionsverlaufs wird als Beugungswellenlänge (Hauptwendepunkt, HWP) bezeichnet.

Für die Berechnung des *REI* stehen verschiedene, mehr oder weniger komplexe Methoden zur Verfügung. Aus der direkten Umsetzung der gegebenen Definition des *REI* berechnet sich der Hauptwendepunkt als der Punkt, an dem die 1. Ableitung (Steigung) einer Funktionskurve  $f'(\lambda)$  ein relatives Maximum annimmt und/oder für die 2. Ableitung (Krümmung) die Bedingung  $f''(\lambda)=0$  erfüllt ist (HORLER et al. 1983, CLEVERS 2001). Die Verfahren der Kurvenanpassung setzen allerdings eine hohe Anzahl von Funktionsstützstellen (Wellenlängenkanälen) voraus, weshalb sie für die meisten Sensoren nicht anwendbar sind. Trotzdem kann auch bei weniger Stützstellen über eine Polynomannpassung eine Ableitungsanalyse erfolgen (zum Verfahren der Differentialanalyse siehe Kap. 6.6.1).

Eine andere Methode der Funktionsanpassung ist die sog. inverse Gauß-Fit-Methode (BONHAM-CARTER 1988), bei der durch ein iteratives Verfahren der wellenlängenabhängige Verlauf der Reflexionswerte an eine gaußsche Normalverteilung angenähert wird und die durch Anpassung erhaltene Exponentialfunktion durch Invertierung zur zentralen Wellenlänge (HWP) aufgelöst wird. Ebenso wie die Ableitungsmethode erfordert dieses Verfahren eine hohe Stützstellendichte, die bei den meisten abbildenden Sensoren nicht gegeben ist.

Für die weiteren Untersuchungen werden zwei relativ einfache Verfahren der HWP-Berechnung vorgeschlagen. Die einfachste Form der Berechnung des HWP von GUYOT & BARET (1988), betrachtet den Verlauf des Reflexionsanstiegs als lineare Funktion und benötigt lediglich die Reflexionswerte von vier Wellenlängen im VNIR zur Berechnung der Beugungswellenlänge (Abb. 43).



**Abb. 43:** Parametrisierung des REI durch Linearisierung (die Gleichungsparameter gehen aus Gl. 25 und Gl. 26 hervor)

Die lineare Interpolation setzt die Annahme einer geraden Linie als Verbindung zwischen der Wellenlänge der Maximalabsorption im Rot (ca. 670 nm) und einem Maximum der Reflexion im NIR (ca. 780 nm) voraus. Für die Berechnung der Lage des HWP wird zunächst die Reflexion an diesem Punkt geschätzt und ins Verhältnis zum Reflexionswert bei 740 nm gesetzt:

$$R_{REI} = \frac{R_{670} + R_{780}}{2} \quad \text{Gl. 25}$$

$$\lambda_{REI} = 700 + 40 * \frac{a}{b} = 700 + 40 * \frac{R_{REI} - R_{700}}{R_{740} - R_{700}} \quad \text{Gl. 26}$$

mit

$R_{REI}$  = geschätzte Reflexion am Hauptwendepunkt

$\lambda_{REI}$  = Lage des Hauptwendepunktes (Beugungswellenlänge)

Die zweite Methode nach DAWSON & CURRAN (1998) beruht auf einer Drei-Punkt-Interpolation der Wellenlängenkanäle zur Berechnung der 1. Ableitung und einer anschließender Polynomannäherung 2. Grades. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht in der Berücksichtigung der Kurvenform des Rot-Infrarot-Anstiegs. Außerdem ist das Verfahren, im Vergleich zum Ansatz nach GUYOT & BARET (1988), nicht auf das Vorhandensein bestimmter Wellenlängenkanäle angewiesen und der Abstand der Funktionsstützstellen muss nicht konstant sein (DAWSON & CURRAN 1998). Der HWP einer Funktionskurve des Rot-Infrarot-Anstiegs errechnet sich danach durch:

$$\lambda_{REI} = \frac{A(\lambda_i + \lambda_{i+1}) + B(\lambda_{i-1} + \lambda_{i+1}) + C(\lambda_{i-1} + \lambda_i)}{2(A + B + C)} \quad \text{Gl. 27}$$

wobei

$$A = \frac{R'_{i-1}}{(R_{i-1} - R_i)(R_{i-1} - R_{i+1})} \quad B = \frac{R'_i}{(R_i - R_{i-1})(R_i - R_{i+1})}$$

$$C = \frac{R'_{i+1}}{(R_{i+1} - R_{i-1})(R_{i+1} - R_i)} \quad \text{Gl. 28}$$

mit

- $\lambda_{REI}$  : Lage des Hauptwendepunktes (Beugungswellenlänge )  
 $\lambda_i$  : Wellenlängenkanal an dem R' maximal ist  
 $R'_{i, i-1, i+1}$ : Steigung der Reflexionskurve an der Wellenlängenposition  $\lambda_i$  bzw.  $\lambda_{i-1}$ ,  $\lambda_{i+1}$

Die Ergebnisse der REI-Berechnung der ASD FieldSpec<sup>®</sup>-Weizenspektren nach den beiden Methoden sind in Abb. 44 gegeneinander aufgetragen. Die Tendenz der Verschiebung des HWP in den beiden Berechnungen ist sehr ähnlich, was durch das Bestimmtheitsmaß bestätigt wird. Es fällt aber auf, dass der Wertebereich des HWP bei der Methode nach DAWSON & CURRAN (1998) zu kürzeren Wellenlängen verschoben wird. Dies ist bedingt durch den Abstand der Wellenlängenstützpunkte bei der Berechnung des REI. Der REI-Wert liegt beim Verfahren nach DAWSON & CURRAN (1998) immer in einem Bereich  $\lambda_{i-1} < \lambda_i < \lambda_{i+1}$ , wie aus Gl. 27 und Gl. 28 hervorgeht. Für die ASD-Messungen kann demnach der HWP nur in einem Bereich von  $\Delta\lambda_{REI} = \lambda_i \pm 1\text{nm}$  liegen. Der Vorteil des Verfahrens wird eher bei der Anwendung für Sensoren mit einer begrenzten Anzahl unterschiedlich breiter Wellenlängenkanäle deutlich.

Die Wertespanne des REI liegt in der Regel ungefähr zwischen 680 und 760 nm und für die vorliegenden Daten aufgrund der ähnlichen Physiognomie der gemessenen Oberflächen in einem sehr eng begrenzten Bereich um 725 nm, der vom gewählten Verfahren zur HWP-Bestimmung abhängig ist. Die Untersuchung der Sensitivität des REI für die Erkennung von Bestandsmerkmalen und der Vergleich mit den übrigen Spektralindizes ist Gegenstand von Kap. 7.4.1.1.

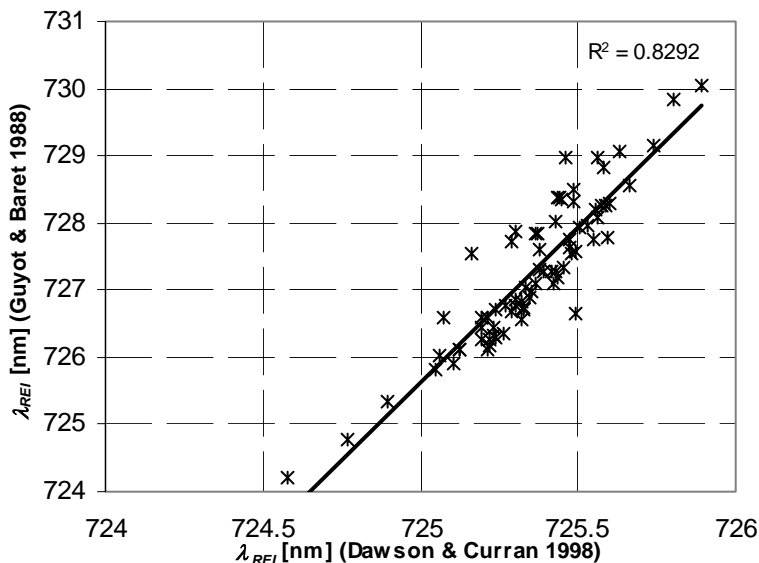


Abb. 44: Lage des Hauptwendepunkts nach unterschiedlichen Interpolationsmethoden



## 6.6 Funktionsanalyse der Spektralsignatur

Die Funktionsanalyse der Spektralsignaturen geht von der Annahme aus, dass die spektralen Reflexionsmessungen eines Objektes an eine kontinuierliche stetige Funktionskurve  $f(\lambda)$  angepasst werden können, d.h., dass die Funktion in jedem Punkt  $\lambda$  differenzierbar ist.

Ein Funktionsmerkmal innerhalb einer Signaturkurve zeichnet sich durch dessen Lage, Tiefe (Wert), Ausdehnung (FWHM) und Form bzw. Steigung aus (Abb. 45). Die für die Spektralanalyse relevanten Funktionsmerkmale sind lokale Minima und Maxima sowie die Hauptwendepunkte (HWP, siehe Kap. 6.5.2) der Funktion.

Die jeweiligen spektralen Merkmalsausprägungen müssen für eine quantitative multivariate Analyse in ein einheitliches Skalenniveau konvertiert werden, damit der Vergleich der einzelnen Spektralkurven miteinander sowie zu den Analysen anderer Untersuchungen gewährleistet ist. Ist eine Kalibrierung der Messwerte nicht, oder nur unzureichend durchführbar, stehen neben den in Kap. 6.5 vorgeschlagenen Parametrisierungsansätzen weitere Normierungsverfahren zur Verfügung, die im Folgenden erläutert werden und deren Nutzen für die multivariate Analyse spektroradiometrischer Messungen in Kap. 7 evaluiert wird.

Hierbei werden grundsätzlich zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt:

- (1) die Transformation basierend auf der Variabilität der Reflexionsfaktoren im Wellenlängenbereich (Frequenzbereich, siehe Kap. 6.6.2)
- (2) die Transformation basierend auf räumlichen Variabilität der Reflexionsfaktoren einer einzigen Wellenlänge (Ortsbereich, siehe Kap. 6.6.3)

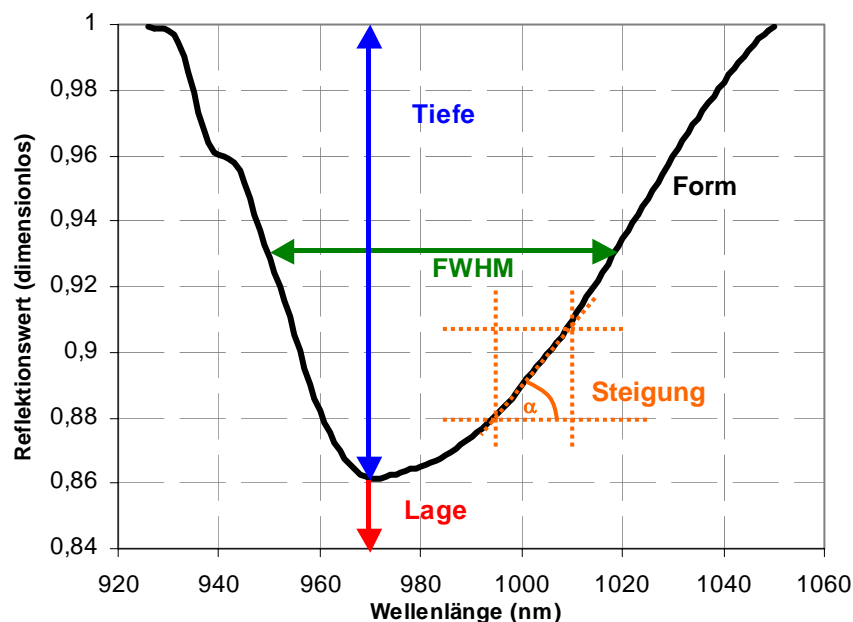


Abb. 45: Deskriptive Merkmale einer Spektralsignatur

Der vorliegende Datensatz der Spektralsignaturen wird für die folgenden Untersuchungen in Form einer Matrix abgebildet. Die Nomenklatur der verwendeten Symbole in den angegebenen Formeln für die Normierungsansätze basiert auf der Zerlegung der Datenmatrix spektraler Reflexionsfaktoren  $R_\lambda$  in  $x$  Spalten und  $y$  Zeilen, welche als Index zu den Reflexionsfaktoren angegeben werden. In den Spalten der Datenmatrix ist der Frequenzbereich und in den Zeilen die räumliche Variabilität enthalten.

### 6.6.1 Ableitung lokaler Extrema

Die Verfahren zur Bestimmung der Bereiche maximaler Steigung einer Spektralsignatur wurden bereits in Kap. 6.5.2 erläutert. Zur Vervollständigung ist in Gl. 29 noch einmal der Ablauf zur Bestimmung des HWP durch die 1. und 2. Ableitung aufgezeigt.

$$\lambda_i = REI, \text{ wenn } \begin{cases} R'_{\lambda} > 0 \\ R''_{\lambda} = 0 \end{cases} \quad \text{Gl. 29}$$

mit

$REI$  : Hauptwendepunkt (Beugungswellenlänge) des Funktionsabschnitts

$R'_{\lambda}$  : Steigung der Reflexionsfunktion an der Wellenlängenposition  $\lambda_i$

Für die quantitative Bestimmung von Oberflächenparametern aus spektralen Reflexionswerten werden daneben im Folgenden die lokalen Minima und Maxima der Funktionskurve detektiert und für die multivariate Analyse extrahiert.

Die Absorptionsbereiche spektraler Reflexionsmessungen können unter der Annahme der Spektralsignatur als eine Funktionskurve durch differentialanalytische Verfahren (Ableitungsanalyse) in Form lokaler Minima dieser Kurve aufgezeigt werden. Ein lokales Minimum einer Funktionskurve  $f(\lambda)=R_{\lambda}$  liegt an der Wellenlänge  $\lambda_i$  vor, wenn für die Ableitungen die folgenden Bedingungen erfüllt sind (vgl. Abb. 46).

$$\lambda_i = \min_{lok}, \text{ wenn } \begin{cases} R'_{\lambda} = 0 \\ R''_{\lambda} > 0 \\ R'''_{\lambda} = 0 \\ R''''_{\lambda} < 0 \end{cases} \quad \text{Gl. 30}$$

mit

$\min_{lok}$  : lokales Minimum des Funktionsabschnitts

$R'_{\lambda}$  : s.o.

Die Einbeziehung der 3. und 4. Ableitung ist aus verfahrenstechnischen Gründen erforderlich, da das entwickelte Funktionsanalyseverfahren nicht absolute bzw. lokale Extrema erkennt, sondern die Ableitungsfunktionen mit Hilfe logischer Operatoren nach den o.g. Entscheidungskriterien durchsucht. Aus Abb. 46 geht hervor, dass die Komplexität bzw. das Rauschen des Messsignals mit der Ableitung der ursprünglichen Funktionskurve zunimmt. Aus diesem Grunde ist es notwendig, auf die Funktionskurve vor der Ableitung einen Frequenzfilter anzuwenden (Kap. 6.2). Zugleich wird deutlich, dass das in Gl. 30 vorgeschlagene Verfahren zu einer eindeutigen Ausweisung der Funktionsabschnitte führt, an denen lokale Minima vorliegen.

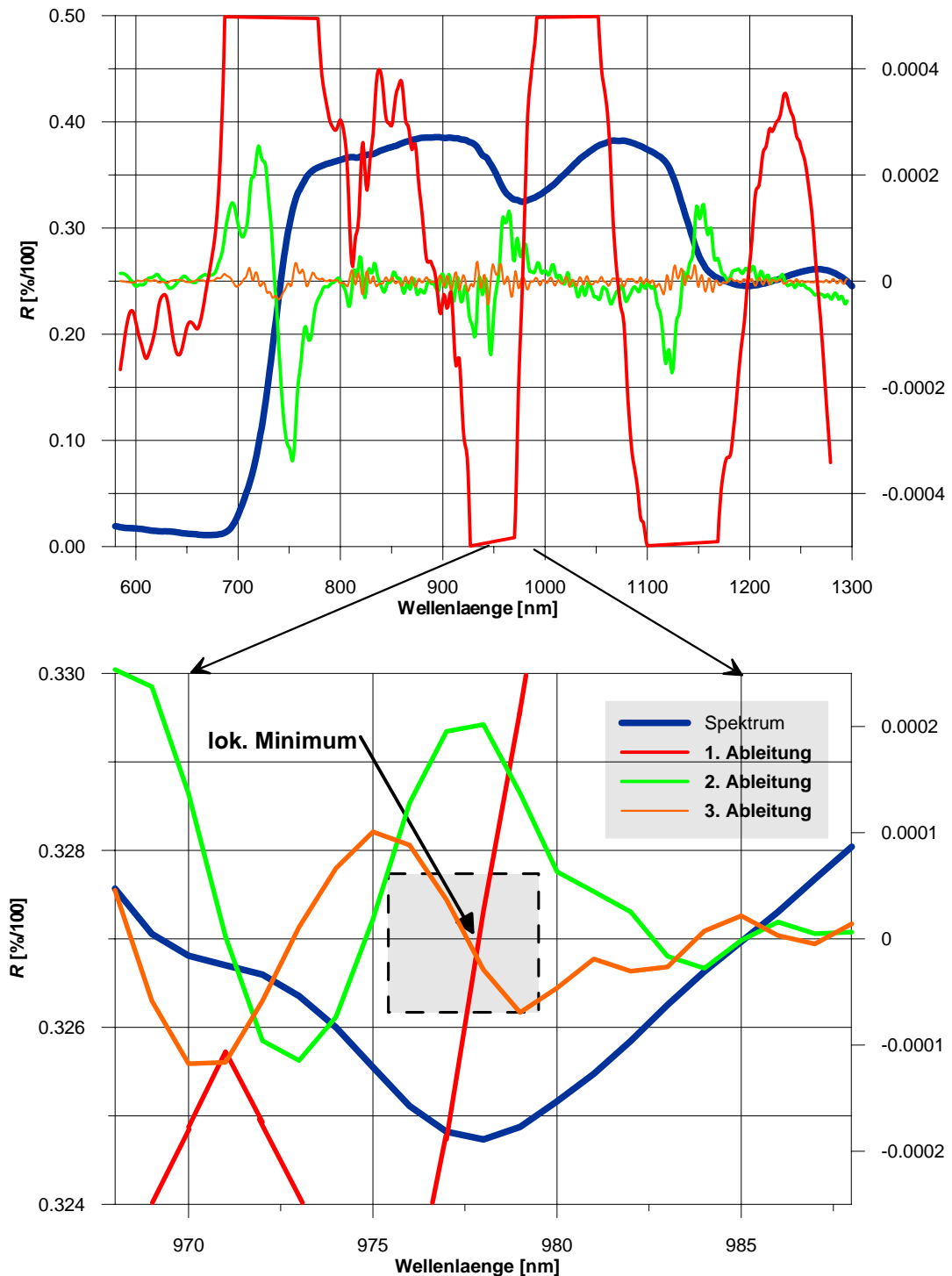
Entsprechend Gl. 30 befindet sich an der Position  $\lambda_i$  ein lokales Maximum der Funktion, wenn gilt:

$$\lambda_i = \max_{lok}, \text{ wenn } \begin{cases} R'_{\lambda} = 0 \\ R''_{\lambda} < 0 \\ R'''_{\lambda} = 0 \\ R''''_{\lambda} > 0 \end{cases} \quad \text{Gl. 31}$$

mit

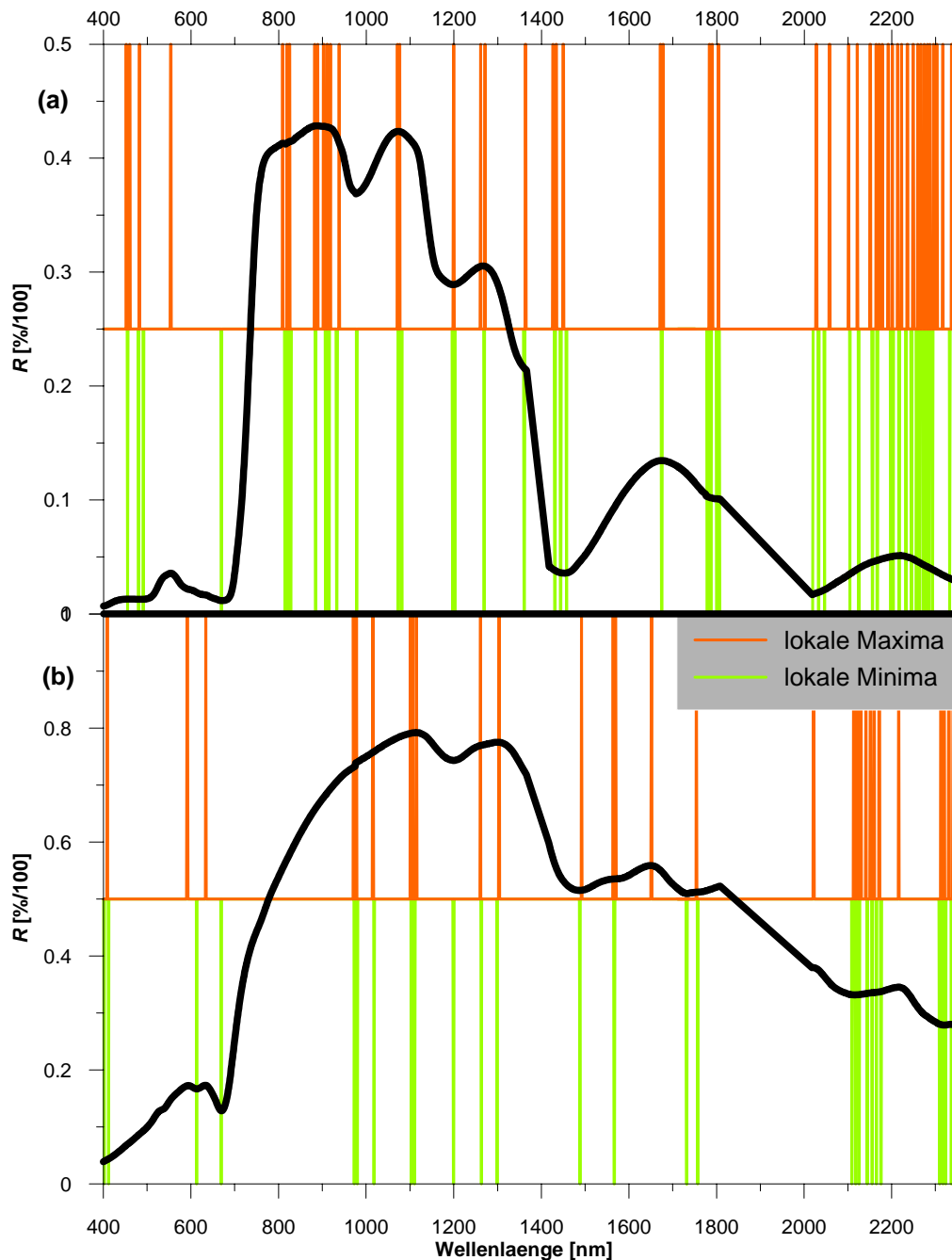
$\max_{lok}$  : lokales Maximum des Funktionsabschnitts

$R'_{\lambda}$  : s.o.



**Abb. 46: Bestimmung lokaler Minima durch Differentialanalyse**

Die Berechnung der Funktions-Ableitungen erfolgt durch eine Drei-Punkt-Interpolation, wie sie ebenfalls in Kap. 6.5.2 für die Parametrisierung des Rot-Infrarot-Anstiegs verwendet wurde. Diejenigen Wellenlängen, für die die o.g. Kriterien zutreffen, werden durch ein Detektierungsverfahren unter Verwendung logischer Operatoren für den gesamten Datensatz automatisch in einer Matrix und in graphischer Form ausgegeben. Das Resultat sind zwei Datensätze von Wellenlängenabschnitten, in denen lokale Minima und Maxima der Funktionskurve für die Spektralsignaturen von Winterweizenbeständen auftreten. Die Ergebnisse der Ableitungsanalyse sind in Abb. 47 in graphischer und in Tab. 20 in tabellarischer Form dargestellt.



**Abb. 47: Lage lokaler Extrema (Durchschnittswerte) spektroradiometrischer *in situ* (a) und Labormessungen (b) von Winterweizenbeständen bzw. -proben**

Neben den aufgrund des charakteristischen Signaturverlaufs zu erwartenden und bereits aus der deskriptiven Analyse (siehe Kap. 6.4) ersichtlichen lokalen Extrema weist die Ableitungsanalyse zusätzlich eine Reihe untergeordneter lokaler Minima der Spektralsignaturen auf, die konsequenter Weise von untergeordneten Maxima umrahmt werden. Insgesamt kann man die Extrema der Funktionskurven hierarchisch gliedern nach Ihrem Einfluss auf die Form der Signaturkurve. Zu den Extrema 1. Ordnung gehören die breiten Chlorophyll- und Wasserabsorptionsbanden. Merkmale 2. Ordnung bilden z. B. die nicht immer sichtbaren Nebenminima der Chlorophyllkomponenten im VIS sowie die übrigen Absorptionsbereiche der Infrarotschulter und als Extrema 3. Ordnung werden die Merkmale im SWIR-2 sowie insgesamt relative Extrema innerhalb übergeordneter Merkmale gruppiert (Tab. 20). Auf diesen Bereichen in Ihrer Gesamtheit liegt das Hauptaugenmerk für die Auswahl geeigneter Spektralmerkmale für die multivariate Datenanalyse in Kap. 7.

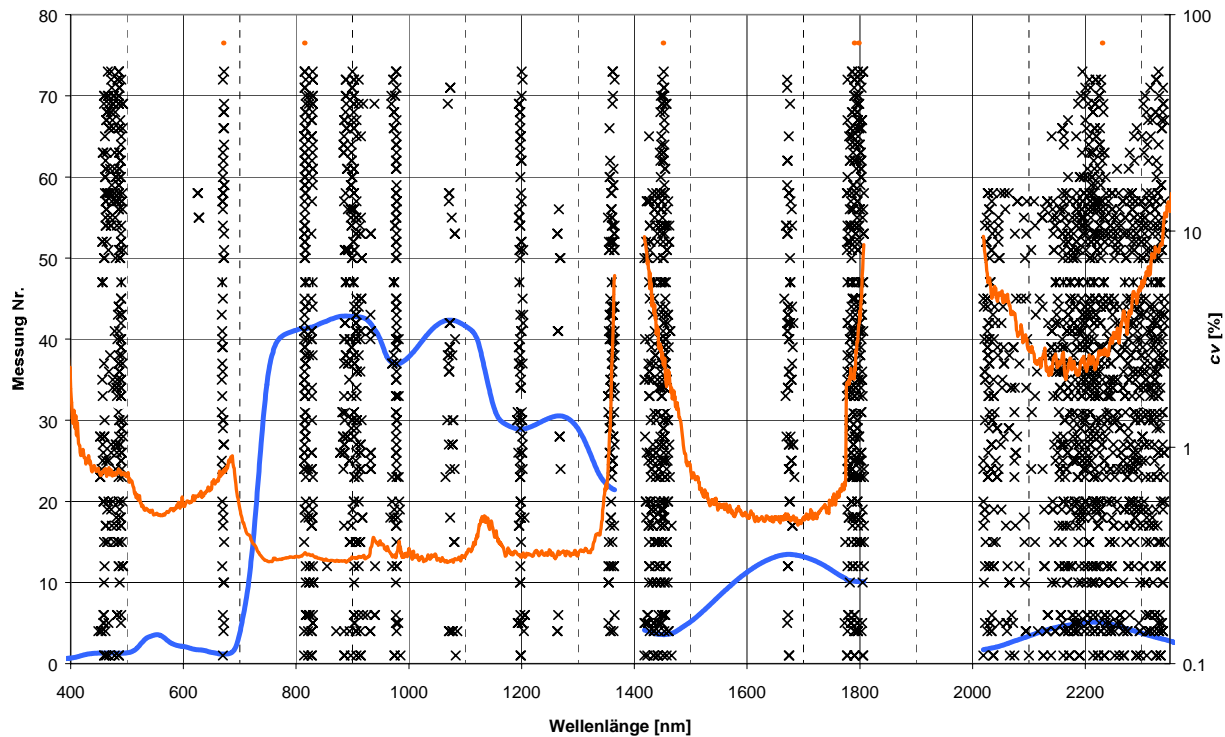
**Tab. 20: Lokale Extrema der Signaturkurven von Winterweizen**  
 (grün = 1. Ordnung, gelb = 2. Ordnung, rot = 3. Ordnung)

<i>in situ</i> Messungen, $\lambda$ [nm]		Labormessungen, $\lambda$ [nm]		
*2	lok. Minima	lok. Maxima	lok. Minima	lok. Maxima
	449 – 493			
				564 – 566
				579 – 600
	625 – 628			631 – 635
	668 – 673			669 – 672
	762 – 768			
	814 – 831			
	855 – 859			
	864 – 940			
	967 – 989			
				960 – 1125
	1101 – 1109			
	1192 – 1206			1190 – 1208
	1263 – 1271			1262 – 1307
	1349 – 1365			
	1418 – 1469			
				1480 – 1493
				1555 – 1578
				1645 – 1659
	1664 – 1687			
	1773 – 1807			
				1730 – 1807
				2019 – 2025
	2019 – 2340			2019 – 2024
				2094 – 2221
				2279 – 2340

Die Ableitungsanalyse der Funktionskurven wird nach dem hier beschriebenen Verfahren jeweils für die *in situ* und für die Laborspektren durchgeführt. Der direkte Vergleich der Extrema für die Labor- und Feldsignaturkurven in Abb. 47 deckt die Übereinstimmungen aber ebenso auch die Abweichungen der Funktionsmerkmale der Feld- und Labormessungen auf. Die Funktionskurven der Feldmessungen sind auf den ersten Blick differenzierter als die entsprechenden Laborspektren. Dies zeigt sich vor allem anhand der Häufung der Extrema im NIR und im SWIR-2-Bereich. Andererseits treten in den Laborspektren Extrema auf, die in den Feldspektren völlig fehlen (z. B. 2. Absorptionsmaximum im VIS-Rotbereich, Extrema im SWIR-1-Bereich zwischen 1480 und 1600 nm). Zieht man für die qualitative Bewertung der Extrema die Ergebnisse der Varianzanalyse aus Kap. 6.1 hinzu, zeigt sich, dass die Häufung der Extrema in den Feldspektren zum Teil in enger Beziehung zur Zunahme der Variationskoeffizienten der Parallelmessungen steht. Das bedeutet, dass Extrema in spektroradiometrischen Feldmessungen neben den eindeutigen absoluten und erstrangigen Minima und Maxima vor allem in Bereichen mit einer hohen Messunsicherheit auftreten. Diese Feststellung wird auch durch die Betrachtung der Extrema über die einzelnen Messpunkte unterstrichen (Abb. 48). Im VIS, NIR und SWIR-1-Bereich treten die lokalen Minima, abgesehen von den Randbereichen der atmosphärischen H<sub>2</sub>O-Absorptionsbanden, mit einer sehr hohen Lagegenauigkeit auf, d.h., sie befinden sich immer in einem Bereich von +/-2 nm zu einer Zentrumswellenlänge, was unter der vom Hersteller angegebenen maximalen Lagegenauigkeit der Wellenlängenkanäle liegt (siehe hierzu Kap. 4.1.3). Im SWIR-2 ist dagegen keine Regelmäßigkeit der Lage der Absorptionsbereiche feststellbar.

Andererseits ist die Anzahl der lokalen Minima und damit der potenzielle Informationsgehalt des SWIR-2-Bereichs gegenüber den anderen Abschnitten des solaren Spektrums um ein Vielfaches höher.

Diese grundlegenden Aspekte, zum einen der hohe potenzielle Informationsgehalt und zum anderen die Messunsicherheiten müssen bei der Bewertung der Merkmale im SWIR-2-Bereich und der eventuellen Verwendung in der multivariaten Analyse berücksichtigt werden.



**Abb. 48:** Lage lokaler Minima (x) der Funktionskurven sowie die Variationskoeffizienten (orange) spektroradiometrischer in situ Messungen für alle Messpunkte (Weizen,  $n=74$ )

## 6.6.2 Skalierung durch Frequenztransformationen

### 6.6.2.1 Kontinuumtransformation

Die Kontinuumtransformation (CR)<sup>22</sup> ist eine gut dokumentierte und etablierte Methode zur Funktionsanalyse in der Absorptionsspektroskopie (CLARK & ROUSH 1984, KRUSE ET AL. 1993).

Die Anfangs- und Endpunkte eines Ausschnittes des Spektrums, in dem ein Absorptionsmerkmal liegt, werden hierbei als lokale Maxima bzw. Referenzwellenlängen  $\lambda_{r1,r2}$  definiert und die dazwischen liegenden Werte werden über eine mathematische Funktion auf eine im einfachsten Falle gerade Verbindungslinie (Kontinuumkurve) zwischen den lokalen Maxima angepasst. Die Division des Originalspektrums durch diese Kontinuumkurve ergibt eine Funktionskurve der transformierten Reflexion, wie sie in Abb. 49 exemplarisch aufgezeigt ist.

$$CR = \frac{R}{R_c} \quad \text{Gl. 32}$$

mit

$CR$  : Kontinuum-transformierter Reflexions- bzw. Absorptionswert

$R$  : ursprünglicher Reflexionswert

$R_c$  : Reflexionswert der Kontinuumkurve

Die Kontinuumtransformation führt zu einer Skalierung der Eingabedaten auf einen normierten Wertebereich von  $0 < R_{CR} < 1$  (Abb. 49).

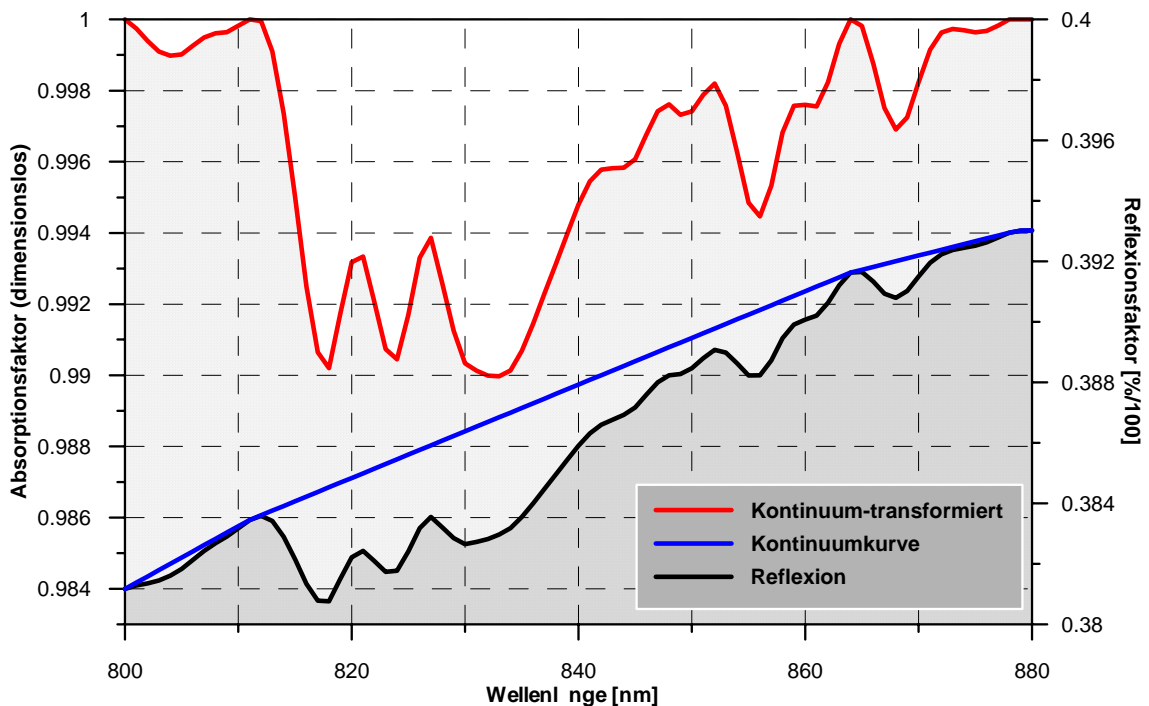


Abb. 49: Skalierung spektraler Reflexionswerte durch Kontinuum-Transformation

<sup>22</sup> synonym: Konvex-Hüll-Transformation; Continuum Removal (CR); Continuum Interpolated Band Ratio (CIBR)

Die zu transformierenden Spektralbereiche bzw. deren Referenzwellenlängen ergeben sich aus den Ergebnissen der Ableitungsanalyse in Kap. 6.6.1. Die Kontinuumbereiche müssen den maximal möglichen Lagebereich des jeweiligen Absorptionsmerkmals (lokale Minima) erfassen. Die Referenzwellenlängen gehen folglich aus den die Maxima umgebenden Spektrumsausschnitten (lokale Maxima) hervor.

Die möglichen Kontinuumbereiche für die Feld- und Laborspektren, die in Tab. 21 und Tab. 22 dargestellt sind, ergeben sich aus den Werten in Tab. 20. Die aus der automatisierten Ableitungsanalyse hervorgegangenen Absorptionsbereiche müssen allerdings differenziert betrachtet werden. Für die Ausweisung eines Kontinuumbereichs kommen nur solche Spektrumsausschnitte in Frage, in denen mindestens ein primäres Absorptionsmerkmal liegt. Die Referenzwellenlängen bilden dementsprechend in der Regel absolute Maxima eines Ausschnittes.

In Tab. 22 sind die Absorptionsbereiche und daraus resultierenden Referenzwellenlängen für die Labormessungen den Kontinuumbereichen anderer Untersuchungen zur Absorptionsanalyse (CURRAN et al. 2001, KOKALY & CLARK 1999) gegenübergestellt. Bei den Arbeiten von KOKALY & CLARK (1999) ist der Wellenlängenbereich auf das SWIR begrenzt. In keiner der Untersuchungen wird eine Angabe über das Auswahlverfahren für die Festlegung der Referenzwellenlängen gemacht. Aus den Vergleichen wird im Allgemeinen ersichtlich, dass die Referenzwellenlängen für die Kontinuumtransformation relativ ähnlich sind, was bei den primären Absorptionsbereichen natürlich auf den Charakter der Funktionskurve zurückzuführen ist. Sollen die Auswertungen der Kontinuum-transformierten Daten in Ihren Aussagen vergleichbar sein, ist für künftige Untersuchungen die Festlegung auf einheitliche Referenzwellenlängen vorzuschlagen, bzw. die Einhaltung eines nachvollziehbaren Auswahlverfahrens zu deren Festlegung. Das in Kap. 6.6.1 entwickelte differentialanalytische Verfahren ist zu diesem Zwecke gut geeignet, da es in der Lage ist, ohne *a priori*-Kenntnis über einen Datensatz, dessen wesentliche Merkmale zu extrahieren.

**Tab. 21: Lokale Minima der Feldspektren und daraus abgeleitete Referenzwellenlängen für die Kontinuumtransformation von Vegetationsspektren (Frischmasse)**

lokales Minimum, $\lambda$ [nm]		Kontinuumbereich, $\lambda$ [nm]
625 – 628 668 – 673*	⊃	560 – 750
814 – 831 855 – 859	⇒	800 – 880
864 – 940 967 – 989	⇒	880 – 1050
1101 – 1109 1192 – 1206	⊃	1090 – 1270
1418 – 1469	⇒	1420 – 1480
1773 – 1807	⇒	1770 – 1807
	⇒	2015 – 2220 2250 – 2340



**Tab. 22: Lokale Minima der Laborspektren und daraus abgeleitete Referenzwellenlängen für die Kontinuumtransformation von Vegetationsspektren (Trockenmasse)**

lokales Minimum $\lambda$ [nm]	eigene Erhebungen	Kontinuumbereich, [nm]	
		CURRAN et al. (2001)	KOKALY & CLARK (1999)
	⇒ 595 – 720		
963 – 1127			
	⇒ 1130 – 1290		
1475 – 1496 1557 – 1581 1647 – 1654	⇒ 1450 – 1650		
1728 – 1806	⇒ 1650 – 1850	1634 – 1786	1652 – 1778
2019 – 2025 2094 – 2221	⇒ 2015 – 2225	2006 – 2196	2030 – 2218
2278 – 2340	⇒ 2225 – 2340	2222 – 2378	2238 – 2366

Wenn vergleichende Untersuchungen unterschiedlicher Datensätze bzw. unterschiedlicher Messkonfigurationen beabsichtigt sind, ist man in den meisten Fällen auf Konventionen zur Festlegung der Grenzwellenlängen angewiesen, da die Absorptionsbereiche in der Regel nicht kongruent sind. Um die Ergebnisse der Laborspektroskopie auf die Feldmessungen anwenden zu können, werden deshalb einheitliche Kontinuumbereiche festgelegt. Diese ergeben sich aus der Auswertung der lokalen Extrema und Modifikation der Referenzwellenlängen aus Tab. 21 und Tab. 22 durch die visuelle Interpretation der Signaturverläufe sowie aus den bekannten theoretischen Beziehungen zwischen spektraler Reflexion und Stoffwechselprodukten von Kulturpflanzen (siehe hierzu Tab. 4 und CURRAN 1989). Die Kontinuumtransformationen beschränken sich folglich auf diejenigen Spektrumsabschnitte, in denen lokale Minima höherer Ordnung bzw. eine Häufung niederer Extrema auftreten (siehe hierzu Kap. 6.6.1 und Tab. 20) und bei denen potenziell Rückschlüsse auf die Konzentration von Pflanzenkomponenten möglich sind (Tab. 23).

**Tab. 23: Kontinuumbereiche für die Vegetationsspektroskopie zur Schätzung biochemischer Komponentenkonzentrationen**

Spektralbereich	Kontinuumbereich [nm]	potenziell beeinflussende biochemische Pflanzenkomponenten
VNIR	580 – 750	Chlorophyll a, b
NIR	800 – 880	Zellulose, Wasser
NIR	880 – 1050	Protein (Stickstoff), Fettsäuren, Wasser, Stärke
SWIR-1	1100 – 1280	Wasser, Zellulose, Stärke, Lignin
SWIR-2	2015 – 2220	Protein, Stickstoff, Zellulose, Zucker, Stärke
SWIR-2	2230 – 2340	Protein, Stickstoff, Zellulose, Zucker, Stärke, Fettsäuren

### 6.6.2.2 Normierung auf die Absorptionstiefe

Die **BNC**-Skalierung (**b**and depth **n**ormalised to band depth at **c**entre of absorption feature) vollzieht, als Erweiterung der Kontinuumtransformation, eine relative Normierung der Absorptionstiefe an einer Wellenlänge  $\lambda_a$  auf einen Bezugswert innerhalb des Absorptionsbereichs (Zentrumswellenlänge  $\lambda_m$ , siehe Abb. 50).

$$BNC = 1 - \frac{D_a}{D_m} \quad \text{Gl. 33}$$

mit

- $BNC$  : Absorption, normiert auf die Absorptionstiefe  
 $D_a$  : Absorptionstiefe an der Wellenlänge  $\lambda_a$   
 $D_m$  : Absorptionstiefe an der Zentrumswellenlänge  $\lambda_m$

Die Absorptionstiefe  $D$  kann auf zwei Wegen bestimmt werden:

- (1) als Differenz zwischen kontinuumnormierten Reflexionswert  $R_{cr}$  und Kontinuumkurve  $R_c$
- (2) als Differenz zwischen nicht transformiertem Reflexionswert  $R$  und dem Reflexionswert der näher gelegenen Referenzwellenlänge,  $R_1$  bzw.  $R_2$ .

In Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die **BNC**-Skalierung ausschließlich für vorher Kontinuum-transformierte Bereiche durchgeführt. Die **BNC**-Skalierung liefert identische Werte wie die Kontinuumtransformation, wenn der betrachtete Absorptionsbereich Spiegelsymmetrie zur Zentrumswellenlänge aufweist. Das Resultat sind jeweils Werte  $-1 < BNC < 1$  (Referenzwellenlänge  $\lambda_{r1}$ ,  $\lambda_{r2}$ ) für die normierten Absorptionsfaktoren. Durch die relative Normierung auf die Zentrumswellenlänge  $\lambda_m$  ist nicht mehr die absolute Tiefe des Absorptionsbereichs entscheidend für die Ausprägung des normierten Absorptionsfaktors, sondern das Verhältnis eines Absorptionswerts zu seiner Umgebung steht im Vordergrund der Untersuchungen.

Die **BNC**-Methode für kontinuumnormierte Spektren wurde von KOKALY & CLARK (1999) sowie CURRAN et al. (2001) für einen Datensatz von Laborspektren getestet, welche zu unterschiedlichen biochemischen Komponenten (Stickstoff, Lignin, Cellulose) in Beziehung gesetzt wurden<sup>23</sup>.

### 6.6.2.3 Normierung auf die Steigung

Eine Fortführung der Grundidee, auf der die Entwicklung der **BNC**-Skalierung basiert, ist die Normierung der Absorptionsfaktoren auf die Steigung eines Signaturabschnitts. Ebenso wie bei der **BNC**-Methode erfolgt bei der **SNC**-Skalierung (**SNC**, band slope **n**ormalised to slope at **c**enter of absorption feature) eine relative Normierung auf einen Bezugswert innerhalb des betrachteten Funktionsabschnitts.

Das **SNC**-Verfahren basiert auf der Verwendung der Winkelsätze für rechtwinklige Dreiecke (siehe Gl. 34). Im Zähler des **SNC**-Quotienten steht das Streckenverhältnis des Ordinatenabschnitts von der Referenzwellenlänge zur Wellenlängen  $\lambda_a$  zur Absorptionstiefe an dieser Wellenlänge. Im Nenner befindet sich der entsprechende Quotient für die Zentrumswellenlänge  $\lambda_m$  (siehe Abb. 50). Dort wo das Streckenverhältnis dem der Zentrumswellenlänge entspricht, gilt  $SNC=0$ .

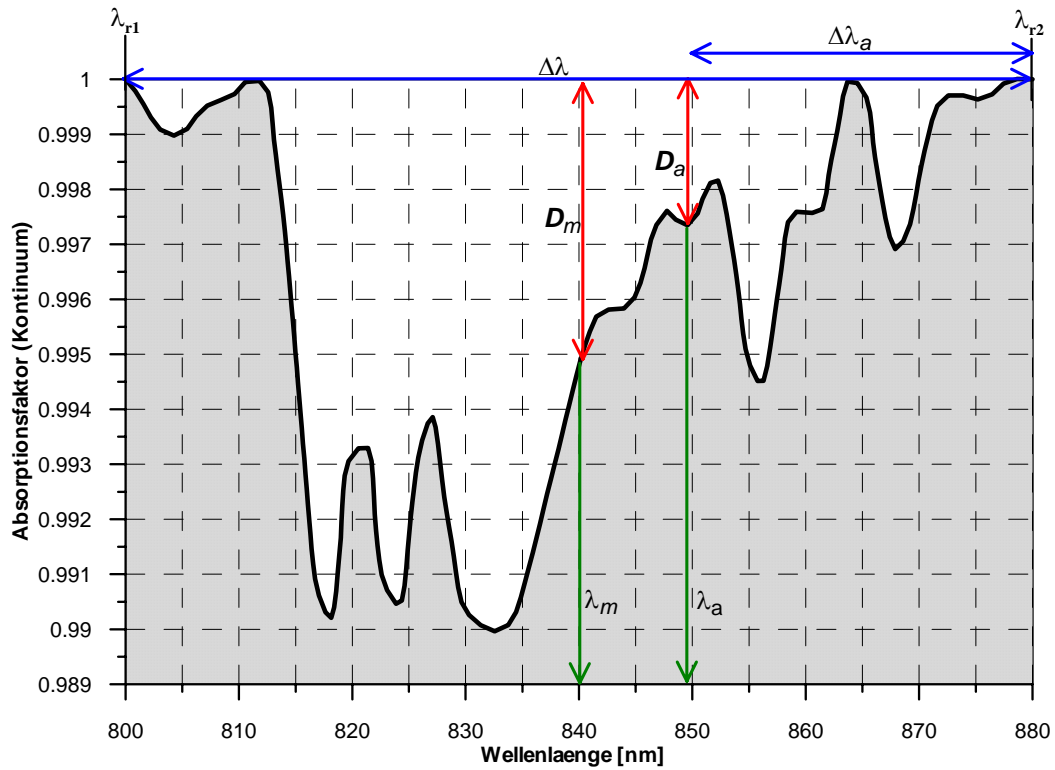
<sup>23</sup> Die Datenerhebungen und Untersuchungen waren Teil des umfangreichen *Accelerated canopy chemistry program* (ACCP) der NASA (NASA, 24.08.2001: <http://www-eosdis.ornl.gov/daacpages/accp.html>).

$$SNC = 1 - \left( \frac{D_a}{\Delta\lambda_a} / \frac{2D_m}{\Delta\lambda} \right) \quad \text{Gl. 34}$$

mit

$\Delta\lambda$  : Wellenlängenabschnitt zwischen den Referenzwellenlängen  $\lambda_{r1}$  und  $\lambda_{r2}$

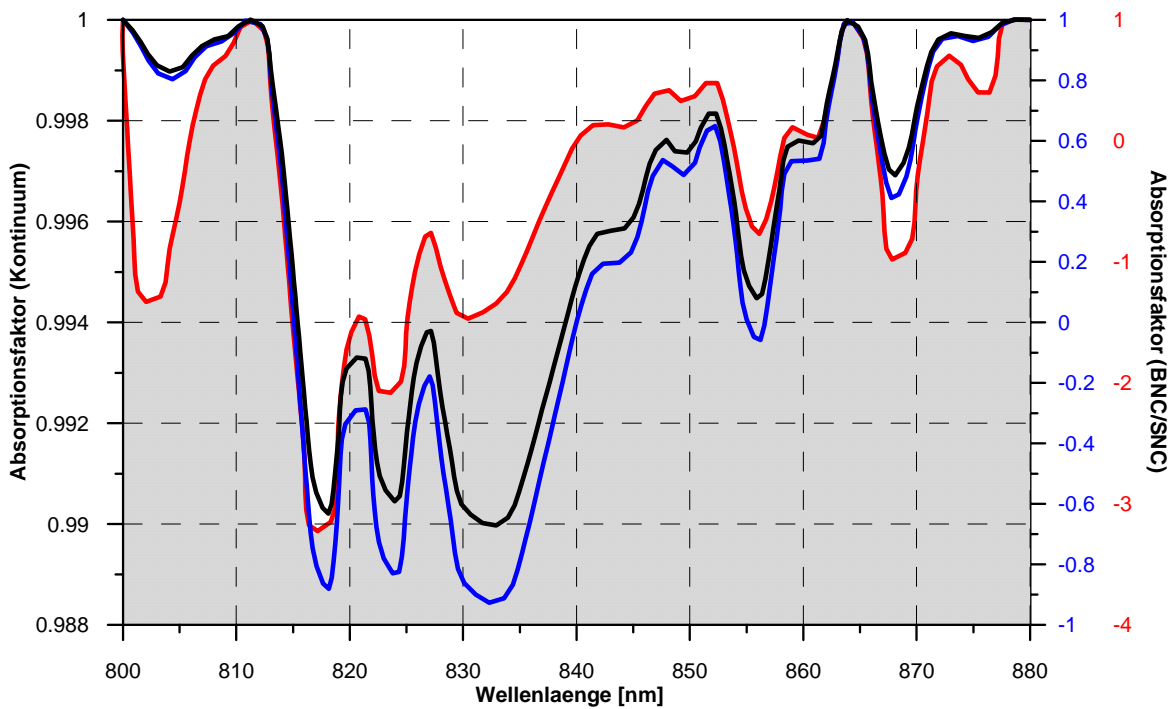
$\Delta\lambda_a$  : Differenzbetrag zwischen  $\Delta\lambda$  und  $\lambda_a$



**Abb. 50:** Funktionsparameter für die Skalierung der Kontinuum-transformierten Absorptionsspektren durch Normierung auf die Bandtiefe (*BNC*) und auf die Steigung (*SNC*)

Ebenso wie die *BNC*-Skalierung weist die Form des Signaturverlaufs der *SNC*-skalierten Werte für spiegelsymmetrische Signaturabschnitte keine Unterschiede zu der kontinuumnormierten Funktionskurve auf, die als Eingangsdatensatz verwendet wird. In den meisten Fällen ist die Symmetrie des Funktionsabschnitts durch die Kontinuumtransformation annähernd gegeben. Im Zentrum des Kontinuumbereichs liegt in der Regel ein Absorptionsmerkmal höherer Ordnung vor, dessen Bandtiefe quantifiziert werden soll. Innerhalb der breiten Absorptionsbereiche, die in der Regel von  $H_2O$ -Absorptionsprozessen dominiert werden, liegen immer auch Absorptionsmerkmale niedrigerer Ordnung vor (siehe Tab. 20), die durch die primären Absorptionsbanden zum Teil maskiert werden.

Die *SNC*-Skalierung hebt diese Merkmale hervor, indem sie die Asymmetrien im Signaturverlauf und damit die Form der Funktionskurve bewertet (Abb. 51). Hierdurch werden die untergeordneten Extrema (hier: Maxima 2. Ordnung) eines Absorptionsbereiches gegenüber dem primären Absorptionsmerkmal stärker hervorgehoben. Dies ist insofern von Bedeutung, als dass das betreffende Absorptionsmerkmal der jeweiligen biochemischen Komponente in den meisten Fällen nicht mit dem primären Absorptionsmaximum zusammenfällt, bzw. von den Prozessen der  $H_2O$ -Absorption (oder anderer Komponenten) in der Pflanze überlagert wird. Aus diesem Grunde wird der entwickelten Methode ein hohes Potential vor allem zur Analyse von *in situ* Vegetationsaufnahmen beigemessen.



**Abb. 51: Vergleich der Kontinuum-basierten Skalierungsverfahren**

Bei der Verwendung der *SNC*-skalierten Daten für die multivariate Analyse ist zu beachten, dass durch die Transformation entsprechend die absoluten Minima der Funktionsabschnitte vernachlässigt werden, weshalb ggfs. auf zusätzliche Spektralmerkmale zurückgegriffen werden muss (siehe hierzu Kap. 7.3).

#### 6.6.2.4 Sonstige Skalierungsansätze im Frequenzbereich

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Kontinuum-basierten Normierungsansätze beziehen sich direkt auf ein Merkmal des zu betrachtenden normierten Absorptionsbereichs und führen zur Veränderung der Formparameter des Merkmals (Lage, Tiefe oder Steigung; vgl. Kap. 6.6.2.1 bis 6.6.2.3).

Die weiteren hier skizzierten Transformationsansätze berücksichtigen jeweils den gesamten aufgenommenen Spektralbereich bei der Bildung normierter Reflexionsfaktoren. Ob für die im Folgenden beschriebenen Ansätze die gesamte aufgenommene Spektralsignatur oder nur ein für die weiteren Schritte reduzierter Signaturausschnitt (bestimmte Absorptionsbereiche) herangezogen wird, ist für den Effekt der Transformation unerheblich. Bei der Interpretation der Transformationsergebnisse und dem Vergleich mit standortübergreifenden transformierten Messungen ist jedoch immer auch der Eingabebereich für die jeweilige Transformationsgleichung zu berücksichtigen.

Sämtliche Verfahren beruhen jeweils auf einer linearen Kombination unterschiedlicher deskriptiver Lage- und Verteilungsparameter der Funktionskurve, die in allgemeingültiger Form auf beliebige metrisch skalierte Datensätze angewendet werden können. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über die am häufigsten verwendeten Frequenz-Transformationen zur Funktionsanalyse<sup>24</sup>. Die Auswirkungen der Skalierungsansätze auf die Spektralsignatur sind in Abb. 52 wiedergegeben.

<sup>24</sup> Für nähere Erläuterungen der Skalierungsgleichungen wird auf die Beschreibung der entsprechenden Ortstransformationen in Kap. 6.6.3 verwiesen.

**Zentrierung (Frequenz)**

$$R_{FZ} = R - \bar{R}_x \quad \text{Gl. 35}$$

mit

$$\bar{R}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad : \text{ Mittelwert der Reflexionsfaktoren im Spektralbereich } \Delta\lambda$$

$$R_{FZ} \quad : \text{ zentrierter Reflexionsfaktor (Frequenzbereich)}$$

**Histogrammskalierung (Frequenz)**

$$R_{FH} = \frac{R - R_x^{\min}}{R_x^{\max} - R_x^{\min}} \quad \text{Gl. 36}$$

mit

$$R_{FH} \quad : \quad \text{skaliertes Reflexionsfaktor, normiert auf die Extremwerte } R_x^{\min}, R_x^{\max}$$

$$R_x^{\min}, R_x^{\max} \quad : \quad \text{kleinster bzw. größter Wert für den Reflexionsfaktor innerhalb des Spektralbereichs } \Delta\lambda$$

**Standardskalierung (Frequenz)**

$$R_{FS} = \frac{R - \bar{R}_x}{\sigma_x} \quad \text{Gl. 37}$$

mit

$$R_{FS} \quad : \quad \text{skaliertes Reflexionsfaktor, normiert auf die Standardabweichung } \sigma_x$$

$$\sigma_x \quad : \quad \text{Standardabweichung der Reflexionsfaktoren im Spektralbereich } \Delta\lambda$$

**Vektorskalierung (Frequenz)**

$$R_{FV} = \frac{R_{FT}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_x)^2}} \quad \text{Gl. 38}$$

mit

$$R_{FV} \quad : \quad \text{skaliertes Reflexionsfaktor, normiert auf die Quadratsumme der Reflexionswerte } R_x$$

$$R_{FT} \quad = \quad R_{FZ} \text{ oder } R_{FH} \text{ oder } R_{FS}$$

Sämtliche hier vorgeschlagenen Transformationsprozesse führen zu einer Verschiebung der Reflexionswerte auf der Ordinatenachse und einer Zentrierung um einen Mittelwert der transformierten Werteverteilung (Abb. 52).

Die Anwendung eines Verfahrens zur linearen Frequenztransformation ist, wenn keins der anderen erläuterten Verfahren in Frage kommt, für die Transformation auf einen einheitlichen Wertebereich notwendig. Die Auswahl für ein bestimmtes der hier vorgestellten Verfahren sollte sich an der Eignung des skalierten Datensatzes für die multivariate Analyse in Kap. 7.3.2 orientieren. Diese setzt wie die vorab in Kap. 7.3.1 durchzuführende Korrelationsanalyse die Normalverteilung der Einflussvariablen für die Modellierung von Zielvariablen bzw. zur Bestimmung des Ausmaßes von Zusammenhängen voraus. Die Häufigkeitsverteilung der nach den Frequenztransformationen skalierten Variablen ist Abb. 53 zu entnehmen. Hieraus wird zum Einen deutlich, dass die nicht-skalierten Reflexionsfaktoren dieser Vorgabe nicht entsprechen und dass nur die **Vektorskalierung** ( $R_{FV}$ ) eine Transformation auf einen

annähernd normalverteilten Wertebereich ermöglicht, unter gleichzeitiger Beibehaltung der Charakteristik der ursprünglichen Verteilung (siehe Ausreißerwerte im linken Abszissenabschnitt). Die zentrierten Reflexionswerte sind ebenfalls normalverteilt, allerdings unter Umkehrung der Vorzeichen, was auf die multivariate Analyse keinen Einfluss hat.

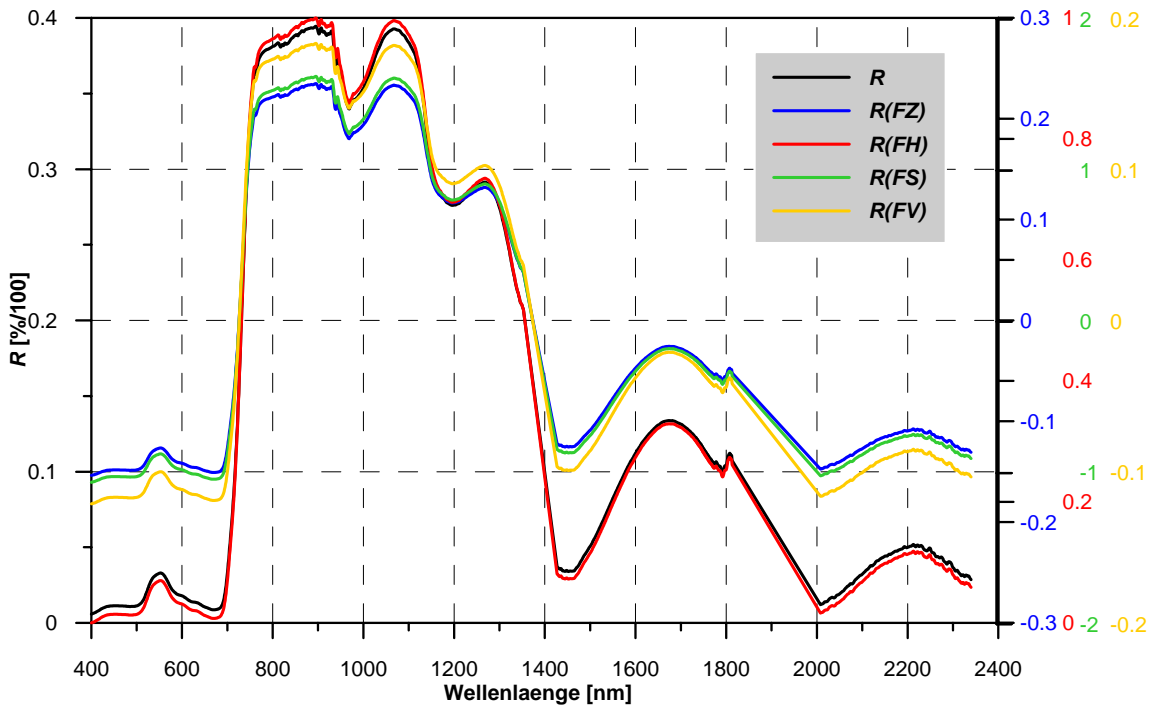


Abb. 52: Skalierung der *in situ* Messungen durch lineare Frequenztransformation

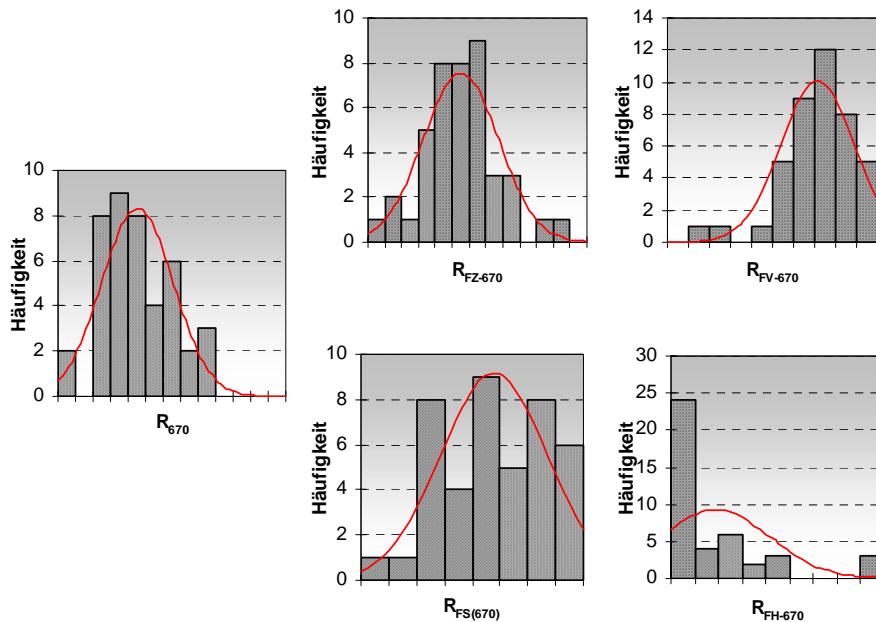


Abb. 53: Häufigkeitsverteilung der Reflexionsfaktoren (*in situ* Messungen) in Abhängigkeit vom Skalierungsverfahren (Frequenzbereich,  $n=42$ )

### 6.6.3 Skalierung durch Ortstransformationen

Im Gegensatz zu den im vorherigen Kapitel dargestellten Skalierungsmethoden berücksichtigen die folgenden Verfahren die Variabilität der Datenmatrix in der Raumachse (Ortsbereich). Beide Ansätze haben das gemeinsame Ziel der Standardisierung der Reflexionsfaktoren. Während die Frequenz-Transformationen Ergebnisse liefern, welche auch auf andere Datensätze übertragbar sind (absolute Normierung), steht bei den Orts-Transformationen die Normierung auf das jeweilige Untersuchungsgebiet bzw. auf den jeweils erhobenen Datensatz im Vordergrund (relative Normierung). Die Normierung über den gesamten Datensatz für eine Wellenlänge setzt voraus, dass die erhobenen und zu skalierenden Daten eine unimodale Verteilung darstellen. Das bedeutet, dass die Skalierung immer nur für Vegetationsspektren vergleichbarer phänologischer und physiologischer Zustände durchgeführt werden kann.

#### Zentrierung

Die Zentrierung stellt das einfachste Verfahren zur Normierung normalverteilter Werte eines Datensatzes dar. Die Einzelwerte werden hierbei auf den Mittelwert der Verteilung bezogen und entlang der Ordinatenachse verschoben, entweder durch Division ( $R_{OZ1}$ ) oder durch Subtraktion ( $R_{OZ2}$ ).

$$R_{OZ1} = R - \bar{R}_y \quad \text{Gl. 39}$$

$$R_{OZ2} = \frac{R}{\bar{R}_y} \quad \text{Gl. 40}$$

mit

$R_{OZ}$  : zentrierter Reflexionsfaktor (Ortsbereich)

$\bar{R}_y$  : Mittelwert der Reflexionsfaktoren für die Wellenlänge  $\lambda_y$

Hieraus ergeben sich für die Subtraktions-Zentrierung Werte  $-1 < R_{OZ1} < 1$  und für die Divisions-Zentrierung Werte  $0 < R_{OZ2} < 2$ .

Die Zentrierung durch Division entspricht einer relativen Standardisierungsmethode, wie sie in der abbildenden Spektroskopie zur Kalibrierung radiometrisch unkorrigierter abbildender Hyperspektralaufnahmen verwendet wird. Die IARR-Methode (Internal Average Relative Reflectance) beinhaltet entsprechend Gl. 40 eine relative Normierung auf den Mittelwert eines Bildkanals bzw. der spektralen Reflexion in einem bestimmten Wellenlängenbereich. Im Falle von unkorrigierten Strahldichteaufnahmen führt die Korrektur zur Berechnung von relativen Reflexionswerten, welche nur für den gewählten Bildausschnitt gültig sind (SCHOWENGERDT 1997).

#### Histogramm-Skalierung (Ort)

Die Skalierung auf einen einheitlichen Wertebereich unter Berücksichtigung der Extrema der Verteilung erreicht man durch die Histogramm-Skalierung.

$$R_{OH} = \frac{R - R_y^{\min}}{R_y^{\max} - R_y^{\min}} \quad \text{Gl. 41}$$

mit

$R_{OH}$  : skaliertes Reflexionsfaktor, normiert auf die Extremwerte  $R_y^{\min}$ ,  $R_y^{\max}$

$R_y^{\min}$ ,  $R_y^{\max}$  : kleinster bzw. größter Wert für den Reflexionsfaktors einer bestimmten Wellenlänge  $\lambda_y$

Die skalierten Reflexionswerte erreichen Werte im Bereich  $0 < R_{OH} < 1$ .

**Standardskalierung (Z-Transformation) (Ort)**

Der transformierte Reflexionswert  $R_{OS}$  gibt die Abweichung vom Mittelwert der Reflexionsfaktoren an der Wellenlänge  $\lambda_y$  als Vielfaches der Standardabweichung an.

$$R_{OS} = \frac{R - \bar{R}_y}{\sigma_y} \quad \text{Gl. 42}$$

mit

- $R_{OS}$  : skaliertes Reflexionsfaktor, normiert auf die Standardabweichung  $\sigma_y$   
 $\sigma_y$  : Standardabweichung der Reflexionsfaktoren für die Wellenlänge  $\lambda_y$   
 $\bar{R}_y$  : Mittelwert der Reflexionsfaktoren für die Wellenlänge  $\lambda_y$

**Vektorskalierung (Ort)**

Die Vektorskalierung basiert auf der Quadratsumme der spektralen Reflexionsfaktoren für die Wellenlänge  $\lambda$ , welche als Quotient in den Nenner eingeht. Im Zähler steht wahlweise jeweils einer der in den vorherigen Gleichungen abgeleiteten normierten Reflexionsfaktoren.

$$R_{OV} = \frac{R_{OT}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (R_{yj})^2}} \quad \text{Gl. 43}$$

wobei

- $R_{OV}$  : skaliertes Reflexionsfaktor, normiert auf die Quadratsumme der Reflexionswerte  $R_y$

$$R_{OT} = R_{OZ} \text{ oder } R_{OH} \text{ oder } R_{OS}$$

Im Gegensatz zu den linearen Frequenztransformationen haben die Ortstransformationen nicht nur eine Verschiebung und Zentrierung der Werte auf der Ordinatenachse zur Folge, sondern führen über die wellenlängenspezifische Mittelung der deskriptiv statistischen Parameter zu einer Parametrisierung der spektralen Information für jeden einzelnen Wellenlängenkanal (Abb. 54). Welches Verfahren für die Skalierung zur multivariaten Analyse von Spektralsignaturen am ehesten geeignet ist, wird aus dem Vergleich der Häufigkeitsverteilungen für die skalierten Datensätze ersichtlich (siehe Abb. 55).

Lediglich die Zentrierung durch Division ( $R_{OZ2}$ ) führt zu einer Annäherung der Werteverteilung der Reflexionsfaktoren an eine Normalverteilung und kommt damit als Eingangsvariable für die multivariate Analyse in Frage.



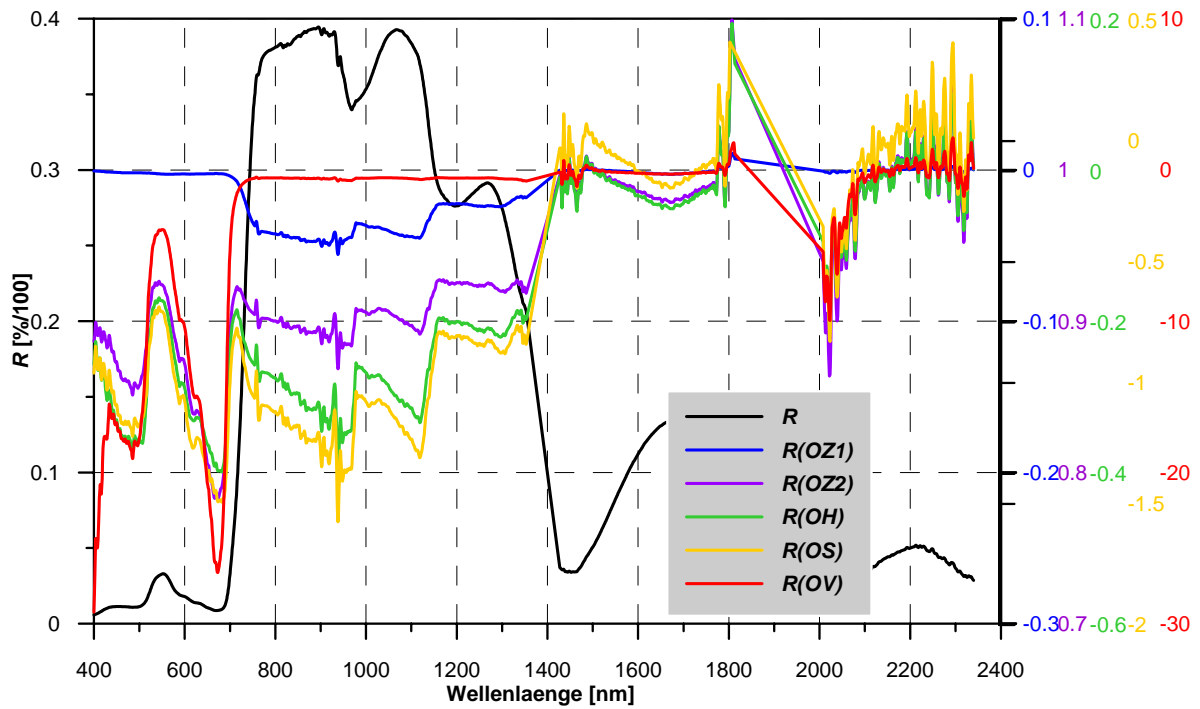


Abb. 54: Skalierung durch lineare Ortstransformation

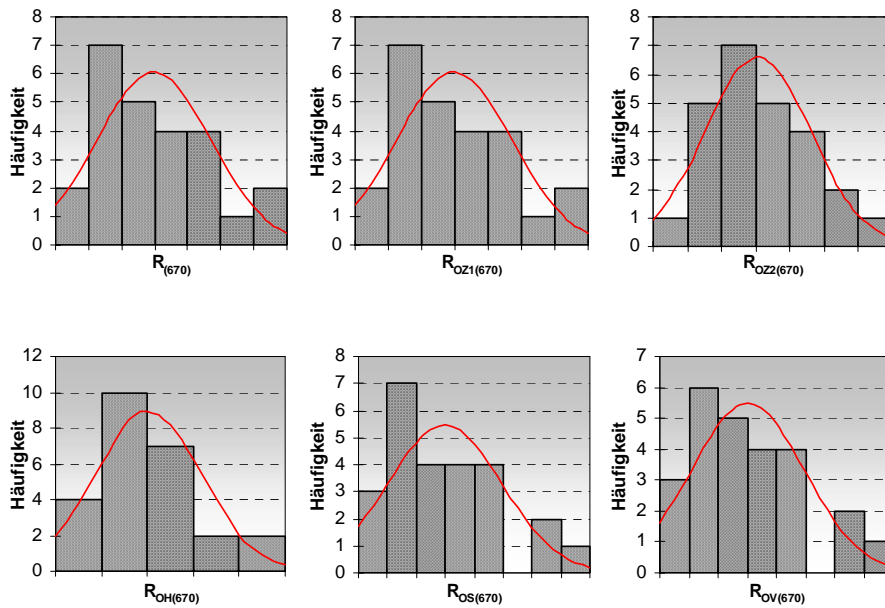


Abb. 55: Häufigkeitsverteilung der Reflexionsfaktoren in Abhängigkeit vom Skalierungsverfahren (Ortsbereich,  $n=26$ )

## 6.7 Zusammenfassung und Bewertung der Standardisierungsansätze

Die erläuterten Standardisierungsansätze verfolgen das Ziel, die Merkmale der Funktionskurve spektraler Reflexion frischer und getrockneter Pflanzenmasse auf einen standardisierten Wertebereich zu transformieren. Hierfür kommen entweder absolute oder relative Verfahren in Frage.

Die absolute Kalibrierung der spektralen Reflexion ist im engeren Sinne nur möglich, wenn die bidirektionale Reflexionsverteilung (BRDF) vollständig bekannt ist. In den meisten Fällen der Aufnahme spektroradiometrischer Messungen abbildender oder nicht abbildender Sensoren ist diese Idealmesskonstellation nicht einhaltbar und wird auch nicht angestrebt. Für die Umgebungs- und Aufnahmevariablen und deren Einfluss auf das Messresultat sind deshalb Konventionen anzustreben, auf deren Grundlage eindeutig nachvollziehbare Messungen durchführbar sind, um eine absolute Kalibrierung auf rekonstruierbare Messwerte zu erzielen. Zu diesem Zweck wurde ein Prozessierungsablauf für die absolute Kalibrierung von Reflexionsmessungen entwickelt, der nicht-multiplikative wellenlängenabhängige Störeinflüsse auf das Messresultat mit Hilfe einfacher linearer Korrekturmodelle reduziert (Kap. 6.3).

Demgegenüber stehen die in Kap. 6.5 und Kap. 6.6 behandelten Korrekturverfahren zur relativen Standardisierung (Normierung) spektraler Messwerte. Diese sind nicht auf die Einbeziehung von Umgebungs- und Aufnahmevariablen angewiesen, sondern benutzen funktionsimmanente Merkmale zur Normierung der Funktionskurven oder von Ausschnitten der Spektralsignatur. Die relativen Verfahren betrachten entweder die Verteilung der spektralen Reflexionsfaktoren über den Wellenlängenbereich  $\Delta\lambda$  (Frequenztransformationen) oder über den Stichprobenbereich für eine bestimmte Wellenlänge  $\lambda_y$  (Ortstransformationen). Bei den relativen Standardisierungsverfahren ist, ebenso wie bei der absoluten Kalibrierung, darauf zu achten, dass der Eingangsdatensatz der spektralen Reflexionswerte qualitativen Anforderungen genügt (*SNR*, Varianz, Variabilität) und dass der Prozessierungsablauf eindeutig nachvollziehbar ist.

Die verschiedenen standardisierten Werte spektraler Reflexionsfaktoren bilden die Datenquelle für die multivariate Analyse zur Ableitung biochemischer Zustandsparameter in Kap. 7. Die Auswahl eines Verfahrensablaufs für die Standardisierung hat einen entscheidenden Einfluss auf das Resultat der multivariaten Analyse.

Dies trifft vor allem auf die Methoden zur relativen Standardisierung zu. Während die linearen Skalierungsverfahren (Frequenztransformation) in der Regel zu einer Zentrierung des Wertebereichs und einer Verschiebung auf der Ordinatenachse führen, haben die Kontinuum-basierten Verfahren (*CR*, *BNC*, *SNC*) sowie die Ortstransformationen eine Veränderung der Formparameter (Lage, Tiefe, Steigung) von Signaturmerkmalen und damit des potentiellen Informationsgehalts der spektralen Reflexionsfaktoren zur Folge (siehe hierzu Kap. 6.6.2.3 und Abb. 51). Bei den Parametrisierungsansätzen wiederum ist direkt aus der Werteverteilung eine Aussage über die Verteilung von Oberflächeneigenschaften möglich (z. B. *NDVI*).

Diese Unterschiede unterstreichen nochmals die Notwendigkeit der lückenlosen Dokumentation des Prozessierungsablaufs bei der Erstellung eines Datensatzes für die multivariate Analyse spektroradiometrischer Daten. Die Frage, welches Verfahren schließlich am besten für die Heraushebung der objektrelevanten Signaturmerkmale geeignet ist, wird im Rahmen der Diskussion der Modellierungsergebnisse aus der multivariaten Datenanalyse beantwortet werden. Den Eingangsdatensatz für die multivariate Modellierung in Kap. 7 bilden zunächst sämtliche in den vorangegangenen Kapiteln erstellten absolut und relativ standardisierten Reflexionsfaktoren bzw. deren Derivate. Einen Überblick über die Spektralmerkmale ist in Tab. 24 enthalten (siehe hierzu Kap. 7.2.1).

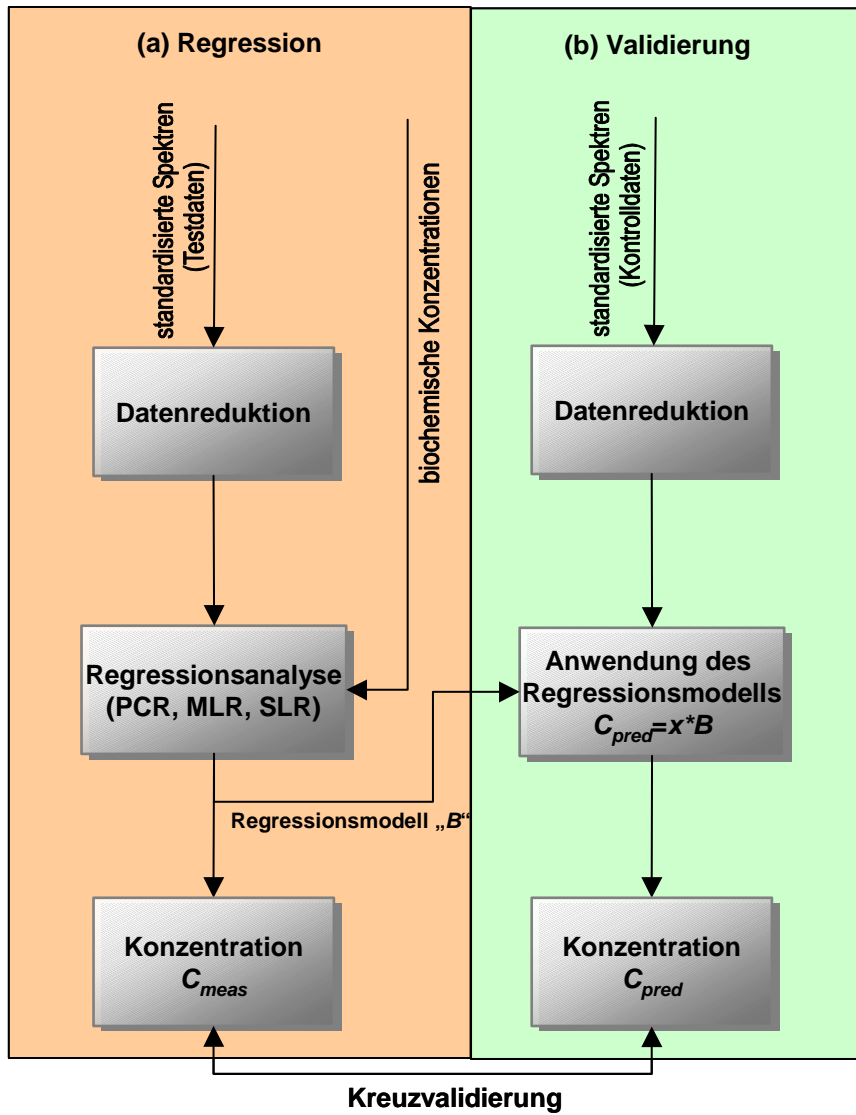
## 7 Multivariate Analyse spektroradiometrischer Messungen zur Ableitung biochemischer Zustandsparameter

Wie in Kap. 2.3.1 erläutert, besteht ein enger Zusammenhang zwischen biochemischen Pflanzenbestandteilen und der spektralen Absorption bzw. Reflexion solarer elektromagnetischer Strahlung. Die Konzentration biochemischer Komponenten von Pflanzenteilen wiederum steht in Beziehung zu wesentlichen biochemischen Prozessen einer Pflanze, wie Photosynthese, Atmung, Evapotranspiration und biologischem Abbau und damit ebenso zu Qualität, Produktivität und Ertrag landwirtschaftlicher Kulturpflanzen.

Diese Grundannahmen bilden die Basis für die Auswertungen der spektralen Reflexionsfaktoren zur Zustandsbeschreibung von Pflanzenbeständen. Hierzu ist die Entwicklung eines geeigneten Auswerteverfahrens notwendig, das allgemeingültig, reproduzierbar und verlässlich die Vorhersage von Zustandsparametern aus spektraler Information erlaubt. Das angestrebte Auswerteverfahren setzt sich grundsätzlich aus vier Komponenten zusammen:

- (1) **Datenaufbereitung:** Standardisierung (absolut/relativ) der spektralen Reflexionswerte durch Transformation auf einen vergleichbaren Wertebereich (Kap. 6)
- (2) **Datenreduktion:** Auswahl von Wellenlängenkanälen für die Datenanalyse durch Kausalanalyse und statistische Methoden
- (3) **Datenanalyse:** multivariate Datenanalyse zur Vorhersage von Zielvariablen (Anteil biochemischer Komponenten) aus Eingangsvariablen (spektrale Reflexion)
- (4) **Validierung:** Überprüfung der Regressionsergebnisse anhand eines Kontrolldatensatzes

Die Schritte (2) bis (4) sind in Abb. 56 in Form eines Blockdiagramms dargestellt. Die unterschiedlichen Methoden zur Datenreduzierung werden in Kap. 7.2 erläutert. Die Vorverarbeitungsschritte und Verfahren zur multivariaten Datenanalyse werden in Kap. 7.3 erläutert. Die Ergebnisse der Regressionsanalysen werden in Kap. 7.4 beschrieben und bewertet.



**Abb. 56:** Wesentliche Elemente des Verfahrensablaufs zur Modellierung von Pflanzenkomponenten aus spektraler Information

## 7.1 Vorüberlegungen zur multivariaten Datenauswertung

Die Beschreibungen von Zusammenhängen zwischen Objekteigenschaften und deren spektralen Reflexionscharakteristika beruhen in der Regel auf Messungen von Pflanzen- oder Bodenbestandteilen unter Ideal- bzw. Laborbedingungen. Grundsätzlich wurden in zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen der letzten Jahre zu dieser Thematik signifikante statistische Zusammenhänge nachgewiesen (CURRAN 1989, CURRAN et al. 2001, CARD et al. 1988, PETERSON et al. 1988, WESSMAN 1994), aber andererseits auch die Grenzen einer verlässlichen Schätzung von Pflanzenkomponenten aus spektraler Information aufgezeigt (BARET & FOURTY 1997, GROSSMAN et al. 1996). Prinzipiell ist ein Rückschluss von den experimentellen Messungen auf die spektrale Reflexion von *in situ* gemessenen natürlichen Oberflächen möglich und zulässig, da die Eigenschaften einzelner Pflanzenorgane oder Bodenpartikel die spektrale Signatur von ganzen Pflanzenbeständen in Fernerkundungsaufzeichnungen deutlich prägen. Zu diesem Ansatz fehlen aber bisher generelle, verlässliche Auswerteverfahren.

Die Hypothese, die den bekannten Ansätzen zugrunde liegt, geht davon aus, dass ein spektraler Reflexionswert aus der Differenz zwischen vollständiger Reflexion (100 %) und der gewichteten Summe der Absorptionsmerkmale jeder einzelnen biochemischen Komponente resultiert (PETERSON et al. 1988).

Bei der Auswertung von Spektralsignaturen ist es aber trotz der in Kap. 2.3.1 genannten Zusammenhänge nicht möglich, sich auf das Lambert-Beer-Gesetz zu berufen und aus der Messung der spektralen Reflexion bzw. Absorption in einem bestimmten Wellenlängenbereich direkt auf die relative Konzentration von Objektmerkmalen zu schließen (vgl. Kap. 2.2). Hierfür gibt es folgende Gründe:

- ⇒ Absorptionsbereiche "verwässern" zu kontinuierlichen breiten Banden durch Überlagerung verschiedener Prozesse (z. B. Überlagerung der Oberschwingungen der N-, H- und O-H-Dehnungen)
- ⇒ Organische Bestandteile absorbieren elektrische Energie ähnlicher Wellenlängen, weshalb eine Wellenlänge nicht stellvertretend für einen biochemischen Bestandteil stehen kann (z. B. ist die O-H-Bindung Bestandteil der Absorptionsspektren von Wasser, Cellulose, Zucker, Stärke und Lignin)
- ⇒ Die Messungsgenauigkeit nimmt zu größeren Wellenlängen (geringere *SNR*) und in der Umgebung der Wasserabsorptionsbereiche zu. Dies führt zu Problemen bei der Auswertung insbesondere von SWIR-Spektren mit feld- und luftgestützten Sensoren.
- ⇒ Die Reflexionswerte für bestimmte Absorptionsmerkmale können bereits bei geringen chemischen Konzentrationen eine Sättigung (bzw. ein Minimum) erreichen. Es ist deshalb oftmals ratsam, nicht die zentrale Wellenlänge eines Absorptionsmerkmals zu untersuchen, sondern eher dessen Randbereiche (CURRAN 1989).

Aufgrund dieser Einschränkungen ergibt sich die Folgerung, dass für die Modellierung biochemischer und biophysikalischer Parameter eines Pflanzenbestandes aus deren Spektralsignatur einfache lineare Regressionsverfahren nur bedingt einsetzbar sind und deshalb der Einsatz semiempirischer multivariater Methoden notwendig ist.

In den meisten Untersuchungen werden die Merkmale der Spektralsignaturen mittels empirischer multivariater Ansätze miteinander in Beziehung gesetzt, um bestimmte Komponenten des Systems Pflanze-Boden vorherzusagen. Die lineare schrittweise multiple Regression ist hierbei der am weitesten verbreitete Ansatz zur Ausscheidung einiger weniger Wellenlängen aus einem Spektraldatensatz und zur Vorhersage von Zielvariablen durch Eingangsvariablen. Die lineare Regressionsanalyse bietet grundsätzlich eine effektive und robuste Methode zur Modellierung biochemischer Parameter aus Spektraldaten. Bei näherer

Betrachtung des Verfahrens werden aber auch dessen Schwächen für die Auswertung spektroradiometrischer Daten deutlich.

Bei der hohen spektralen Auflösung abbildender Hyperspektralsensoren oder nicht-abbildender Spektrometer besteht die Gefahr der Übersättigung des Modells, wenn die Anzahl der eingehenden unabhängigen Variablen (Wellenlängen oder deren Derivate) die Stichprobenzahl übersteigt. Dies ist bei einer Anzahl von 2152 Wellenlängenkanälen des ASD FieldSpec<sup>®</sup> als gegeben anzunehmen. Die hohe Anzahl der Einflussvariablen hat zusätzlich in den meisten Fällen eine hohe Kollinearität dieser Variablen zur Folge, was die Durchführbarkeit der meisten multivariaten Verfahren stark beeinträchtigt (siehe hierzu Kap. 7.3.1.1). Daneben gilt es noch zwei weitere Einschränkungen bei der Durchführung einer Regressionsanalyse zu berücksichtigen.

Bei der Auswahl der Wellenlängenbereiche für die lineare Regression ist zu bedenken, dass nicht alle Wellenlängen, die eine statistisch signifikante Beziehung zu biochemischen Parametern aufweisen, auch auf einem Kausalzusammenhang zwischen diesen und dem Spektralmerkmal basieren (vgl. Kap. 2.2). Wenn eine kausale Beziehung zu einer biochemischen Komponente (z. B. N-H-Schwingungsabsorption  $\Leftrightarrow$  N-Konzentration) besteht, ist zu berücksichtigen, dass das durch die Schwingung verursachte Absorptionsmerkmal von Absorptionsprozessen biochemischer Bestandteile überlagert werden kann oder dass nur eine indirekte Beziehung durch die enge Korrelation zu einem anderen Absorber besteht (z. B. C-H-Schwingungsabsorption  $\Leftrightarrow$  N-Konzentration, vgl. Tab. 4).

Eine weitere Gültigkeitseinschränkung erfährt die Verwendung von Regressionsgleichungen, vor allem der multiplen schrittweisen Regression, durch die mangelnde Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit bestehender Verfahren bezüglich der spektralen Variabilität und der Variablenauswahl aus den Eingangsdaten (CURRAN et al. 2001).

## 7.2 Dimensionsreduktion der Eingangsdaten

### 7.2.1 Kausale und funktionale Zusammenhänge

Die Ausscheidung von relevanten Spektralabschnitten für die quantitative Merkmalsextraktion von Pflanzenbeständen kann auf der Basis qualitativer Eigenschaften der Spektralsignatur nach folgenden Kriterien erfolgen:

- (1) lokale Extrema der Reflexionsfunktion (Ableitungsanalyse)
- (2) Signal-Rausch-Verhältnis
- (3) Variationskoeffizient der Parallelmessungen
- (4) kausale Zusammenhänge zwischen Reflexion und Oberflächeneigenschaften

Die Ableitungsanalyse, wie sie in Kap. 6.6.1 für Funktionskurven spektroradiometrischer Messungen durchgeführt wurde, liefert hierzu einen wesentlichen Beitrag, indem sie automatisch diejenigen Wellenlängenbereiche markiert, in denen lokale Extrema der Signaturkurve vorliegen. Diese Extrema (Minima, Maxima, Hauptwendepunkte) bilden die Spektralbereiche vorrangigen Interesses, da nur hier, auf dem Wesen der Entstehung der Spektralsignatur basierend, quantifizierbare Informationen zu finden sind.

Das Signal-Rausch-Verhältnis und der Variationskoeffizient sind sich in Ihrer Aussage ähnlich und stellen diejenigen Bereiche des betrachteten Spektralabschnitts heraus, in denen die Messunsicherheiten für eine verlässliche Modellbildung durch lineare Regression zu groß sind, auch wenn in diesen Bereichen kausale Zusammenhänge zwischen spektraler Reflexion und Objektcomponenten zu vermuten sind.

Neben systembedingten und funktionsimmanenten Einschränkungen der relevanten Wellenlängenbereiche kann der Vergleich der *in situ* Messungen und der Laborspektren für eine Stichprobe wichtige Aufschlüsse über die Kausalzusammenhänge zwischen spektralen Merkmalen und Objektparametern liefern.

Die Feld- und Labormessungen der Pflanzenbestandteile weisen, wie aus Tab. 20 hervorgeht, mehrere Wellenlängenbereiche auf, in denen übereinstimmend lokale Minima der Spektralsignatur auftreten (um 670 nm, um 1200 nm, um 2140-2220 nm) und zusätzlich jeweils solche Bereiche, die nur entweder in den *in situ* oder in den Labormessungen hervortreten.

Der Vergleich der Spektralbereiche legt den Rückschluss nahe, dass in den Absorptionsbereichen, die vorwiegend in den Feldspektren auftreten, verstärkt biophysikalische Bestandsmerkmale (Pflanzengeometrie, Bestandsdichte etc.) sowie Einflüsse der Umgebung (Atmosphäre, Sonnenstand) und der Wassergehalt der Pflanze für die Merkmale der Spektralsignatur verantwortlich sind, bzw. andere Einflüsse maskieren, da diese Faktoren die Messungen der homogenisierten getrockneten Proben im Labor nicht beeinträchtigen.

Für die Bereiche lokaler Extrema, die sowohl in den *in situ* als auch in den Labormessungen nachweisbar sind, lässt sich folglich schließen, dass in diesen Bereichen die biochemischen Komponenten der Pflanzenteile das Reflexionsmuster der Pflanze prägen.

Dies wird deutlich, wenn man den Spektralbereich um 980 nm betrachtet. Hier tritt bei Feldmessungen mit dem ASD FieldSpec<sup>®</sup> ein sehr deutlich ausgeprägter Absorptionsbereich auf, hervorgerufen durch die O-H-Bindungen der Wassermoleküle in der Atmosphäre und in der Pflanze. Bei den Labormessungen ist durch die Zerstörung der Zellstruktur und die Trocknung kein Absorptionsbereich mehr auszumachen, sondern ein kontinuierlicher Anstieg der spektralen Reflexionsfaktoren mit zunehmender Wellenlänge.

Aus diesem Grunde wird der Datensatz für die multivariate Analyse der Konzentration biochemischer Komponenten aus Spektralparametern auf die den *in situ* und den Labormessungen gemeinsamen breiten Absorptionsmerkmale der Spektralsignatur beschränkt. Die Grenzen der Absorptionsbereiche werden gebildet durch die Lage der lokalen Maxima in der Umgebung der Absorptionsbänder bzw. durch die bereits in Kap. 6.6.2.1 (siehe auch Tab. 23) festgelegten Referenzwellenlängen.

Da aber auch über das Erscheinungsbild der Pflanze (Biomasse, Wuchshöhe, Zellstruktur) und damit über den durch Reflexionsprozesse dominierten Spektralbereich des NIR ein direkter Rückschluss auf die Nährstoffversorgung und damit den Zustand des Pflanzenbestands möglich ist, wird für die multivariate Analyse zusätzlich zu den o.g. Absorptionsbereichen der Bereich der maximalen Reflexion im NIR (Rotschulter, 800 – 880 nm) beibehalten. Daneben gehen sämtliche in Kap. 6.5 erstellten Spektralindizes in die weiteren Analysen ein. Die nach diesen Vorüberlegungen und der qualitativen Analyse der Spektralsignaturen verbleibenden Datensätze sind in Tab. 24 zusammengestellt.

**Tab. 24: Spektraldatensatz für die multivariate Analyse**

Spektralbereich	Wellenlängenbereich [nm]	
VNIR	$\left\{ \begin{array}{l} 580 - 750 \\ 800 - 880 \\ 880 - 1050 \end{array} \right\}$	$R_P, R_{FV}, R_{OZ2}, R', R'', BNC, SNC,$ Indizes (REI, NDVI)
SWIR-1	1100 – 1280	$R_P, R_{FV}, R_{OZ2}, R', R'', BNC, SNC$
SWIR-2	2015 – 2220	$R_P, R_{FV}, R_{OZ2}, R', R'', BNC, SNC$
SWIR-2	2230 – 2340	$R_P, R_{FV}, R_{OZ2}, R', R'', BNC, SNC$

## 7.2.2 Resampling

Der durch die kausalen und funktionalen, qualitativen Merkmale reduzierte Datensatz der Spektralparameter weist nach wie vor eine extrem hohe Anzahl von Variablen auf. Diese sind insgesamt 915 Spektralkanäle, resultierend aus der Summe der Wellenlängenabschnitte in Tab. 24 und der spektralen Bandbreite von 1 nm des Spektrometers. Die spektrale Auflösung des ASD FieldSpec<sup>®</sup> ist aber im Vergleich hierzu um den Faktor 3 bzw. 30 schlechter (Kap. 4.1.1, siehe auch Abb. 22), was vor allem im SWIR-Bereich eine hohe Übersättigung der Spektralsignale zur Folge hat.

In diesem Fall (spektrale Bandbreite < spektrale Auflösung) lässt sich die Datenmenge entlang der Wellenlängenchse für die multivariate Analyse ohne wesentlichen Informationsverlust reduzieren.

Die spektrale Auflösung des ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro JR beträgt, wie in Kap. 4.1.1 dargelegt, 3 nm im VNIR und 30 nm im SWIR, die spektrale Bandbreite jedoch nur 1 nm. Ein tolerierbarer Abstand zwischen zwei neuen Stützstellen sollte zwischen 0,5 und maximal 1\*(spektrale Auflösung) liegen. Nach dieser Vorgabe wird in einem ersten Reduktionsschritt ein Resampling der Daten auf 2 nm (VNIR) bzw. 15 nm (SWIR) Bandbreite durchgeführt. In weiteren Schritten werden die Abstände der Stützstellen der Funktionskurve weiter reduziert, um die Bandbreiten verfügbarer spektral hochauflösender abbildender Sensoren (Hyperion, HyMap, MODIS) zu simulieren.

Die Auswirkungen der Resampling-Schritte auf den spektralen Verlauf der Reflexionsfaktoren sind in Abb. 57 am Beispiel der Spektralsignatur eines Winterweizenbestands dargestellt.



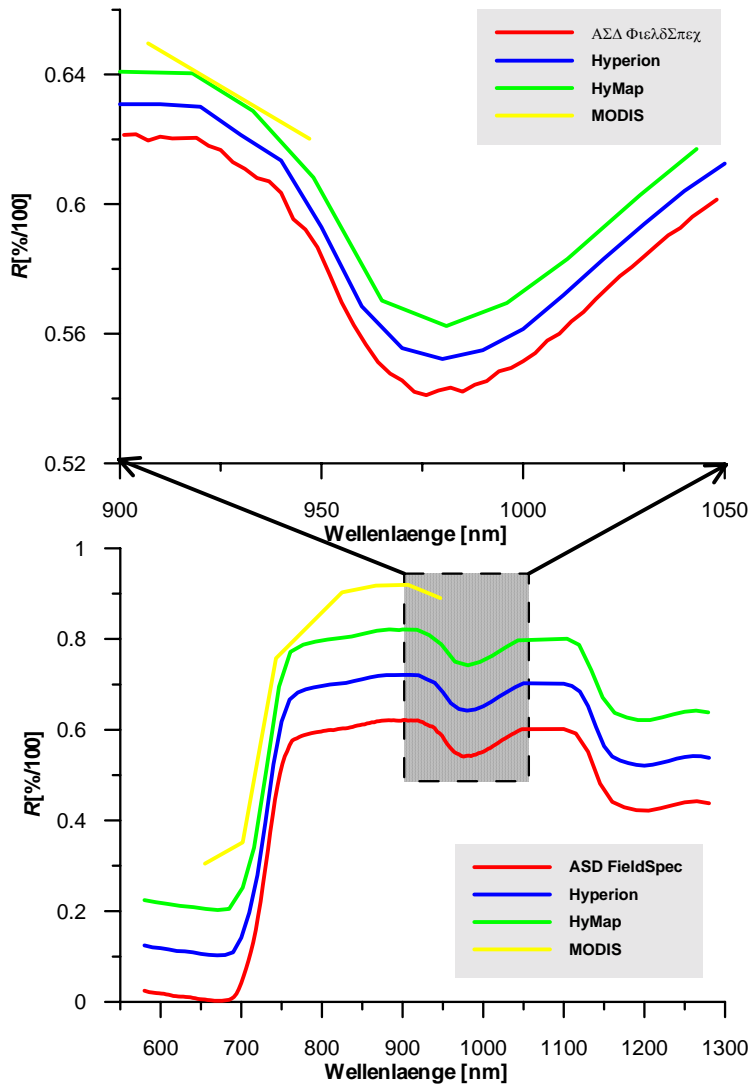


Abb. 57: Dimensionsreduktion durch Resampling im Wellenlängenbereich<sup>25</sup>

Durch das Resampling der ASD FieldSpec<sup>®</sup>-Daten auf die nominelle spektrale Auflösung der ASD-Detektoren sowie im weiteren Verlauf auf die Zentrumswellenlängen und Bandbreiten der simulierten Hyperspektralsensoren ist bei der visuellen Interpretation der Spektralsignatur zunächst kein Informationsverlust feststellbar. Dieser wird erst deutlich, wenn man die Auswirkungen des Resamplings für einen Spektrumsabschnitt betrachtet (Abb. 53 oben). Aus der detaillierten Betrachtung wird auch klar, dass nicht alle der in Kap. 6.6 durchgeführten Skalierungsmethoden auf die simulierten Datensätze (insbesondere MODIS) anwendbar sind. Insgesamt steht nach dem Resampling ein Spektraldatensatz der in Tab. 24 genannten Wellenlängenbereiche für vier verschiedene simulierte Gitterauflösungen (spektrale Bandbreite) und Zentrumswellenlängen zur Verfügung, der in Tab. 25 zusammengefasst ist.

Tab. 25: Charakteristika der durch Resampling simulierten Spektralbänder für unterschiedliche Hyperspektralsensoren

	spektrale Bandbreite	Anzahl Wellenlängenkanäle für die Spektralabschnitte
ASD (spectral sampling)	3 / 15 nm	192
Hyperion	10 nm	101
HyMap <sup>®</sup>	15 / 17 nm	65
MODIS	20 nm	15

<sup>25</sup> Verschiebung der Reflexionsfaktoren durch Offset-Addition von jeweils +0.1 [%/100]

### 7.3 Modellbildung für die Spektralanalyse von Winterweizenbeständen

Die datenreduzierenden Maßnahmen in Kap. 7.2 basieren ausschließlich auf qualitativen Merkmalen der Spektralsignatur sowie systemspezifischen Limitierungen des Aufnahmesystems (Resampling) und haben zur Erstellung eines Datensatzes standardisierter Reflexionsfaktoren bzw. derer Derivate als Variablen für die multivariate Analyse geführt.

Aus diesen Datensatz kann theoretisch durch lineare Korrelationen auf die Stärke des Zusammenhangs der Einflussvariablen mit den Zielvariablen geschlossen werden. Dieses Verfahren ist, wie schon in Kap. 7.1 erläutert wurde, für die quantitative Auswertung von Spektralmerkmalen aus Feldmessungen nicht einsetzbar. Der Verlauf der Korrelationskoeffizienten gibt jedoch einen ersten Eindruck über die Eignung bestimmter Spektralbereiche bzw. -parameter für die Ableitung der Konzentrationen von Pflanzeninhaltsstoffen (Korrelogramme, siehe Kap. 7.3.1).

Die multivariate Analyse der Spektraldaten erfolgt in Kap. 7.3.2 unter Verwendung der reduzierten Datenmatrix.

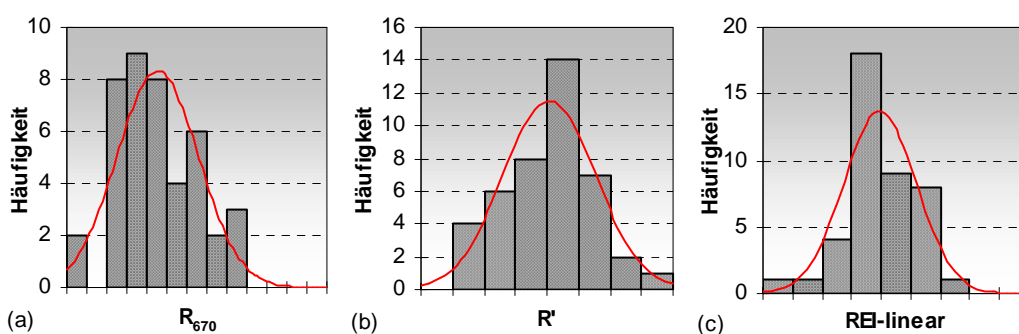
#### 7.3.1 Korrelationsanalyse

Die Korrelationsanalyse weist formal-mathematische einfache Zusammenhänge nach. Ob ein kausaler Zusammenhang zwischen den untersuchten Variablen besteht, muss vorab als Ausschlusskriterium geklärt oder spätestens bei der Interpretation der Korrelationskoeffizienten berücksichtigt werden.

Die folgenden Darstellungen resultieren aus der Anwendung der linearen Einfachregression nach PEARSON, welche die Güte des Zusammenhangs zwischen unabhängigen Variablen angibt. Voraussetzung hierfür ist, dass die untersuchten Variablen normalverteilt und metrisch skaliert sind.

##### 7.3.1.1 Multikollinearitäten der Spektralvariablen

Wie bereits in Kap. 6.6.2.4 festgestellt, ist für die statistische Analyse der Reflexionsfaktoren zunächst die Transformation mittels relativer oder absoluter Standardisierungsverfahren notwendig (siehe hierzu auch Abb. 53). Neben der erwünschten Skalierung auf einen standardisierten Wertebereich führt die jeweilige Transformation zusätzlich zur Anpassung der Werteverteilung an eine Normalverteilung (siehe Abb. 58).



**Abb. 58:** Häufigkeitsverteilung spektraler Merkmale, (a) Reflexionsfaktor bei  $\lambda_{670}$ , (b) 1. Ableitung bei  $\lambda_{670}$ , (c) RedEdge-Index ( $n=42$ )

Der Informationsgehalt der transformierten und dimensionsreduzierten Spektren wird durch die Analyse der Interkorrelationen der Wellenlängenkanäle überprüft. Die bestmögliche Annahme wäre, dass der Datensatz keine Zusammenhänge zwischen den einzelnen (unabhängigen) Variablen (hier: Wellenlängenkanäle) aufweist. Dieser Fall tritt aber in der

Realität bei kontinuierlichen Messreihen nicht auf. Die Werte der einzelnen Wellenlängenkanäle für das jeweilige Spektralmerkmal weisen in der Regel immer eine stochastische Abhängigkeit von einer oder mehreren anderen Variablen auf (Multikollinearität). Das Vorliegen der Multikollinearität erschwert die Interpretation von Regressionsgleichungen, da die Regressionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Auswahl der in das Modell einfließenden Variablen starken Änderungen unterliegen.

Das Auftreten von Multikollinearitäten lässt sich in der Praxis bei der Aufnahme und Auswertung von Fernerkundungsdaten nicht vermeiden, da die spektrale Reflexion eines Objektes immer eine komplexe Funktion des Zusammenwirkens ihrer Komponenten mit der auftretenden Strahlung darstellt. Durch die Transformation und Reduktion der Reflexionswerte können aber die Abhängigkeiten zwischen den Spektralvariablen verringert werden, wie die Zusammenstellung der Konsistenzmaße für die Feld- und Labormessungen in Tab. 26 zeigt.

**Tab. 26: Multikollinearitäten der Spektralvariablen (580 – 1280 nm)**

$n=42$	in-situ Messungen		Labormessungen	
	Cronbachs- $\alpha$	Scotts-H.-Q.	Cronbachs- $\alpha$	Scotts-H.-Q.
$R_P$	0,99	0,96	0,99	0,79
$R'$	0,88	0,11	0,86	0,07
$R''$	-32,61	0,02	-33,97	0,01
$R_{FV}$	0,97	0,18	0,97	0,17
$R_{OZZ}$	0,99	0,69	0,99	0,81
<b>BNC</b>	0,85	0,16	0,96	0,62
<b>SNC</b>	0,83	0,09	0,92	0,71

Die verwendeten Konsistenzmaße geben Auskunft darüber, inwieweit die Variablen eines Datensatzes miteinander korrelieren. Den Berechnungen liegt jeweils die Korrelationsmatrix des Eingabedatensatzes zu Grunde, die Koeffizienten basieren aber auf unterschiedlichen Berechnungen. Beide Verfahren verwenden den Mittelwert aller bivariater Korrelationen der Variablenmatrix, die Werte können hierbei für Cronbachs- $\alpha$  bei max. 1 liegen und auch negativ werden, die Wertespanne für den Scotts-Homogenitätskoeffizient liegt bei  $0 < k < 1$  (siehe hierzu auch BAHRENBERG et al. 1992). Da die Konsistenz-Koeffizienten teilweise unterschiedliche Tendenzen aufweisen, sind sie in Tab. 26 zur Interpretation der Multikollinearitäten nebeneinander abgetragen.

Es fällt auf, dass generell die Homogenität des Datensatzes durch die Transformation abnimmt, d.h., dass der Informationsgehalt der Spektralvariablen bzw. derer Derivate zunimmt. Dies trifft vor allem auf die Ableitungen der kalibrierten Feldspektren bzw. der gefilterten Laborspektren zu, bei denen mit zunehmendem Grad die Konsistenzkoeffizienten abnehmen. Dies ist allerdings u. a. auf die Zunahme der Komplexität bzw. des Rauschens der Funktionskurve für höhere Ableitungen der ursprünglichen Funktion zurückzuführen (vgl. Kap. 6.6.1). Inwieweit die geringe Konsistenz der Ableitungen dennoch positiv zur multivariaten Analyse der Spektralmessungen beitragen kann, wird in Kap. 7.4 zu diskutieren sein. Eine ähnliche Tendenz der Konsistenzmaße ist bei den Kontinuum-basierten Ansätzen zur Funktionstransformation festzustellen (**BNC**, **SNC**). Die Abnahme der Koeffizienten beschränkt sich aber hierbei auf die Feldmessungen. Die linear frequenztransformierten Spektralvariablen ( $R_{FV}$ ) weisen sowohl für die *in situ* als auch für die Labormessungen ebenfalls eine starke Zunahme der Komplexität ihrer Korrelationsmatrix auf. Diese Tatsache lässt vermuten, dass trotz der Erhaltung der Funktionsform der potentielle Informationsgehalt des Datensatzes durch die Skalierung zunimmt.

Der Vergleich der Homogenitätsmaße für die kalibrierten bzw. gefilterten Feld- bzw. Labormessungen zeigt, dass den Labormessungen ein höheres Potential bei der Ableitung von

Materialeigenschaften zuzurechnen ist. Dies ist u. a. damit zu erklären, dass hier die breiten Wasserabsorptionsbereiche in den Funktionskurven fehlen. In diesen Bereichen treten aufgrund der engen Abfolge bzw. Überlagerung von Schwingungs- und Rotationsbanden der OH-Moleküle bei spektroradiometrischen Messungen unter natürlichen Verhältnissen hohe Kollinearitäten auf.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass durch die Transformation die Komplexität der Korrelationen zunimmt und damit die Multikollinearitäten der Variablen abnehmen. Das Maß der Homogenität des Eingangsdatensatzes der Spektralvariablen ist entscheidend für die Auswahl des Regressionsverfahrens zur multivariaten Analyse der Spektralmessungen.

### 7.3.1.2 Korrelationsspektren

Der Vergleich der Multikollinearitäten für verschiedene Spektralmerkmale in Kap. 7.3.1.1 hat gezeigt, dass durch die Transformation der spektralen Reflexionswerte eine Verringerung der Redundanzen innerhalb des Spektraldatensatzes erreichbar ist.

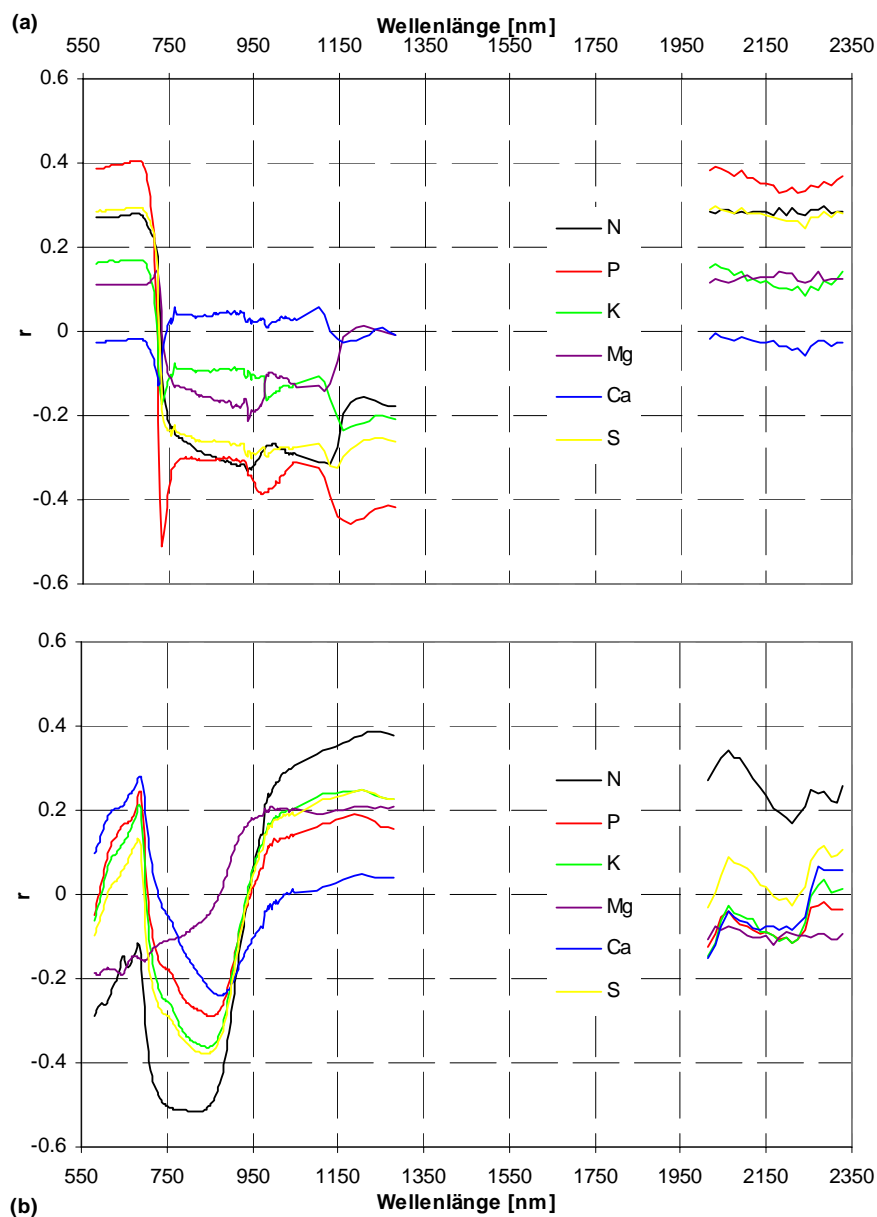
Diese Maßnahmen verbessern damit auch die Chancen der direkten Ableitung von Komponentenkonzentrationen aus einzelnen unabhängigen Spektralvariablen. Dennoch bleibt generell die relativ starke Abhängigkeit der Variablen untereinander bestehen, so dass eine einfache lineare Regression von Komponentenkonzentrationen aus Spektraldaten auch aus stochastischen Gründen (neben den in Kap. 7.1 erläuterten Kausalzusammenhängen) nicht durchführbar ist.

Die Korrelationsspektren in den folgenden Abbildungen zeigen die Abhängigkeiten zwischen Komponentenkonzentrationen und spektraler Reflexion in Form eines wellenlängenspezifischen Korrelationskoeffizienten  $r_\lambda$  auf. Aus der Interpretation der Korrelationsspektren in Abb. 59 geht hervor, dass die Spektralvariablen über den gesamten betrachteten Wellenlängenabschnitt mehr oder weniger stark mit den Pflanzeninhaltsstoffen korrelieren ( $-0.4 < r_\lambda < 0.4$ ). Dies ist zum einen ein Indiz für die bereits in Kap. 7.3.1.1 beschriebenen Multikollinearitäten der Spektralvariablen (Wellenlängenkanäle) für ein Spektralmerkmal. Zum anderen lassen diese Tatsache und die im Allgemeinen nicht sehr hohen Korrelationskoeffizienten vermuten, dass die spektrale Reflexion in den Wellenlängenbereichen von indirekten Korrelationen der betrachteten Zielgrößen (Pflanzenparameter) mit unbekanntem, jedoch optisch aktiven Hintergrundvariablen geprägt wird (ähnliche Beobachtungen für die spektroradiometrische Analyse von Bodeninhaltsstoffen machen UDELHOVEN et al. 2001). Die ermittelten Messgrößen der Pflanzenparameter (Referenzdaten) geben jeweils die Anzahl der in der Aufschlusslösung bzw. der Einwaage vorkommenden Einzelatome an. In der Frisch- bzw. Trockenmasse der untersuchten Pflanzen treten die biochemischen Komponenten jedoch immer in Ionenform oder in organischen Verbindungen auf. Der in der Lösung gemessene Stickstoff einer Weizenprobe kann z. B. in 20 verschiedenen Aminosäuren und organspezifischen Proteinen enthalten sein (SCHILLING 2000). Einen Überblick über das Vorkommen der wichtigsten untersuchten Nährelemente gibt Tab. 27.

**Tab. 27: Zustandsform ausgewählter Nährelemente in der Frischmasse höherer Pflanzen**

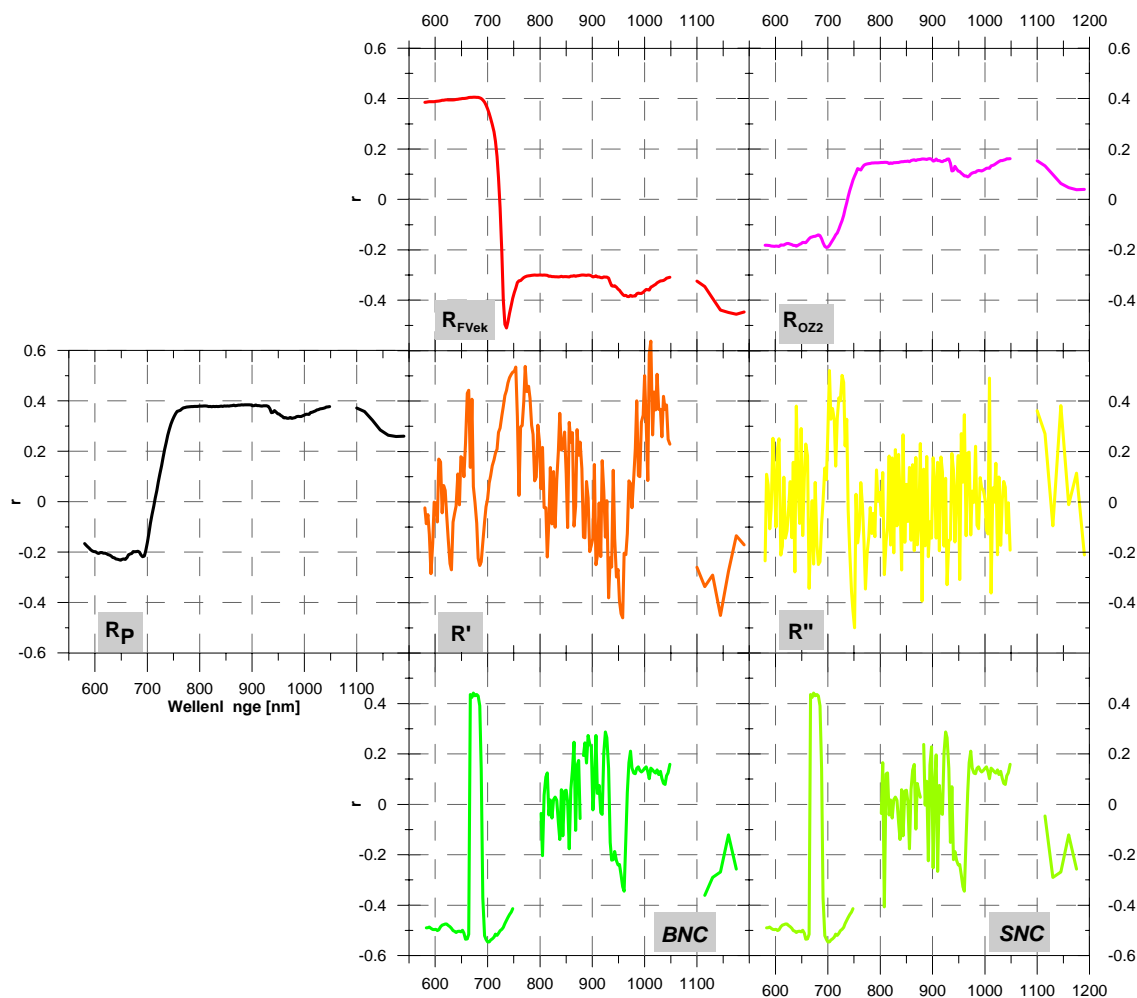
Nährelement	Aufnahme / Vorkommen in der Pflanze
N	$\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{NO}_2^-$
P	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , $\text{HPO}_4^{2-}$
K	$\text{K}^+$
Ca	$\text{Ca}^{2+}$
Mg	$\text{Mg}^{2+}$
S	$\text{SO}_4^{2-}$
Mo	$\text{MoO}_4^{2-}$
Mn	$\text{Mn}^{2+}$
Cu	$\text{Cu}^{2+}$

Die Elemente lassen sich nach ihrem Vorkommen in der Pflanze in zwei Gruppen unterteilen. Der ersten Gruppe gehören diejenigen Elemente an, die von der Pflanze ausschließlich in Kationenform aufgenommen und transportiert werden. Hierzu zählen Kalium, Calcium, Magnesium, Mangan und Kupfer. Die andere Gruppe besteht aus Nährelementen, die ausschließlich in Form von Verbindungen mit Wasserstoff oder Sauerstoffionen vorkommen (Stickstoff, Phosphor, Schwefel, Molybdän). Diese unterschiedlichen Zustandsformen der Ionen schlagen sich in den in Abb. 59 enthaltenen Korrelationspektren nieder. Die in Bindungen vorliegenden Nährelemente (N, P, S) weisen über den gesamten betrachteten Wellenlängenbereich vor allem für die Korrelogramme der Feldmessungen stärkere Korrelationen zu den Spektralmerkmalen auf als die Kationen, was als Hinweis dafür gewertet werden kann, dass die spektrale Reflexion bzw. Absorption hier maßgeblich vom Vorkommen der H-, O- oder OH-Bindungen beeinflusst ist. Dies äußert sich insbesondere durch die negativen Korrelationen im NIR-Bereich, verursacht durch Schwingungs- und Rotationsabsorptionsbanden der Bindungselemente bzw. des gesamten Molekülverbands.



**Abb. 59:** Korrelogramme für Makronährelemente von Winterweizen und deren skalierten Reflexionsfaktoren ( $R_{FV}$ ), (a) *in situ* Messungen, (b) Labormessungen ( $n = 35$ )

Die Korrelationsspektren in Abb. 60 verdeutlichen am Beispiel des VNIR-Bereichs, welchen Einfluss die Transformation der Spektralsignatur auf die Stärke der Zusammenhänge und damit auf den potenziellen Informationsgehalt der transformierten Spektralmerkmale hat. Die Vektorskalierung ( $R_{FV}$ ) der *in situ* Messungen führt zu einer Vorzeichenumkehr und Hervorhebung des Rot-Infrarot-Anstiegs, während bei der Ortstransformation trotz der in Kap. 6.6.3 aufgezeigten Änderung der Signaturform, das Korrelogramm einen der ursprünglichen Spektralsignatur vergleichbaren, leicht abgeschwächten Verlauf aufweist. Die erste Ableitung ( $R'$ ) weist, wie zu erwarten, an den Wendepunkten (und teilweise auch an den Extrema) der Spektralsignatur die stärksten Zusammenhänge auf, das Korrelationsspektrum der zweiten Ableitung hingegen lässt neben einem Peak im Rot-IR-Bereich keine nachweisbaren Strukturen in Bezug zur Wellenlänge erkennen.



**Abb. 60:** Korrelationsspektren für  $P_{\text{tot}}$ -Gehalt und spektrale Merkmale von *in situ* Messungen

Insgesamt wird durch die Analyse der Korrelationsspektren deutlich, was bereits durch die Berechnung der Konsistenzmaße in Kap. 7.3.1.1 statistisch belegt wurde. Die Transformation der Spektraldaten führt zu komplexeren Datenstrukturen der Spektralmerkmale, die sich in starken Schwankungen der Korrelationskoeffizienten niederschlagen. Sämtliche transformierten Spektralmerkmale weisen in bestimmten Wellenlängenbereichen signifikante Zusammenhänge zu den Zielvariablen auf. Die zweite Ableitung ( $R''$ ) der Spektralsignaturen für Winterweizenbestände ist jedoch für die multivariate Analyse nicht verwertbar, da durch die doppelte Transformation der Eingangsfunktion der Rauschanteil zu stark zunimmt. Es ist zwar die Bildung eines Regressionsmodells auf Basis statistischer Zusammenhänge zu

erwarten, dieses ist jedoch aufgrund der Komplexität der Funktionskurve für  $R''$  (s.o.) nicht mehr kausal begründbar (im Gegensatz zu Untersuchungen bei LI et al. 1993).

### 7.3.2 Multiple Regressionsanalyse

Für die Vorhersage von Zielvariablen aus Einflussvariablen kommen verschiedene multivariate Verfahren in Frage. In den meisten Fällen reicht hierbei ein lineares Modell aus, auch wenn das zu beschreibende Verhalten nicht immer linearer Natur ist. Für die Reflexionsspektroskopie ist dieser lineare Ansatz theoretisch gerechtfertigt und wurde bereits in Kap. 6.3.3 bei der subtraktiven Entmischung der Spektralsignaturen zugrunde gelegt. Demnach lässt sich das Reflexionsspektrum einer Objektkomponente durch die gewichtete lineare Summe der einzelnen Spektralvariablen darstellen.

Die Gewichtungsfaktoren bilden im Regressionsmodell die Regressionskoeffizienten, die in einer Matrix dargestellt werden. Die Aufgabe der multivariaten Regression besteht in der Bestimmung dieser Koeffizientenmatrix. Das einfachste Verfahren zur Bestimmung der Koeffizientenmatrix für ein multivariates Modell ist die **multiple lineare Regression (MLR** – multiple linear regression oder auch OLS – ordinary least squares regression). Die grundlegende allgemeine Gleichung der multiplen Regressionsanalyse lautet (nach BAHRENBERG et al. 1992):

$$Y = k + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_m * X_m + \varepsilon \quad \text{Gl. 44}$$

mit:

$Y$  : abhängige Variable

$X_i$  : unabhängige Variable ( $i=1, \dots, m$ )

$\varepsilon$  : Zufallsfehler (Residuum)

$\beta_i$  : partieller Regressionskoeffizient der Variablen  $X_i$  ( $i=1, \dots, m$ )

$k$  : Regressionskonstante

Der partielle Regressionskoeffizient  $\beta_i$  gibt den spezifischen Einfluss der Variablen  $X$  auf die abhängige Variable  $Y$  wieder. Der Residualwert  $\varepsilon$  beschreibt die Abweichungen, die aus Messfehlern oder aus der Nichtberücksichtigung von Variablen resultieren. Zur Auswahl der Variablen für die multiple Regression sind verschiedene sogenannte schrittweise Verfahren entwickelt worden (vorwärtsgerichtet, rückwärtsgerichtet, schrittweise Auswahl), die in einschlägigen Lehrbüchern dokumentiert sind (SCHÖNWIESE 2000, BACKHAUS ET AL. 2000, BAHRENBERG et al. 1992, STOYAN et al. 1997) und in gängigen Statistikprogrammen implementiert sind. Diese Auswahlverfahren liefern jedoch nur für unkorrelierte Eingangsvariablen befriedigende Ergebnisse, was bei den zu bewertenden Spektralvariablen, wie in Kap. 7.3.1.1 erläutert, nur für bestimmte Fälle vorausgesetzt werden kann ( $R'$ ,  $BNC$ ,  $SNC$ ).

Eine Alternative bzw. Modifikation der multiplen linearen Regression bietet die **Hauptkomponentenregression (PCR** – principal component regression), bei der eine vorgeschaltete Datentransformation durch eine Hauptkomponentenanalyse (PCA) den Effekt der Multikollinearitäten beseitigt.

Die Hauptkomponentenanalyse erstellt für eine gegebene Anzahl von Variablen einen Satz neuer Faktoren (Hauptkomponenten), mit dessen Hilfe sich die gesamte Variation des ursprünglichen Datensatzes reproduzieren lässt. Jede Variable lässt sich als Linearkombination der Faktoren darstellen, d.h., die Faktoren sind nicht direkt messbar, verursachen aber aufgrund Ihrer eindeutigen Beziehungen zu den Variablen deren Korrelation untereinander (BAHRENBERG et al. 1992). Die neu gebildeten Hauptkomponentenvariablen sind untereinander vollkommen unkorreliert. Das Ziel der Hauptkomponentenanalyse ist es,

die wichtigsten Faktoren und ihren Beitrag zur Varianz des Eingangsdatensatzes, die sog. Hauptkomponentenladungen (PCL – principal component loadings) zu bestimmen. Die PCA geht davon aus, dass die gesamte Varianz aller Variablen auf gemeinsame Ursachen zurückgeführt werden kann, also die Hauptkomponenten die gesamte Varianz einer Menge von  $m$  Variablen reproduzieren.

Für die weiteren Schritte zur multivariaten Datenanalyse können sowohl die Hauptkomponenten als auch die Hauptkomponentenladungen herangezogen werden. Je nachdem, für welche Extraktionsmethode man sich entscheidet, müssen Kriterien zur Bestimmung signifikanter Faktoren bzw. Variablen herangezogen werden. Im Falle der Hauptkomponenten gibt es zwei typische Signifikanzkriterien:

- **Anteil der erklärten Varianz:** es werden sukzessive nur so viele Hauptkomponenten berücksichtigt, bis ein bestimmter Schwellenwert der durch die Komponenten beschriebenen Gesamtvarianz der  $m$  Variablen erreicht ist (z. B. 95 %) oder es wird ein Schwellenwert der erklärten Varianz für jede einzelne Hauptkomponente festgesetzt (z. B. 5 %).
- **Eigenwert-Eins-Kriterium (Kaiserkriterium):** Die Varianz der Ausgangsvariablen ist jeweils gleich 1. Ein Eigenwert  $>1$  bedeutet, dass die Hauptkomponente einen größeren Varianzanteil beschreibt als jede einzelne Variable.

Der zunächst als Nachteil erscheinende Effekt des Kaiserkriteriums besteht darin, dass bei einer großen Anzahl von Variablen  $m$  auch Hauptkomponenten mit einem geringen Anteil erklärter Varianz extrahiert werden (siehe hierzu BAHRENBERG et al. 1992). Dies kann aber, wie noch gezeigt werden wird, bei einer Mehrkomponentenanalyse aus einer hohen Anzahl unabhängiger Variablen auch von Vorteil sein. Bei beiden Auswahlkriterien verbleibt durch den Ausschluss einer bestimmten Anzahl von Hauptkomponenten eine Fehlervarianz. Diese entspricht dem auf diese, nicht berücksichtigten, Komponenten entfallenden Varianzanteil.

Die umgekehrte Betrachtungsweise der Ergebnisse der PCA macht von den Ladungen (PCL) Gebrauch. Diese werden als Maß für die Stärke der Beteiligung einer Variablen an einer Hauptkomponente interpretiert. Je größer die Ladung, umso größer ist der Einfluss der sie beschreibenden Variablen auf die Hauptkomponente und damit der Anteil der durch sie beschriebenen Variabilität sowie der Informationsgehalt des gesamten betrachteten Eingangsdatensatzes. Dieses Verfahren trägt nur bedingt zur Beseitigung der Multikollinearitäten des Datensatzes bei, eignet sich aber zur Beschreibung der ausgewählten Hauptkomponenten bzw. zur Interpretation der Regressionsmodelle.

Die folgenden Regressionsmodellierungen machen von den hier vorgestellten Verfahren Gebrauch. Für die Analyse der Ableitungsspektren sowie der Kontinuum-transformierten Variablen wird zunächst eine schrittweise multiple Regression (**MLR<sub>S</sub>**) durchgeführt.

Die übrigen Spektralvariablen werden aufgrund der nachgewiesenen starken Multikollinearitäten durch eine Hauptkomponentenregression (**PCR**) auf die Zielvariablen angewendet. Nach der Extraktionsmethode der erklärten Varianzanteile werden sukzessive nur so viele Hauptkomponenten für die Regressionsanalyse berücksichtigt, bis ein Schwellenwert von 99,5 % Gesamtvarianz der  $m$  Variablen erreicht ist. Die ausgewählten Hauptkomponenten bilden den Datensatz der unabhängigen Variablen  $X_i$  für die multiple Regression gemäß Gl. 44, sie ersetzen hier also die ursprünglich hoch korrelierten Spektralvariablen.

Für die in Kap. 6.5 entwickelten Spektralindizes wird zusätzlich eine **einfache lineare Regression (SLR – single linear regression)** durchgeführt.



### 7.3.3 Anwendung der Regressionsmodelle

Die im vorherigen Kapitel erläuterten Regressionsverfahren (MLR, PCR, SLR) werden im Folgenden auf den Datensatz der Spektralvariablen und deren Derivate angewendet. Hierbei wird, wie bei den weiter oben durchgeführten bivariaten Analysen, die Normalverteilung der Variablenwerte angenommen. Der gesamte zu analysierende Datensatz gliedert sich in die in Tab. 24 aufgeführten sieben Spektralmerkmale für die Feld- und Laborspektren (sowie der Spektralindizes), wobei jeder Datensatz in den aus Kap. 7.2.2 hervorgegangenen spektralen Bandbreiten vorliegt. Unter Berücksichtigung der Normalverteilung ergibt sich eine weitere Aufgliederung anhand der phänologischen Stadien der aufgenommenen Bestandsinformationen. Insgesamt resultiert diese Aufteilung in der Erstellung von jeweils  $7 * 4 * 3 = 84$  Regressionsgleichungen, jeweils für die transformierten spektroradiometrischen Feld- und Labormessungen und eine abhängige Variable. Insgesamt werden für das Testgebiet Imbshausen 14 und für das Testgebiet Neetzow 8 abhängige Variablen (Pflanzenparameter, siehe Kap. 5.1.2) modelliert.

Das Gliederung des Datensatzes für die multivariate Analyse und das Ablaufschema der Hauptkomponentenregression kann Abb. 61 entnommen werden.

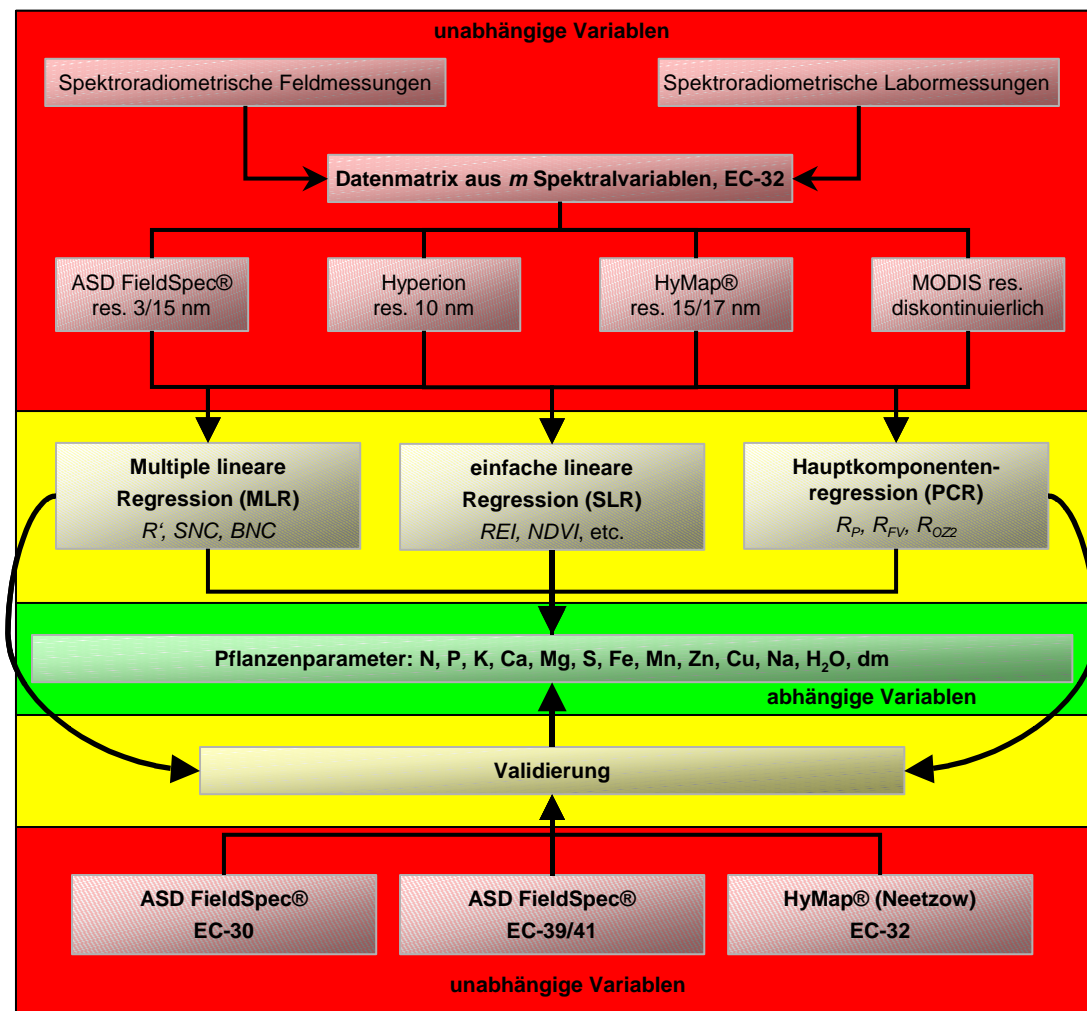


Abb. 61: Ablaufschema für die Regressionsanalyse

Das Regressionsverfahren wird jeweils mit den Variablen eines transformierten Eingangsdatsatzes initiiert.

Für die Durchführung und Auswertung der Regressionsanalysen werden folgenden Modellparameter und Prüfgrößen festgelegt:

- ⇒ Signifikanzschwellenwert für den **Einschluss** einer Variablen: 0.1 (=10%)
- ⇒ Signifikanzschwellenwert für den **Ausschluss** einer Variablen: 0.15
- ⇒ Umfang der Regressionsgleichung: max. **5 Koeffizienten** bzw. unabhängige Variablen (WL, Wellenlängen bzw. HK Hauptkomponenten)
- ⇒ Prüfgrößen:
  - ✓ korrigiertes Bestimmtheitsmaß (*korr.  $r^2$* )
  - ✓ normierter mittlerer Restfehler (*RMSE<sub>n</sub>*, normalised root mean square error; normiert auf den Mittelwert der jew. Zielvariable)

## 7.4 Modellierungsergebnisse und ihre Diskussion

Der Datensatz der abhängigen Variablen wird für die Auswertung der Regressionsanalyse in zwei Gruppen aufgeteilt. Die erste Gruppe bilden die Makronährelemente (N, P, K, Mg, Ca, S), der Wassergehalt ( $H_2O$ ) und die Trockenmasse ( $dm$ ). Die zweite Gruppe beinhaltet die Konzentrationen der Mikronährelemente. Die Regressionsmodelle wurden nach dem in 7.3.3 aufgezeigten Schema zunächst für den Bereich von 580 – 1050 nm (VNIR) erstellt, dann für den eingeschränkten Bereich des SWIR und schließlich für die gesamten betrachteten Wellenlängenbereiche (vgl. Tab. 24). Die Spektralmessungen werden nach dem phänologischen Stadium der Pflanzenbestände zum Zeitpunkt der Aufnahmen in drei Kategorien unterteilt. Die Regressionsanalyse erfolgt für den kompletten Datensatz der Messungen und Referenzdaten zum Zeitpunkt des Schossens (EC-32). Die Modellbildungen für die Messungen in den Wachstumsstadien EC-30 und EC-39/41 erfolgen zur Validierung der Schätzergebnisse aus der multiplen Regression und für die Analyse der spektralen Vegetationsindizes in Kap. 7.4.1.1.

Die Spektralvariablen werden generell in zwei Typen unterschieden, die wellenlängenbasierten, zu denen die Ableitungsspektren und die Kontinuum-transformierten Spektralsignaturen ( $R'$ ,  $BNC$ ,  $SNC$ ) gehören, und die hauptkomponentenbasierten Variablen ( $R_P$ ,  $R_{FV}$ ,  $R_{OZ2}$ ). Für den VNIR-Bereich kommen außerdem die Vegetationsindizes als weitere, i. d. R. dimensionslose Variablen hinzu.

### 7.4.1 Regressionsanalyse spektraler Merkmale im sichtbaren Bereich und im nahen Infrarot (VNIR)

#### 7.4.1.1 Einfache Regression auf Basis der Spektralindizes

Die einfache lineare Regression (SLR) wird verwendet, um aus den in Kap. 6.5 erstellten dualen und multiplen spektralen Vegetationsindizes die Konzentrationen der Makronährelemente zu schätzen. Die Schätzungen beruhen auf der spektralen Reflexion in wenigen Spektralkanälen und können aus diesem Grunde für einen breiten Bereich von Spektralsensoren angewendet werden.

Die Zusammenfassung der Regressionsergebnisse für ausgewählte Indizes<sup>26</sup> in Tab. 28 zeigt, dass in keinem Fall und zu keinem der betrachteten phänologischen Zeitpunkte eine signifikante Beziehung zwischen der Messgröße und der Schätzvariable besteht. Dies schließt die Ergebnisse zur Untersuchung des  $REI$  ein.

---

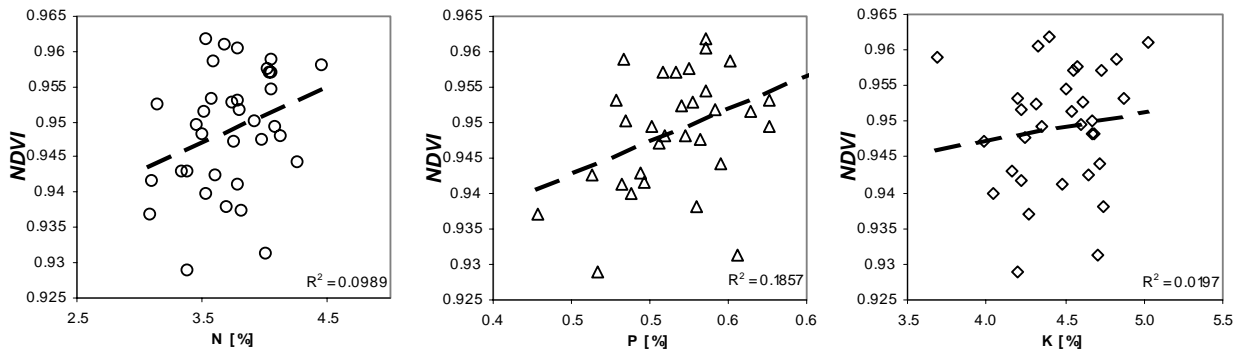
<sup>26</sup> Auf die Darstellung der übrigen in Kap. 6.5.1 aufgelisteten Vegetationsindizes wird aufgrund der vollständigen Korrelationen ( $r^2=1$ ) zu einem der anderen untersuchten Indizes verzichtet.

**Tab. 28: Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ) für die einfache lineare Regression von Pflanzenparametern aus Spektralindizes für verschiedene Wachstumsstadien**

<i>EC-30</i>	<i>NDVI</i>	<i>TVI</i>	<i>PNSI</i>	<i>PSSR<sub>a</sub></i>	<i>REI-linear</i>
<i>h2o</i>	0.02	0.02	0.02	0.02	<b>0.26</b>
<i>N</i>	<b>0.23*</b>	<b>0.23</b>	<b>0.23</b>	<b>0.23</b>	<b>0.15</b>
<i>P</i>	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05
<i>K</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.18</b>
<i>S</i>	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
<i>EC-32</i>	<i>NDVI</i>	<i>TVI</i>	<i>PNSI</i>	<i>PSSR<sub>a</sub></i>	<i>REI-linear</i>
<i>h2o</i>	<b>0.14</b>	<b>0.14</b>	<b>0.14</b>	<b>0.14</b>	0.13
<i>N</i>	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00
<i>P</i>	<b>0.19</b>	<b>0.19</b>	<b>0.18</b>	<b>0.19</b>	<b>0.21</b>
<i>K</i>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05
<i>S</i>	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01
<i>EC-39/41</i>	<i>NDVI</i>	<i>TVI</i>	<i>PNSI</i>	<i>PSSR<sub>a</sub></i>	<i>REI-linear</i>
<i>h2o</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>N</i>	0.09	0.09	0.08	0.12	0.06
<i>P</i>	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
<i>K</i>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.13
<i>S</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

\* Der Zusammenhang ist innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (zweiseitig) statistisch signifikant.

Das Ergebnis der einfachen linearen Regression steht im Gegensatz zu zahlreichen Untersuchungen (BACH & MAUSER 1993, CLEVERS 1994, CLEVERS & BÜKER 1991, HORLER ET AL. 1983, MUNDEN ET AL. 1994, VOGELMANN ET AL. 1993) in denen eine Beziehung zum Versorgungszustand von Kulturpflanzenbeständen (Wassergehalt, Trockenmasse, Wuchshöhe, Nährstoffzustand) nachgewiesen werden konnte. Ein solcher Zusammenhang ist theoretisch auch begründbar, da der äußere Zustand einer Pflanze immer auch den Mangel bzw. Überschuss an lebensnotwendigen Nährelementen widerspiegelt (Zellstruktur  $\leftrightarrow$  IR-Reflexion) und die Chloroplasten zu einem Großteil aus Proteinen bestehen, die wiederum eine direkte Korrelation zum N-Gehalt der Pflanze aufweisen (Chlorophyllgehalt  $\leftrightarrow$  VIS-Absorption). Nach diesen theoretischen Zusammenhängen müsste ein Pflanzenbestand bei guter Versorgung mit den wichtigsten Nährelementen eine höhere Reflexion im NIR und eine höhere Absorption im VIS (v.a. Rot) aufweisen, ein unterversorgter Bestand entsprechend umgekehrte Merkmalsausprägungen (siehe z. B. DAUGHTRY et al. 1998). Dieses Reflexionsmuster hat konsequenterweise steigende Werte der spektralen Vegetationsindizes zur Folge, wenn diese die Strahlung im VIS zu der im NIR ins Verhältnis setzen. Dies wiederum müsste zu positiven Korrelationen der Nährelementkonzentrationen mit den Vegetationsindizes führen. Dieser Zusammenhang wird tatsächlich auch für die untersuchten Vegetationsindizes nachgewiesen (siehe Abb. 62), allerdings ist die Stärke der Zusammenhänge ( $r^2$ ) nicht ausreichend für die Ableitung signifikanter Beziehungen. Vergleichbare, ebenfalls nicht signifikante Zusammenhänge werden von SEMBIRING et al. (1998) für N- und P-Gehalte sowie AL-ABBAS et al. (1974) für N-, P-, Ca-, Mg- und S-Konzentrationen frischer Pflanzenmasse festgestellt. Gegensätzliche Korrelationen, also eine Zunahme der NIR-Reflexion mit abnehmenden Konzentrationen, vor allem für N- und K-Gehalte, werden von THOMAS & OERTHER (1972) sowie GONG et al. (2002) berichtet. Die unterschiedlichen Ergebnisse verdeutlichen die Unsicherheit der Bewertung spektraler Informationen im VNIR-Bereich für die Ableitung biochemischer Konzentrationen in frischer Pflanzenmasse, auch wenn teilweise signifikante Zusammenhänge zwischen den Spektralindizes und den Komponentengehalten erklärt werden können. Dennoch scheint die Betrachtung der spektralen Reflexion nur einzelner, breiter Wellenlängenkanäle zur Konzentrationsschätzung biochemischer Bestandteile für die quantitative Analyse frischer Pflanzenmasse nicht auszureichen.



**Abb. 62:** Streudiagramme für den Zusammenhang zwischen Vegetationsindizes (NDVI) und Nährelementgehalten (N, P, K)

Um den Einfluss der spektralen Bandbreite auf die Bildung der Spektralindizes bewerten zu können, wurden diese für unterschiedliche Bandbreiten simulierter Sensoren (siehe Kap. 7.2.2) errechnet. Das Ergebnis zeigt, dass die Verringerung der spektralen Bandbreite die Güte der Modellierung von Pflanzenparametern durch Spektralindizes nicht beeinträchtigt. Die Resultate bestätigen die Untersuchungen der abbildenden Spektrometerdaten der HyMap®-Kampagne im Untersuchungsgebiet Neetzow. Auch hier konnten keine signifikanten direkten Zusammenhänge zwischen Nährelementgehalten und Spektralindizes festgestellt werden.

**Tab. 29:** Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ) für die einfache lineare Regression von Pflanzenparametern aus Spektralindizes für verschiedene simulierte Bandbreiten (EC-32)

<i>resASD</i>	<b>NDVI</b>	<b>TVI</b>	<b>PNSI</b>	<b>PSSR<sub>a</sub></b>	<b>REI-linear</b>
<b>h2o</b>	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13
<b>N</b>	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00
<b>P</b>	<b>0.19*</b>	<b>0.19</b>	<b>0.18</b>	<b>0.19</b>	<b>0.21</b>
<b>K</b>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05
<b>S</b>	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01
<i>resHyperion</i>	<b>NDVI</b>	<b>TVI</b>	<b>PNSI</b>	<b>PSSR<sub>a</sub></b>	<b>REI-linear</b>
<b>h2o</b>	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13
<b>N</b>	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00
<b>P</b>	<b>0.18</b>	<b>0.18</b>	<b>0.18</b>	<b>0.19</b>	<b>0.21</b>
<b>K</b>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05
<b>S</b>	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01
<i>resHyMap</i>	<b>NDVI</b>	<b>TVI</b>	<b>PNSI</b>	<b>PSSR<sub>a</sub></b>	<b>REI-linear</b>
<b>h2o</b>	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13
<b>N</b>	0.10	0.10	0.10	0.11	0.00
<b>P</b>	<b>0.18</b>	<b>0.18</b>	<b>0.18</b>	<b>0.19</b>	<b>0.22</b>
<b>K</b>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05
<b>S</b>	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
<i>resMODIS</i>	<b>NDVI</b>	<b>TVI</b>	<b>PNSI</b>	<b>PSSR<sub>a</sub></b>	<b>REI-linear</b>
<b>h2o</b>	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>	<b>0.16</b>	0.10
<b>N</b>	0.10	0.10	0.10	0.10	0.01
<b>P</b>	<b>0.20</b>	<b>0.20</b>	<b>0.20</b>	<b>0.21</b>	<b>0.17</b>
<b>K</b>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04
<b>S</b>	0.04	0.04	0.04	0.03	0.00

\* Der Zusammenhang ist innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (zweiseitig) statistisch signifikant.

Generell muss festgehalten werden, dass die Ableitung von biochemischen Bestandsinformationen aus Spektralindizes nicht zu zuverlässigen Ergebnissen führt, abgesehen von mehr oder minder zufälligen indirekten Korrelationen zu den optisch aktiven, das Erscheinungsbild der Pflanze dominierenden Bestandsparametern (Biomasse, LAI, Grünfärbung, etc.). BLACKBURN (1998b) kommt zu ähnlichen Ergebnissen und schlägt statt einer Verhältnisbildung die Analyse einzelner Wellenlängenkanäle zur Schätzung von

Bestandsmerkmalen vor. Sehr hohe Korrelationen von Spektralindizes und ebenfalls der spektralen Reflexion einzelner Spektralbänder im VNIR-Bereich mit Ertragsparametern von Getreidepflanzen werden von BLACKMER et al. (1996) festgestellt. Die Auswertung einzelner Wellenlängenkanäle ist allerdings nur für absolut kalibrierte Reflexionswerte gültig, die in der Regel nicht vorliegen.

Trotz der erwiesenen Unzulänglichkeiten der Spektralindizes zur relativen Quantifizierung von Bestandsmerkmalen werden einfache Indizes in der Regel herangezogen, um die teilflächenspezifische Variabilität von Zustandsparametern landwirtschaftlicher Flächen darzustellen.

Abb. 63 zeigt als Beispiel einen Vergleich der aus dem *NDVI* und aus dem *REI* abgeleiteten räumlichen Inhomogenitäten für die HyMap®-Aufnahme vom 06.05.1999. Die Darstellung der beiden Spektralmerkmale verdeutlicht noch einmal die Problematik bei der Ableitung von Zustandsparametern aus Spektralindizes. Auffällig sind die sehr unterschiedlichen Verteilungsmuster in den beiden Bildern. Das *NDVI*-Bild zeigt relativ hohe Werte für sämtliche Getreideflächen und bildet das Muster der Bearbeitungsrichtung durch niedrigere Werte in den Fahrinnen deutlich ab. Außerdem werden die beiden Winterweizenschläge (5/2 und 9/1) scharf gegeneinander abgegrenzt, was auf die unterschiedliche Sortenwahl zurückzuführen ist. Das *REI*-Bild hingegen zeigt einen deutlichen Abfall der Indexwerte von den Weizen- zu den Gersteflächen und hohe Werte für den zentralen Bereich des Schlages 5/2 (oben) und den angrenzenden Bereich des Schlages 9/1 (unten). In beiden Bildern ist kein augenscheinlicher Zusammenhang zwischen den Verteilungsmustern und der Bodentypenkartierung der Reichsbodenschätzung erkennbar.

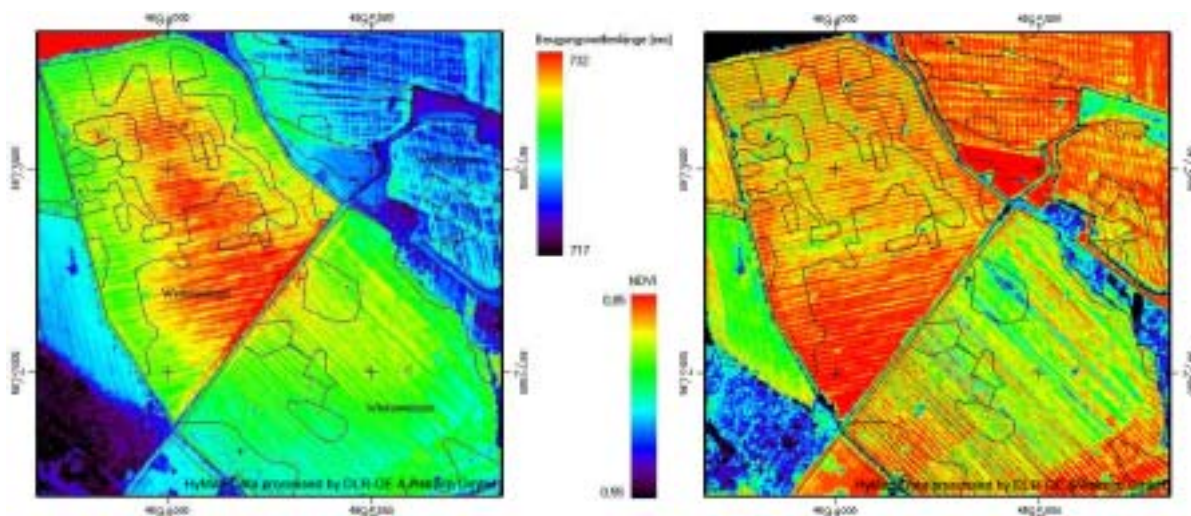


Abb. 63: Spektralindizes (links: *REI*; rechts: *NDVI*) von Winterweizenbeständen im Untersuchungsgebiet "Neetzow"

#### 7.4.1.2 Multiple Regression auf Basis der Spektralvariablen

Die im vorherigen Kapitel aufgezeigten Schwächen der linearen Einfach-Regression von Spektralindizes sowie die Resultate der Korrelationsanalyse in Kap. 7.3.1 unterstreichen die Notwendigkeit einer multivariaten Analyse von Spektralinformationen zur relativen quantitativen Schätzung biochemischer Pflanzenparameter.

Die verwendeten Einflussvariablen gliedern sich in wellenlängenbasierte und hauptkomponentenbasierte Variablen. Entsprechend dieser Definition der Eingangsvariablen wurde zur Schätzung der Komponentenkonzentrationen entweder eine schrittweise multiple Regression (MLR<sub>S</sub>) oder eine Hauptkomponentenregression (PCR) durchgeführt. Die

Hauptkomponententransformation der ursprünglichen Spektralvariablen wurde für diejenigen Variablen durchgeführt, die eine hohe Multikollinearität aufweisen und deshalb in Ihrer Ursprungsform nicht für eine Regressionsanalyse in Frage kommen ( $R_{FV}$ ,  $R_{OZ}$ ,  $R_P$ , vgl. Kap. 7.3.1.1).

Die schrittweise multiple Regression zeigt für die wellenlängenbasierten Variablen der *in situ* Messungen im VNIR-Bereich generell höhere Genauigkeiten des Schätzmodells auf, als für die hauptkomponententransformierten Variablen (Tab. 30). Sämtliche Schätzmodelle auf Basis der Wellenlängenvariablen sind innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (zweiseitig) signifikant. Die Regression mit Hilfe der Ableitungsspektren führt generell zu guten Modellierungen der wichtigsten Komponentengehalte und der Trockenmasse, für die Vorhersage der drei wichtigsten Makronährelemente (N, P, K) liegt die Genauigkeit von allen verwendeten Spektralvariablen am höchsten. Die Kontinuum-basierten Variablen ( $BNC$ ,  $SNC$ ) liefern ebenfalls gute Schätzgrößen für das Regressionsmodell, wobei die Normalisierung auf die Bandtiefe ( $BNC$ ) im Durchschnitt besser geeignet ist zur Schätzung der Makronährelemente. Die Hauptkomponentenregression liefert nur für die Hauptkomponenten der vektorskalierten Variablen signifikante Regressionsmodelle. Die PCR auf Basis der ortstransformierten und kalibrierten Spektralvariablen ergibt lediglich für N- und P-Gehalte und Trockenmasse verlässliche Schätzungen innerhalb des Signifikanzniveaus, die allerdings deutlich unter den Genauigkeiten der übrigen Modelle liegen. Für Mg- und Ca-Konzentrationen wird aufgrund des Signifikanzschwellenwertes für den Einschluss bzw. Ausschluss einer Variablen keine Regressionsgleichung gebildet. Bei allen Schätzungen der Pflanzenparameter durch die Variablen der *in situ* Messungen liegt die mittlere Abweichung der Schätzwerte von den gemessenen Konzentrationen unter 10 % der mittleren Gehalte der abhängigen Variable ( $RMSE_n$ ; Ausnahme: Trockenmasse), was als akzeptables Vorhersageergebnis gewertet werden kann.

Zur Bewertung der Güte der Schätzmodelle auf Basis der *in situ* Messungen wurden zusätzlich Regressionsanalysen für die entsprechenden Kontrollmessungen unter Laborbedingungen durchgeführt. Die Regressionsanalyse der spektroradiometrischen Labormessungen zeigt für die Ableitungsspektren vergleichbare, gute Schätzergebnisse (hohe  $r^2$ ). Im Durchschnitt aller Modellierungen im VNIR-Bereich liegt die Vorhersagegenauigkeit für die Hauptnährelementkonzentrationen über denen der *in situ* Messungen, wobei auch die PCR-Modelle gute Schätzungen liefern. Ausgenommen hiervon sind die Modellierungen der Mg- und Ca-Gehalte, die nicht oder nur zum Teil innerhalb des Konfidenzintervalls liegen. Die mittleren Residuen der Vorhersagemodelle liegen im Bereich der Residuen aus den *in situ* Messungen.

Die Interpretation der Regressionsgleichungen fällt bei den MLR-Modellen leicht, da die Variablenwerte der Wellenlängenkanäle direkt in die Regressionsgleichung eingehen (siehe Beispiele in Tab. 37, Kap. 7.5). Bei der Hauptkomponentenregression wird die Deutung der Regressionen schwieriger, da eine Hauptkomponente (HK) i. d. R. die Varianz einer oder mehrerer Gruppen von Variablenwerten erklärt. Die erste HK enthält hierbei bereits einen Großteil der erklärten Varianz der Eingangsvariablen, in den vorliegenden Fällen liegt der Anteil im Durchschnitt bei über 90 %. Das bedeutet zum einen, dass der überwiegende Teil der Variablen redundante Informationen enthält, die bestenfalls lediglich eine zentrale Zielgröße erklären können. Zum anderen führt diese Tatsache zu der Schlussfolgerung, dass die übrigen abhängigen Variablen entweder nicht durch den Datensatz der Eingangsvariablen erklärt werden können, oder dass die Informationen zur Ableitung der Komponentengehalte in eng begrenzten untergeordneten Bereichen der Spektralsignatur zu suchen sind. Dieser These folgend werden für die PCR auch solche Hauptkomponenten berücksichtigt, die einen geringen Eigenwert ( $<1$ ) aufweisen. Die Notwendigkeit dieser Vorgehensweise wird durch die Betrachtung der HK-basierten Regressionsmodelle bestätigt. Die Variablen der PCR-



Modelle für die Makronährstoffe setzen sich fast ausschließlich aus untergeordneten Hauptkomponenten zusammen. Nur in einem Fall (S-Gehalt) wird das Schätzmodell mit Hilfe der ersten Hauptkomponente gebildet.

**Tab. 30: MLR- bzw. PCR-Regressionsparameter für Makronährelemente und Trockenmasse in Abhängigkeit von der Spektraltransformation (*in situ* und Labor-Messungen im VNIR-Bereich)**

(EC-32) abhängige Variable	<i>in situ</i> Messungen		Spektralvariable	Labormessungen	
	korr. $r^2$	$RMSE_n$		$RMSE_n$	korr. $r^2$
<b>N [%]</b> mtw: 3.73 min: 3.08 max: 4.45 $n=35$	0.589**	5.62	$R'$	7.18	0.328
	0.515	6.10	$BNC$	7.81	0.206
	0.381	6.90	$SNC$	7.22	0.321
	0.401	5.31	$R_{FV}$	6.58	0.436
	0.181*	7.93	$R_{OZZ}$	6.57	0.438
	0.282	7.43	$R_P$	6.57	0.438
<b>P [%]</b> mtw: 0.51 min: 0.42 max: 0.62 $n=32$	0.653	4.40	$R'$	5.24	0.509
	0.426	5.66	$BNC$	5.48	0.461
	0.573	4.88	$SNC$	5.48	0.461
	0.35	6.02	$R_{FV}$	5.27	0.502
	0.332	6.10	$R_{OZZ}$	6.03	0.349
	0.258	6.43	$R_P$	6.03	0.349
<b>K [%]</b> mtw: 4.46 min: 3.68 max: 5.02 $n=32$	0.524	1.42	$R'$	3.95	0.621
	0.453	4.81	$BNC$	5.26	0.344
	0.43	4.91	$SNC$	5.26	0.344
	0.427	4.92	$R_{FV}$	5.15	0.372
	0.12	6.10	$R_{OZZ}$	5.30	0.335
	0.06	6.30	$R_P$	5.30	0.335
<b>Mg [%]</b> mtw: 0.11 min: 0.10 max: 0.13 $n=32$	0.507	4.12	$R'$	5.58	0.099
	0.596	3.73	$BNC$	5.49	0.125
	0.501	4.15	$SNC$	5.49	0.125
	0.153	5.49	$R_{FV}$	5.53	0.113
			$R_{OZZ}$	5.63	0.080
			$R_P$	5.63	0.080
<b>Ca [%]</b> mtw: 0.49 min: 0.41 max: 0.61 $n=32$	0.434	8.10	$R'$	7.00	0.577
	0.396	8.37	$BNC$	10.31	0.082
	0.397	8.36	$SNC$	10.31	0.082
	0.272	9.19	$R_{FV}$	9.93	0.149
			$R_{OZZ}$	8.97	0.305
			$R_P$	8.97	0.305
<b>S [%]</b> mtw: 0.51 min: 0.44 max: 0.60 $n=32$	0.352	6.00	$R'$	5.03	0.545
	0.374	5.96	$BNC$	6.46	0.250
	0.246	6.48	$SNC$	6.46	0.250
	0.357	5.98	$R_{FV}$	5.96	0.361
	0.098	7.09	$R_{OZZ}$	5.96	0.361
	0.167	6.81	$R_P$	5.96	0.361
<b>Trockenmasse</b> [g/m <sup>2</sup> ] mtw: 299.60 min: 175.54 max: 411.98 $n=35$	0.477	13.61	$R'$		
	0.414	14.42	$BNC$		
	0.633	11.40	$SNC$	--	--
	0.446	14.47	$R_{FV}$		
	0.345	15.24	$R_{OZZ}$		
	0.362	15.04	$R_P$		
<b>H<sub>2</sub>O [%]</b> mtw: 85.13 min: 83.60 max: 86.83 $n=35$	0.443	0.71	$R'$		
	0.534	0.65	$BNC$		
	0.534	0.65	$SNC$	--	--
	0.293	0.80	$R_{FV}$		
	0.096	0.91	$R_{OZZ}$		
	0.097	0.91	$R_P$		

\* Der Zusammenhang ist innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (zweiseitig) statistisch signifikant.

\*\* Der Zusammenhang ist innerhalb eines Konfidenzintervalls von 99 % (zweiseitig) statistisch signifikant.



### 7.4.2 Regressionsanalyse spektraler Merkmale im kurzwelligen Infrarot (SWIR)

Die Variablen des SWIR-Bereichs werden unabhängig vom VNIR-Bereich einer Regressionsanalyse zur Schätzung der Makronährstoffe unterzogen. Der Zweck dieser Vorgehensweise liegt in der Überprüfung der These, dass die spektrale Reflexion im SWIR geeignet ist, um Informationen über biochemische Konzentrationen von frischer Pflanzenmasse zu liefern (vgl. z. B. GONG et al. 2002, YODER & PETTIGREW-CROSBY 1995). Die multiple Regression weist für die wellenlängenbasierten Variablen und für die hauptkomponententransformierten Variablen der *in situ* Messungen im VNIR-Bereich generell zufriedenstellende Genauigkeiten des Schätzmodells auf (Tab. 31). Das korrigierte Bestimmtheitsmaß (korr.  $r^2$ ) liegt im Durchschnitt aber unter den Werten der Regressionsanalysen für die VNIR-Variablen (siehe Tab. 30). Die Regressionsmodelle auf Basis der ersten Ableitung liefern für sämtliche Nährelemente die genauesten Schätzungen, der Biomasseanteil wird jedoch durch die Varianz der Ableitungswerte im SWIR-Bereich nicht ausreichend erklärt. Im Gegensatz zu den Modellierungen im VNIR-Bereich tragen die übrigen wellenlängenbasierten Variablen (*BNC*, *SNC*) nur in Einzelfällen (Mg) zur Bildung hochsignifikanter Schätzmodelle (>99 %) bei. Im Verhältnis hierzu liefern die PCA-basierten Regressionsanalysen der *in situ* Messungen für die Makronährelemente bessere Ergebnisse. Auffällig ist die fehlende bzw. unzureichende Modellbildung des Großteils der Spektralvariablen für den Stickstoff-Gehalt (und z. T. auch den Wassergehalt) der frischen Pflanzenmasse.

Dem gegenüber stehen hohe Werte für das Bestimmtheitsmaß der Schätzmodelle für den Stickstoffgehalt der homogenisierten Pflanzenproben unter Laborbedingungen. Die Ursache für dieses Phänomen ist in der Maskierung der Absorptionsbereiche der N-Bindungen durch die Schwingungsbanden anderer SWIR-aktiver Komponenten-Bindungen (Mg, Fe, Al, vgl. Tab. 5) zu vermuten. Die relativ schlechten Schätzergebnisse des Pflanzenwassergehalts können mit dem Fehlen von drei der vier wesentlichen Schwingungsabsorptionsbanden der OH-Bindungen in den betrachteten Spektrumsausschnitten begründet werden, auch wenn theoretisch unter optimaler Aufnahmeconfiguration der einbezogene SWIR-1-Ausschnitt (1100 – 1280 nm) einen deutlichen Bezug zur H<sub>2</sub>O-Konzentration aufweisen sollte. Die Genauigkeiten der Schätzmodelle auf Basis der Labormessungen liegen ebenso wie für die Feldmessungen im Durchschnitt unter denen der Regressionsanalysen des VNIR-Bereichs. Insgesamt liegen aber die mittleren normierten Abweichungen der Vorhersagewerte ( $c_{pred}$ ) von den Messwerten ( $c_{meas}$ ) für die Makronährelemente unter der maximal zulässigen Grenze von 10 % vom Mittelwert der Komponentenkonzentrationen ( $RMSE_n$ ).

**Tab. 31: PCR- bzw. MLR-Regressionsparameter für Makronährelemente und Trockenmasse in Abhängigkeit von der Spektraltransformation (*in situ* und Labor-Messungen im SWIR-Bereich)**

(EC-32) abhängige Variable	<i>in situ</i> Messungen		Spektralvariable	Labormessungen			
	korr. $r^2$	$RMSE_n$		$RMSE_n$	korr. $r^2$		
<b>N [%]</b> mtw: 3.73 min: 3.08 max: 4.45 $n=35$	0.360	7.01	$R'$	} MLR	8.01	0.164	
			$BNC$		4.69	0.714	
			$SNC$		4.73	0.708	
			$R_{FV}$		} PCR	5.53	0.602
			$R_{OZ2}$			5.11	0.660
			$R_P$			5.11	0.660
<b>P [%]</b> mtw: 0.51 min: 0.42 max: 0.62 $n=32$	0.454	5.52	$R'$		6.09	0.336	
	0.298	6.26	$BNC$		6.14	0.324	
	0.171	6.80	$SNC$		6.17	0.317	
	0.241	6.50	$R_{FV}$		6.51	0.240	
	0.325	6.13	$R_{OZ2}$		6.03	0.348	
	0.268	6.39	$R_P$		6.04	0.347	
<b>K [%]</b> mtw: 4.46 min: 3.68 max: 5.02 $n=32$	0.358	5.20	$R'$		4.93	0.425	
	0.058	6.31	$BNC$		4.30	0.563	
	0.058	6.31	$SNC$		5.19	0.362	
	0.349	5.24	$R_{FV}$		4.52	0.516	
	0.334	5.30	$R$		5.08	0.390	
	0.359	5.20	$R_P$		5.08	0.390	
<b>Mg [%]</b> mtw: 0.11 min: 0.10 max: 0.13 $n=32$	0.429	4.44	$R'$		4.52	0.409	
	0.498	4.16	$BNC$		5.46	0.134	
	0.157	5.39	$SNC$		5.46	0.135	
	0.338	4.77	$R_{FV}$		5.10	0.247	
	0.390	4.58	$R_{OZ2}$		4.77	0.339	
	0.336	4.78	$R_P$		4.77	0.340	
<b>Ca [%]</b> mtw: 0.49 min: 0.41 max: 0.61 $n=32$	0.357	8.63	$R'$		9.45	0.230	
	0.247	9.34	$BNC$		8.77	0.337	
	0.210	9.57	$SNC$		8.78	0.335	
	0.367	8.56	$R_{FV}$		9.49	0.223	
	0.187	9.70	$R_{OZ2}$		9.45	0.230	
	0.231	9.44	$R_P$		9.45	0.230	
<b>S [%]</b> mtw: 0.51 min: 0.44 max: 0.60 $n=32$	0.401	5.77	$R'$		6.02	0.349	
	0.202	6.66	$BNC$		5.99	0.355	
	0.104	7.06	$SNC$		5.98	0.358	
	0.177	6.77	$R_{FV}$		5.80	0.397	
	0.168	6.80	$R_{OZ2}$		5.71	0.414	
	0.224	6.57	$R_P$		5.71	0.414	
<b>Trockenmasse</b> [g/m <sup>2</sup> ] mtw: 299.60 min: 175.54 max: 411.98 $n=35$	0.229	16.53	$R'$				
	0.229	16.53	$BNC$		--	--	
	0.469	13.72	$SNC$				
	0.116	17.70	$R_{FV}$				
	0.192	16.92	$R_{OZ2}$				
			$R_P$				
<b>H<sub>2</sub>O [%]</b> mtw: 85.13 min: 83.60 max: 86.83 $n=35$	0.469	0.69	$R'$				
			$BNC$				
			$SNC$		--	--	
	0.143	0.88	$R_{FV}$				
	0.333	0.77	$R_{OZ2}$				
	0.280	0.80	$R_P$				

\* Der Zusammenhang ist innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (zweiseitig) statistisch signifikant.

\*\* Der Zusammenhang ist innerhalb eines Konfidenzintervalls von 99 % (zweiseitig) statistisch signifikant.

### 7.4.3 Regressionsanalyse spektraler Merkmale im gesamten Bereich der solaren Reflexion (VNIR/SWIR)

Nachdem die Regressionsmodelle zur Schätzung von Komponentenkonzentrationen jeweils für den VNIR- und für den SWIR-Bereich erprobt wurden, erfolgt die Schätzung der Pflanzenparameter aus den Feld- und Labormessungen unter Einbeziehung aller ausgewählter Spektralbereiche der solaren Reflexion für die wellenlängen- sowie hauptkomponentenbasierten Variablen.

Die multiplen Regressionsgleichungen erzielen für die wellenlängenbasierten Variablen ( $R'$ ,  $BNC$ ,  $SNC$ ) der *in situ* Messungen generell sehr hohe Schätz-Genauigkeiten auf dem Konfidenzniveau von 99% (Tab. 32). Wie auch schon in den meisten Fällen der vorangehenden Untersuchungen für den VNIR- und SWIR-Bereich erzielt die Regression auf Basis der Ableitungsspektren die besten Schätzergebnisse für sämtliche Messwerte. Die besten Vorhersagemodelle der *in situ* Messungen werden für die N- und P-Konzentration mit Hilfe der Ableitungsspektren erzielt.

Auch die PCR-Modellierungen für die übrigen Spektralvariablen ( $R_{FV}$ ,  $R_{OZ2}$ ,  $R_P$ ) führen im Allgemeinen zu guten Vorhersageergebnissen für die Makronährelemente, auch wenn die  $r^2$ -Werte deutlich unter denen der wellenlängenbasierten Schätzverfahren liegen.

Die hohe Vorhersagegüte der wellenlängenbasierten Verfahren ist die Konsequenz der Aggregation der Wellenlängenkanäle aus dem VNIR- und den SWIR-Modellen zu einem übergreifenden Datensatz von Spektralvariablen, aus denen nach dem Einschlussverfahren der multiplen Regression schrittweise diejenigen Variablen mit der höchsten erklärten Varianz- bzw. Restvarianz ausgewählt werden. Bei den PCR-Modellen ist dieser additive Effekt nicht zwangsläufig gegeben, da durch die Hauptkomponentenbildung immer ein Restfehler nicht-erklärter Varianz verbleibt, der unter Umständen über dem der separaten VNIR- bzw. SWIR-Modellierungen liegen kann (vgl. z. B.  $r^2$ -Werte für P-Gehalt in Tab. 30 und Tab. 32).

Die Kontrollberechnungen mit Hilfe der spektroradiometrischen Labormessungen der homogenisierten Pflanzenproben bestätigen die Ergebnisse der *in situ* Modellierungen. Die Güte der Vorhersagen anhand der Regressionsgleichungen liegt im Mittel für die Nährelemente über denen der feldspektrometrischen Variablen. Sämtliche Regressionsmodelle der VNIR/SWIR-Variablen der Labormessungen sind in der Lage, die Gehaltsschwankungen der Pflanzenbestände für den erhobenen Datensatz signifikant (>95 %) vorherzusagen.

**Tab. 32: MLR- bzw. PCR- Regressionsparameter für Makronährelemente und Trockenmasse in Abhängigkeit von der Spektraltransformation (*in situ* und Labor-Messungen im VNIR/SWIR-Bereich)**

(EC-32) abhängige Variable	<i>in situ</i> Messungen		Spektralvariable	Labormessungen		
	korr. $r^2$	$RMSE_n$		$RMSE_n$	korr. $r^2$	
<b>N [%]</b> mtw: 3.73 min: 3.08 max: 4.45 $n=35$	0.641	5.25	$R'$	MLR	6.71	0.414
	0.515	6.10	BNC		5.06	0.667
	0.381	6.90	SNC		4.86	0.692
	0.448	6.51	$R_{FV}$	PCR	5.68	0.579
	0.178	7.95	$R_{O22}$		6.47	0.454
	0.323	7.21	$R_P$		6.47	0.454
	<b>P [%]</b> mtw: 0.51 min: 0.42 max: 0.62 $n=32$	0.697	4.11	$R'$	4.42	0.650
0.397		5.80	BNC	5.48	0.461	
0.573		4.88	SNC	5.48	0.461	
0.331		6.11	$R_{FV}$	5.45	0.467	
0.174		6.79	$R_{O22}$	5.30	0.497	
0.145		6.91	$R_P$	5.30	0.497	
<b>K [%]</b> mtw: 4.46 min: 3.68 max: 5.02 $n=32$		0.524	4.49	$R'$	3.82	0.656
	0.453	4.81	BNC	4.30	0.563	
	0.430	4.91	SNC	5.19	0.362	
	0.142	6.02	$R_{FV}$	5.56	0.269	
	0.299	5.44	$R_{O22}$	5.20	0.361	
	0.343	5.27	$R_P$	5.20	0.361	
	<b>Mg [%]</b> mtw: 0.11 min: 0.10 max: 0.13	0.579	3.81	$R'$	4.52	0.409
0.554		3.92	BNC	5.00	0.274	
0.501		4.15	SNC	5.00	0.276	
0.180		5.32	$R_{FV}$	5.25	0.201	
0.211		5.22	$R_{O22}$	5.40	0.156	
0.214		5.21	$R_P$	5.40	0.156	
<b>Ca [%]</b> mtw: 0.49 min: 0.41 max: 0.61 $n=32$		0.575	7.02	$R'$	7.00	0.577
	0.564	7.11	BNC	8.77	0.337	
	0.583	6.95	SNC	8.78	0.335	
	0.332	8.80	$R_{FV}$	9.54	0.215	
	0.210	9.57	$R_{O22}$	9.40	0.238	
	0.298	9.04	$R_P$	9.40	0.238	
	<b>S [%]</b> mtw: 0.51 min: 0.44 max: 0.60 $n=32$	0.578	4.85	$R'$	4.43	0.648
0.425		5.66	BNC	5.99	0.355	
0.246		6.48	SNC	5.98	0.358	
0.27		6.37	$R_{FV}$	5.76	0.403	
0.349		6.02	$R_{O22}$	5.83	0.390	
0.361		5.96	$R_P$	5.83	0.390	
<b>Trockenmasse</b> [g/m <sup>2</sup> ] mtw: 299.60 min: 175.54 max: 411.98 $n=35$		0.477	13.61	$R'$		
	0.565	12.41	BNC			
	0.565	12.42	SNC	--	--	
	0.411	14.45	$R_{FV}$			
	0.226	16.56	$O_{22}$			
	0.355	15.13	$R_P$			
	mtw: 85.13 min: 83.60 max: 86.83 $n=35$	0.595	0.61	$R'$		
0.534		0.65	BNC			
0.534		0.65	SNC	--	--	
0.239		0.83	$R_{FV}$			
0.305		0.79	$R_{O22}$			
0.423		0.72	$R_P$			

\* Der Zusammenhang ist innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (zweiseitig) statistisch signifikant.

\*\* Der Zusammenhang ist innerhalb eines Konfidenzintervalls von 99 % (zweiseitig) statistisch signifikant.

Auf der Basis der guten Vorhersageergebnisse der Regressionsanalysen für die Makronährelemente wird in einem weiteren Schritt die Möglichkeit der Schätzung weiterer für die Pflanze lebensnotwendiger Nährelemente aus spektraler Information untersucht. Hierzu werden nach dem gleichen Schema wie für die Vorhersage der Makronährelemente multiple Regressionen (MLR / PCR) für die in Tab. 33 aufgeführten Mikronährelemente, die einen nachweisbaren Anteil an der Bruttozusammensetzung höherer Pflanzen haben (siehe Tab. 7), durchgeführt. Die Regressionsmodelle leiten für die wellenlängenbasierten Variablen in jeweils mindestens einem Fall ( $R'$ ) für alle untersuchten Messgrößen (Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, Na) hoch-signifikante Zusammenhänge ( $>99\%$ ) zu dem Satz der Eingangsvariablen ab. Die höchsten Werte für das Gütemaß der Regressionsanalyse ( $r^2$ ) werden für die Schätzung der Zn-Konzentration durch die Kontinuum-transformierten Variablen (*BNC*; *SNC*) erreicht. Gleichzeitig führt aber die ZN-Gehalts-Schätzung aus den PCR-Modellen zu keinem Ergebnis. Ähnlich starke Schwankungen der Vorhersagegüte in Abhängigkeit vom Eingangsdatensatz sind für den Fe- und Cu-Gehalt zu beobachten.

Dem hohen Bestimmtheitsmaß für die Vorhersage der Komponentenkonzentrationen stehen für die Mikronährelemente die ebenfalls hohen mittleren normierten Residuen ( $RMSE_n$ ) gegenüber. Die Werte liegen für sämtliche Schätzmodelle z. T. beträchtlich über dem für die Auswertungen festgelegten Grenzwert von 10 % maximaler Abweichung vom Mittelwert der Komponentenkonzentration. Das bedeutet, dass die Schätzung der Mikronährelementgehalte aus den zur Verfügung stehenden Spektralvariablen für den untersuchten Datensatz der *in situ* und Labormessungen nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich ist.

Die Hauptursache dieser mangelhaften Schätzergebnisse liegt in den niedrigen Anteilen und den hohen Schwankungsbreiten der getesteten Mikronährelemente an der gesamten untersuchten, optisch aktiven Pflanzenmasse und der begrenzten spektralen Auflösung und radiometrischen Genauigkeit des verwendeten Sensors (*SNR*, vgl. hierzu Kap. 4.1.3). Hinzu kommen mögliche Unsicherheiten bei den Laboruntersuchungen, da die Elementkonzentrationen z. T. nahe an der unteren Nachweisgrenze liegen. Die Absorptionsmerkmale der untersuchten Elemente bzw. deren Bindungen mit organischen Verbindungen liegen für die ASD FieldSpec<sup>®</sup>-Messungen zum überwiegenden Teil im SWIR vor. Hier kommt es durch die enge Scharung der Schwingungs- und Rotations-Absorptionsbanden zur Überlagerung bzw. Auslöschung oder Maskierung von Merkmalen. Diese untergeordneten Signaturmerkmale wiederum können nur spektral erfasst werden, wenn die spektrale Auflösung des zur Verfügung Aufnahmesystems unter der Halbwertsbreite des Absorptionsmerkmals (FWHM) liegt. Die Spektrale Auflösung des ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro JR liegt bei 3 nm für den VNIR-Bereich und 15 nm für den SWIR-Bereich. Berücksichtigt man ferner das in Kap. 4.1.3 dargelegte Verhältnis zwischen Signal- und Rauschanteil einer Messung, dann wird deutlich, dass, streng betrachtet, die hohen Vorhersagegenauigkeiten der Modellierung für die Mikronährelemente der Pflanzenaufnahmen zu einem nicht zu vernachlässigenden Anteil auf zufällige, scheinbare Zusammenhänge zurückzuführen sein müssen. Diese These unterstreicht auch die weiter oben geäußerte Annahme zu den Residuen der Schätzungen und führt in dieser Konsequenz zur Verwerfung der Schätzergebnisse der Mikronährelementkonzentrationen für die weiteren Betrachtungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit.

**Tab. 33: PCR- bzw. MLR-Regressionsparameter für Mikronährelemente in Abhängigkeit von der Spektraltransformation (*in situ* und Labor-Messungen im VNIR/SWIR-Bereich)**

(EC-32) abhängige	<i>in situ</i> Messungen		Labormessungen		
	korr. $r^2$		Spektralvariable	$RMSE_n$	korr. $r^2$
	0.705	24.37	$R'$	35.96	0.359
	0.558	29.88	$BNC$		
	0.456	33.13	$SNC$		
	0.17	40.92	$R_{FV}$		
	0.103	42.55	$R_{OZZ}$		
	0.114	42.28	$R_P$		
mtw: 56.61 min: 36.68 max: 81.01 $n=32$	0.65	11.54	$R'$	14.21	0.469
	0.633	11.55	$BNC$	14.59	0.440
	0.329	15.97	$SNC$	14.98	0.410
	0.426	14.77	$R_{FV}$	13.81	0.498
	0.445	14.53	$R_{OZZ}$	15.99	0.327
			$R_P$	15.99	0.327
<b>Zn [ppm]</b> mtw: 28.88 min: 18.48 max: 85.78 $n=32$	0.42	29.54	$R'$	25.48	0.569
	0.8	17.34	$BNC$	37.34	0.074
	0.812	16.81	$SNC$	35.41	0.167
			$R_{FV}$		
			$R_{OZZ}$		
			$R_P$		
<b>Cu [ppm]</b> mtw: 5.22 min: 3.25 max: 9.17 $n=32$	0.573	12.77	$R'$	14.66	0.437
	0.304	16.31	$BNC$	14.01	0.486
	0.178	17.71	$SNC$	14.01	0.486
	0.124	18.29	$R_{FV}$	16.91	0.252
	0.208	17.40	$R$	16.26	0.308
	0.345	15.82	$R_P$	16.25	0.308
<b>Na [ppm]</b> mtw: 45.87 min: 0.98 max: 107.26 $n=32$	0.632	17.64	$R'$	22.72	0.209
	0.616	18.02	$BNC$	24.50	0.291
	0.269	24.87	$SNC$	24.81	0.273
	0.319	24.00	$R_{FV}$	27.22	0.125
	0.205	25.95	$R_{OZZ}$	25.67	0.222
	0.066	28.12	$R_P$	25.67	0.222

\* Der Zusammenhang ist innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (zweiseitig) statistisch signifikant.

\*\* Der Zusammenhang ist innerhalb eines Konfidenzintervalls von 99 % (zweiseitig) statistisch signifikant.

#### 7.4.4 Regressionsanalyse unterschiedlicher simulierter Bandbreiten

Ein definiertes Ziel der Arbeit ist es, aus den Untersuchungen des Informationsgehalts der spektroradiometrischen Messungen Empfehlungen für die Bandbreiten zukünftiger Missionen abbildender Multi- bzw. Hyperspektralsensoren zu geben. Hierzu werden in einem weiteren Schritt der Regressionsanalyse zunächst die Zentrumswellenlängen bestehender Spektrosensoren als Stützstellen für die Simulation der spektralen Auflösung verschiedener Systeme verwendet. Das spektrale Resampling der ASD FieldSpec<sup>®</sup>-Messungen (vgl. Kap. 7.2.2) hat zur Bildung dreier neuer Datensätze geführt, die als unabhängige Variablen in der Regressionsanalyse zur Schätzung der biochemischen Parameter herangezogen werden (siehe hierzu Tab. 25). Mit Ausnahme der MODIS-simulierten Spektren erfolgt die Auswertung nach dem gleichen Schema wie in den vorangegangenen Kapiteln für die reduzierten ASD-Spektren, d. h., der Datensatz gliedert sich in wellenlängebasierte und hauptkomponentenbasierte Spektralvariablen als Eingangsvariablen für die multiple lineare Regression. Aufgrund der im Mittel nicht zufriedenstellenden Ergebnisse der Vorhersagegüte für die ortszentrierten sowie kalibrierten Spektren wird von einer Berücksichtigung dieser Spektralvariablen für die weiteren Analysen abgesehen, da hiervon kein Mehrertrag an Information erwartet wird.

Bei den simulierten MODIS-Spektren erübrigt sich die Datenreduktion der skalierten Variablen durch eine vorgeschaltete Hauptkomponentenregression, da bei der geringen Anzahl diskontinuierlicher Spektralkanäle die Konsistenzkoeffizienten der bereits durch das Resampling dimensionsreduzierten Datensätze abnehmen. Das heisst, die Multikollinearitäten sind nicht mehr so ausgeprägt wie bei den kontinuierlichen Spektren der übrigen simulierten Reflexionssignaturen.

Die Vorhersagegüten der Regressionsmodelle zur Schätzung der Hauptnährelementanteile (incl. Trockenmasse und Wassergehalt) für die *in situ* Messungen und die daraus simulierten Bandbreiten sind in Tab. 34 dargestellt.

Die Auflistung der Vorhersagegenauigkeiten durch das Bestimmtheitsmaß  $r^2$  bestätigt zwei grundlegende Annahmen, die auch bereits früheren Abschnitte dieser Arbeit geäußert wurden:

- (1) Die erste Ableitung ist in fast allen Fällen, in denen signifikante Zusammenhänge zwischen einer abhängigen und mehreren unabhängigen Variablen erkannt werden, am besten geeignet zur Vorhersage von Komponentenkonzentrationen. Dies gilt auch für die Ableitungsspektren spektral reduzierter Funktionskurven.
- (2) Für die Gehalts-Schätzung biochemischer Pflanzenkomponenten durch multivariate Regressionsmodelle ist eine spektrale Bandbreite, wie sie bereits in verfügbaren abbildenden Sensoren eingesetzt wird, ausreichend. Wichtiger scheint vielmehr die Festlegung distinkter, kontinuierlicher Spektralbereiche innerhalb des solaren Spektrums.

**Tab. 34: Güte der Regressionsmodellierung ausgewählter Pflanzenparameter in Abhängigkeit von der spektralen Bandbreite**

abhängige Variable	Spektralvariable	res ASD korr. $r^2$	res Hyperion korr. $r^2$	res HyMap korr. $r^2$	res MODIS korr. $r^2$
<b>N</b>	$R'$	0.64	0.58	0.51	0.07
	BNC	0.52	0.43	0.36	0.28
	SNC	0.38	0.43	0.36	0.28
	$R_{FV}$	0.45	0.36	0.46	0.08
<b>P</b>	$R'$	0.70	0.74	0.63	0.35
	BNC	0.40	0.52	0.32	0.28
	SNC	0.57	0.52	0.32	0.28
	$R_{FV}$	0.33	0.20	0.25	0.17
<b>K</b>	$R'$	0.52	0.62	0.48	0.15
	BNC	0.45	0.06	0.08	
	SNC	0.43	0.06	0.12	
	$R_{FV}$	0.14	0.27	0.08	
<b>Mg</b>	$R'$	0.58	0.61	0.41	0.41
	BNC	0.55	0.14	0.21	0.13
	SNC	0.50	0.14	0.61	0.13
	$R_{FV}$	0.18	0.28	0.28	
<b>Ca</b>	$R'$	0.58	0.61	0.27	0.09
	BNC	0.56	0.41	0.40	0.13
	SNC	0.58	0.41	0.53	0.13
	$R_{FV}$	0.33	0.36	0.27	
<b>S</b>	$R'$	0.58	0.34	0.33	0.07
	BNC	0.43	0.26	0.29	0.07
	SNC	0.25	0.16	0.53	0.07
	$R_{FV}$	0.27	0.36	0.07	
<b>Trockenmasse</b>	$R'$	0.48	0.39	0.55	
	BNC	0.57	0.64	0.56	0.36
	SNC	0.57	0.64	0.56	0.36
	$R_{FV}$	0.41	0.42	0.42	
<b>H<sub>2</sub>O</b>	$R'$	0.60	0.41	0.35	0.16
	BNC	0.53	0.31	0.33	0.14
	SNC	0.53	0.30	0.37	0.14
	$R_{FV}$	0.24	0.32	0.27	0.09

\* Der Zusammenhang ist innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (zweiseitig) statistisch signifikant.

\*\* Der Zusammenhang ist innerhalb eines Konfidenzintervalls von 99 % (zweiseitig) statistisch signifikant.

### 7.4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Regressionsanalyse

Im Mittelpunkt der Untersuchungen zur Regressionsanalyse in den vorherigen Kapiteln standen die Beziehungen zwischen spektraler Information und den Nährelementkonzentrationen frischer und getrockneter Pflanzenmasse.

Grundsätzlich dienten die Untersuchungen zur Klärung folgender Fragen:

- (1) Welcher Wellenlängenbereich ist zur Ableitung von Komponentenkonzentrationen aus Spektralinformation am besten geeignet?
- (2) Welches Standardisierungsverfahren liefert den besten Eingangsdatensatz für die multiple Regression (MLR)?
- (3) Können Ergebnisse der Laborspektroskopie auf *in situ* Messungen übertragen werden?
- (4) Welche spektrale Auflösung wird für die multivariate Analyse von Pflanzenaufnahmen zur Vorhersage von Komponentenkonzentrationen benötigt?
- (5) Wird das Vorhersagemodell durch andere (biophysikalische) Faktoren beeinträchtigt?

Die Schätzmodelle auf Basis der Wellenlängenkanäle im VNIR-Bereich (580 – 1050 nm) weisen im Allgemeinen eine bessere Vorhersagegüte ( $r^2$ ) für *in situ* Messungen auf als diejenigen für den SWIR-Bereich (Tab. 35). Die Kombination der beiden Spektralbereiche führt in den meisten Fällen zu leichten Verbesserungen der Vorhersagegenauigkeit, die aber das Signifikanzniveau der Vorhersage nicht entscheidend verbessern. Die Gründe hierfür sind zum einen systembedingt (höhere spektrale Auflösung, niedrigeres Signal-Rausch-Verhältnis im VNIR), zum anderen durch die Genese der Absorptionsbanden zu erklären. Die Absorptionsbanden im VIS sind auf Elektronenübergänge zurückzuführen, für die Energie elektromagnetischer Strahlung "eingefangen" wird. Die Energiebeträge, die hierfür benötigt werden, sind um ein Vielfaches höher, als diejenigen, die zur Ausbildung von Molekülschwingungen und Rotationsbewegungen führen und entsprechend die Strahlung im NIR / SWIR aufnehmen. Umso deutlicher schlagen sich auch die Energieumwandlungen im VIS in der Spektralsignatur nieder.

Zusätzlich weist der VNIR-Bereich mit dem Rot-Absorptionsbereich und dem R-IR-Anstieg zwei signifikante Signaturmerkmale auf, die in jedem Vegetationsspektrum markant hervortreten. Entsprechend deutlich treten auch Änderungen dieser Merkmale in den normierten Spektralbereichen hervor.

**Tab. 35: Konzentrations-Schätzungen der Makronährelemente und der Trockenmasse aus der Regressionsanalyse für das jeweils beste Spektralderivat (*in situ* Messungen)**

(EC-32)	abhängige Variable							
<i>in situ</i> Messungen (VNIR)	N	P	K	Mg	Ca	S	dm	H <sub>2</sub> O
Spektralderivat	$R'$	$R'$	$R'$	$BNC$	$R'$	$BNC$	$SNC$	$BNC/SNC$
corr. $r^2$	0.589*	0.653	0.524	0.596	0.434	0.374	0.633	0.534
$RMSE_n$	5.62	4.4	1.42	3.73	8.1	5.96	11.4	0.65
Regressionsverfahren	MLR	MLR	MLR	MLR	MLR	MLR	MLR	MLR
Anzahl Variablen (HK / WL)	5	5	5	5	5	5	5	5
<i>in situ</i> Messungen (SWIR)	N	P	K	Mg	Ca	S	dm	H <sub>2</sub> O
Spektralderivat	$R'$	$R'$	$R_p$	$BNC$	$R_{FV}$	$R'$	$R_{FV}$	$R'$
corr. $r^2$	0.36	0.454	0.359	0.498	0.367	0.401	0.469	0.469
$RMSE_n$	7.01	5.52	5.2	4.16	8.57	5.78	13.72	0.690
Regressionsverfahren	MLR	MLR	PCR	MLR	PCR	MLR	PCR	MLR
Anzahl Variablen (HK / WL)	4	4	4	5	4	4	5	5
<i>in situ</i> Messungen (gesamt)	N	P	K	Mg	Ca	S	dm	H <sub>2</sub> O
Spektralderivat	$R'$	$R'$	$R'$	$R'$	$SNC$	$R'$	$BNC/SNC$	$R'$
corr. $r^2$	0.641	0.697	0.524	0.579	0.583	0.578	0.565	0.595
$RMSE_n$	5.25	4.11	4.49	3.81	6.95	4.85	12.41	0.610
Regressionsverfahren	MLR	MLR	MLR	MLR	MLR	MLR	MLR	MLR
Anzahl Variablen (HK / WL)	5	5	5	5	5	5	3	5

\* Alle Zusammenhänge sind innerhalb eines Konfidenzintervalls von 99 % (zweiseitig) statistisch signifikant.



Mit Ausnahme des SWIR-Bereichs wird die beste Vorhersage immer durch ein Regressionsmodell auf Basis der wellenlängenbasierten Spektralvariablen ( $R'$ ,  $BNC$ ,  $SNC$ ) gebildet. Die Ableitungsspektren und die Kontinuum-transformierten Spektren bilden die lokalen Extrema bzw. Minima ( $BNC$ ,  $SNC$ ) am besten heraus und führen gleichzeitig zur Minimierung der Einflüsse multiplikativer oder additiver Effekte auf die Ausbildung der Funktionsmerkmale. Gleichzeitig werden vor allem durch die Ableitung und die  $SNC$ -Skalierung (vgl. Kap. 6.6.2.3) enge, untergeordnete Spektralmerkmale innerhalb breiter Absorptionsbereiche (z. B. von Pflanzenwasser) hervorgehoben.

Die erste Ableitung der geglätteten Spektren (vgl. Kap. 6.2) führt generell zur Ausbildung signifikanter Vorhersagemodelle und wird deshalb für die Überprüfung der Übertragbarkeit der Modelle in Kap. 7.4.6 verwendet.

Die Vorhersagegenauigkeit der Konzentrationen für die untersuchten Mikronährelemente ist auf den ersten Blick vergleichbar mit der für die Hauptnährelemente (vgl. Tab. 35 und Tab. 36). Für die Beurteilung der Schätzgüte müssen hier aber zusätzlich die mittleren normierten Residuen ( $RMSE_n$ ) der Schätzmodelle betrachtet werden. Diese zeigen trotz des hohen Bestimmtheitsmaßes überdurchschnittlich starke Abweichungen der Vorhersagewerte ( $c_{pred}$ ) von den Messwerten ( $c_{meas}$ ). Dieses Beispiel zeigt, dass zur Bewertung der Vorhersagegenauigkeit nicht ein einzelnes Gütemaß ausreicht, sondern je nach Ausprägung der Variablenwerte verschiedene Kennwerte unterschiedliche Aussagen liefern. Die Schätzung der Mikronährelementkonzentrationen aus den Spektralvariablen wird aufgrund der hohen mittleren Restfehler der Schätzung verworfen.

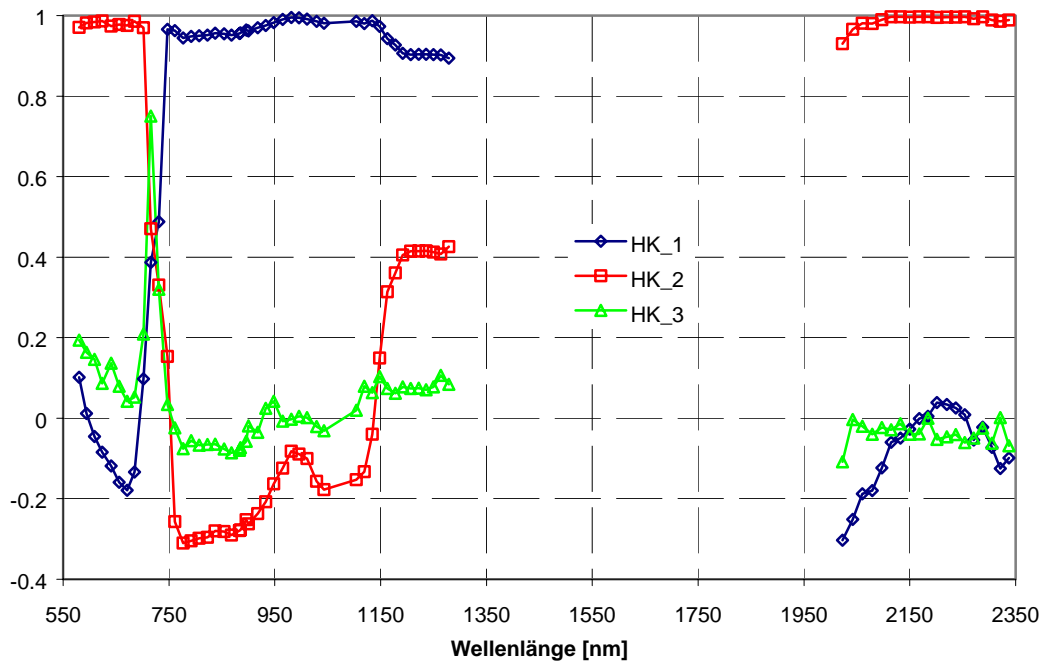
**Tab. 36: Konzentrations-Schätzungen der Mikronährelemente aus der Regressionsanalyse für das jeweils beste Spektralderivat (*in situ* und Labormessungen)**

(EC-32)	abhängige Variable							
	<i>in situ</i> Messungen ( <b>gesamt</b> )	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo	Na	Al
Spektralderivat	R'	R'	SNC	R'	R <sub>P</sub>	R'	R'	
korr. $r^2$	0.705	0.65	0.812	0.573	0.531	0.632	0.559	
RMSE <sub>n</sub>	24.37	11.54	16.81	12.77	32.49	17.64	46.88	
Regressionsverfahren	MLR	MLR	MLR	MLR	PCR	MLR	MLR	
Anzahl Variablen (HK / WL)	5	5	5	5	5	5	5	

Die Hauptkomponentenregression (PCR) führt nur in wenigen Fällen für die Hauptnährelementkonzentrationen zu Ergebnissen, die mit denen der MLR vergleichbar sind (vgl. Tab. 30 bis Tab. 32). Obwohl durch die Transformation der Einflussvariablen ( $R_P$ ,  $R_{FV}$ ,  $R_{OZ2}$ ) in unkorrelierte Hauptkomponenten ein Datensatz mit bestmöglicher erklärter Varianz vorliegt, ist die Vorhersagegüte im Mittel schlechter als für die übrigen Modellierungen. Dies kann mit dem hohen Anteil erklärter Varianz (>95%) in den ersten beiden Hauptkomponenten begründet werden. Auch wenn eine höhere Anzahl von Hauptkomponenten in die Regressionsanalyse einbezogen wird, ändert dies nichts an der minderen Qualität des Eingangsdatensatzes, die durch die hohen Multikollinearitäten der Variablenwerte bedingt ist (vgl. hierzu Kap. 7.3.1.1). Die ersten drei Hauptkomponenten der kalibrierten bzw. skalierten Spektralvariablen beschreiben pauschal lediglich  $3 \pm 1$  große Wellenlängenbereiche (siehe Abb. 64). Die erste HK enthält i.d.R. die Varianz des VIS und NIR/SWIR-1-Bereichs (hier: 580 – 730 nm, 750 – 1280 nm), die zweite HK beschreibt den R-IR-Anstieg ( $REI$ : 700 – 750 nm) und die dritte HK enthält in den meisten Fällen die Varianz des kompletten SWIR-2-Bereichs (2000 – 2350 nm). Wendet man diese Feststellung auf die Beantwortung der Frage nach der bestmöglichen spektralen Auflösung eines Fernerkundungssystems zum Vegetationsmonitoring an, wären in dieser Konsekuensi lediglich drei oder vier breite Wellenlängenkanäle im VIS,  $REI$ , NIR/SWIR und SWIR-2 notwendig, um den Versorgungszustand eines Pflanzenbestands annähernd genauso gut zu beschreiben, wie es

mit Hilfe des kompletten Datensatzes eines hochauflösenden Spektrometers der Fall wäre. Zu vergleichbaren Ergebnissen bei der Auswertung der Hauptkomponentenmatrizen von nicht-transformierter Spektrometerdaten kommt CLEVERS (1999).

Der Nachteil breiter Spektralkanäle liegt jedoch in der begrenzten Möglichkeit der differentialanalytischen Transformation und Auswertung solcher Spektralinformationen, was wiederum eine multivariate Auswertung zum Zwecke der Zustandsbeschreibung natürlicher Oberflächen unmöglich macht.



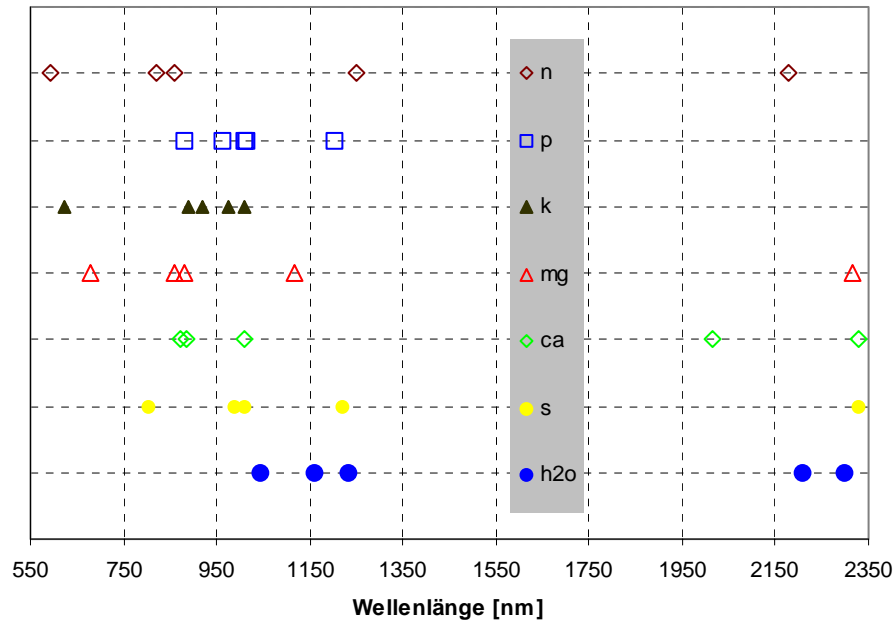
**Abb. 64:** Faktorladungen (Korrelationskoeffizienten) der ersten drei Hauptkomponenten für einen Datensatz skaliertes Winterweizenspektren ( $R_{FV}$ ) (Imbshausen, Schlag: Unter dem Echter Wege)

Für die multivariate Datenauswertung mit Hilfe einer Regressionsanalyse ist die spektrale Bandbreite des Aufnahmesystems bis zu einem oberen kritischen Grenzwert (ca. 10 nm) nicht das entscheidende Kriterium für den Informationsgehalt eines Sensors. Die Simulation der ASD FieldSpec<sup>®</sup>-Messungen auf die spektrale Bandbreite bestehender Hyperspektralsensoren (EOS-1/Hyperion, HyMap<sup>®</sup>, siehe Kap. 7.4.4) brachte keine wesentlichen Einbußen in der Güte der Schätzmodelle zur Vorhersage von Komponentenkonzentrationen ( $c_{meas}$ ) mit sich. Entscheidend für die Auswertung von Vegetationsspektren ist vielmehr ein möglichst hohes, konstantes Signal-Rausch-Verhältnis ( $SNR$ ) und die Lage der Zentrumswellenlängen eines Wellenlängenkanals.

Die vergleichende Auswertung der durch die *in situ* und die Labormessungen gebildeten Regressionsmodelle führt zu dem Schluss, dass die Regressionsparameter der Schätzmodelle für die Labormessungen nicht ohne weiteres auf Vorhersagemodelle für *in situ* Spektralsignaturen übertragen werden können (siehe auch bei JACQUEMOUD et al. 1995). Die durch die schrittweise Regression detektierten Wellenlängenkanäle mit der höchsten erklärten Varianz für die jeweilige abhängige Variable (Komponentenkonzentration) sind für die spektroradiometrischen Labormessungen und die entsprechenden Feldaufnahmen nur vereinzelt deckungsgleich. In der Regel besteht kein Zusammenhang zwischen den durch den Algorithmus ausgewählten Spektralkanälen.

Für die *in situ* Messungen weist jede der untersuchten Komponenten einen individuellen Datensatz von maximal fünf Einflussvariablen auf, die die Variabilität der Messwerte am

besten erklären können (Abb. 65). Hierbei gibt es so gut wie keine Überschneidungen zu den erklärenden Variablen für den Pflanzenwassergehalt, was die Unabhängigkeit der Signaturmerkmale untereinander und vor allem in Bezug zum Wassergehalt unterstreicht. Für die vorliegende Untersuchung besteht auf der Basis des transformierten Datensatzes (Ableitungsspektren) keine Beeinträchtigung der Signaturmerkmale für die Hauptnährelemente durch die Wasserabsorptionsbanden.



**Abb. 65:** Lage der Wellenlängenkanäle mit der höchsten erklärten Varianz der Nährelementkonzentrationen von Winterweizenbeständen (*in situ* Messungen)

Die Schätzung von Komponentenkonzentrationen aus Spektralinformationen mit Hilfe der multiplen schrittweisen Regression liefert insgesamt vielversprechende Ergebnisse, selbst wenn nur der VNIR-Bereich betrachtet wird. Die durch das Iterationsverfahren ausgewählten Wellenlängenkanäle sind nicht stabil, liegen jedoch in den meisten Fällen in oder in der Nähe eines nachgewiesenen Absorptionsbereiches für das jeweilige Element, bzw. den durch dieses geprägte Stoffwechselprodukt oder ein verwandtes Element (siehe hierzu Zusammenfassung in CURRAN 1989 und BARTON et al. 1992). Die Regressionsparameter für die Schätzung der Hauptnährelemente N, P und K aus spektroradiometrischen *in situ* Messungen von Winterweizenbeständen sind in Tab. 37 zusammengestellt.

**Tab. 37:** Regressionsparameter ausgewählter Schätzmodelle für den VNIR und den SWIR-Bereich (EC-32)

<i>in situ</i> Messungen	N		P		K	
$r^2$	0.59*	0.36	0.65	0.45	0.52	0.36
$RMSE_n$	5.61	7.01	4.40	5.52	1.41	5.20
Wellenlängen	<b>637 (Ch<sub>b</sub>)</b>	1250	880	1145	625	1160
	<b>661 (Ch<sub>a</sub>)</b>	2105	<b>964 (H<sub>2</sub>O)</b>	1280	889	1175
	730	2165	1009	<b>2045 (N)</b>	<b>919 (N)</b>	<b>1220 (H<sub>2</sub>O)</b>
	784	<b>2180</b>	1012	<b>2315 (N)</b>	<b>976 (H<sub>2</sub>O)</b>	2330
	<b>1024</b>		<b>1018 (N)</b>		1009	
Transformation	$R'$		$R'$		$R'$	
Spektralbereich	VNIR	SWIR	VNIR	SWIR	VNIR	SWIR

(fettgedruckte Wellenlängen indizieren einen indirekten Zusammenhang zum Absorptionsmerkmal eines anderen Elements, fett rotgedruckte Wellenlängen indizieren einen direkten kausalen Zusammenhang zu dem Absorptionsmerkmal)

\* Alle Zusammenhänge sind innerhalb eines Konfidenzintervalls von 99 % (zweiseitig) statistisch signifikant.

### 7.4.6 Übertragbarkeit der Modelle

Der Validierung der Regressionsmodelle aus den vorangegangenen Kapiteln liegt die These zur Grunde, dass diese zur Vorhersage der abhängigen Variablen geeignet sind. Zur Überprüfung dieser Annahme werden unterschiedliche Ansätze angewendet, die in anderen Arbeiten oftmals missverständlich unter dem Oberbegriff Kreuzvalidierung zusammengefasst werden (vgl. z. B. CURRAN et al. 2001 und UDELHOVEN et al. 2001):

- (1) Die Regressionsgleichungen (Koeffizienten und Wellenlängen) werden verwendet, um die Konzentrationen für den verwendeten Datensatz der abhängigen Variablen vorherzusagen (**interne Validierung**). Die Güte der Vorhersage wird über die mittleren Residuen ausgedrückt.
- (2) Die Wellenlängenkanäle der Spektralvariablen mit dem besten Schätzergebnis ( $r^2$ ) für die jew. Pflanzenparameter werden als Eingangsdatensatz für eine multiple Regression (Einschlussverfahren,  $MLR_E$ ) zur Vorhersage von Komponentenkonzentrationen eines Kontrolldatensatzes verwendet (**Kreuzvalidierung**)
- (3) Das Regressionsverfahren ( $R' \rightarrow MLR_S$ ) wird ohne Vorgabe von Modellparametern auf einen externen Datensatz angewendet (**externe Validierung**)

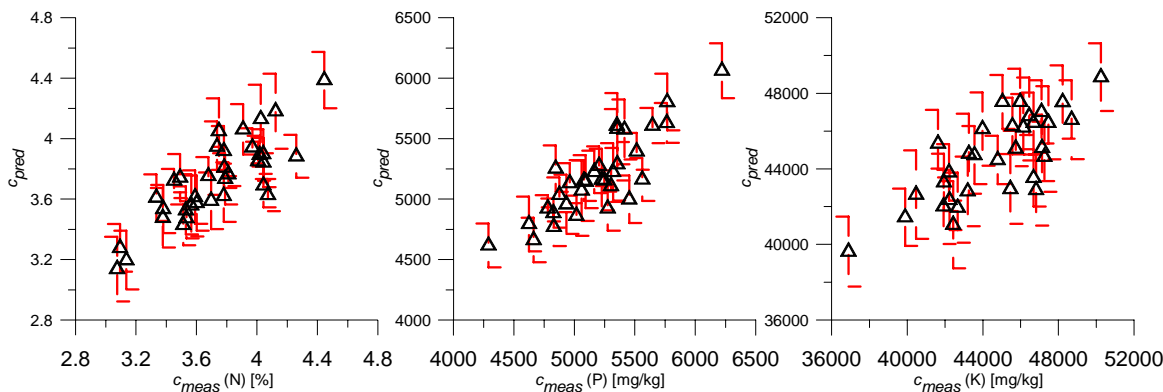
Die weitreichendste Form der Validierung wäre dieser Terminologie folgend eine „globale“ Validierung, die die Regressionsparameter (Koeffizienten und Einflussvariablen) auf externe Datensätze von Spektralvariablen zur Beschreibung natürlicher Oberflächen anwendet. Dies würde voraussetzen, dass die gebildeten Regressionskoeffizienten reproduzierbar sind, was aber nur für völlig unkorrelierte Einflussvariablen möglich ist. Die gleichzeitige Erfüllung dieser beiden Bedingungen kann für Datensätze bestehend aus Spektralvariablen nahezu ausgeschlossen werden, da unkorrelierte Variablen nur durch eine vorgeschaltete Hauptkomponentenregression erhalten werden können. Diese jedoch – und damit auch die Regressionskoeffizienten – sind nur theoretisch reproduzierbar, wenn man eine völlige Redundanz der zu vergleichenden Datensätze voraussetzen könnte. Die Validierungsansätze beschränken sich deshalb auf die drei oben genannten Verfahren.

Die interne Validierung wird für den Datensatz des Untersuchungsgebiets Imbshausen für den Zeitpunkt EC-32 (Schossen) durchgeführt. Als Spektralvariable werden die Ableitungsspektren ( $R'$ ) der Funktionssignaturen verwendet, die für die vorangegangenen Untersuchungen in den meisten Fällen zu den besten Schätzergebnissen führten. Die Kreuzvalidierung beruht auf einer Anwendung der durch die Regressionsanalyse des EC-32-Datensatzes erhaltenen Einflussvariablen (Wellenlängenkanäle) auf die gleichen Winterweizenbestände zu anderen Zeitpunkten während der vegetativen Phase (EC-30, EC-39/41). Bei der externen Validierung wird schließlich das Regressionsverfahren für die Spektralvariable mit dem höchsten Vorhersagepotential für die Komponentenkonzentrationen auf einen Testdatensatzes eines anderen Untersuchungsgebietes (Neetzow) übertragen.

Zur Bewertung der Validierungsversuche wird, wie auch schon in den vorherigen Kapiteln, neben dem Bestimmtheitsmaß die mittlere Abweichung des Vorhersagewertes ( $c_{pred}$ ) von dem gemessenen Wert ( $c_{meas}$ ) der Komponentengehalte verwendet. Zur Interpretation der Abweichungen werden diese absolut ( $RMSE_a$ ) und auf den Mittelwert der Konzentration der jeweiligen Zielgröße normiert ( $RMSE_n$ ) angegeben.

Die Resultate der internen Validierung der Vorhersagewerte sind in Abb. 66 am Beispiel der Hauptnährelemente N, P und K in Form von Streudiagrammen dargestellt. Alle Vorhersagen für diese Konzentrationen basieren auf signifikanten Zusammenhängen zwischen den Messwerten und den Spektralvariablen des Eingangsdatensatzes ( $R'$ ). Zur Verdeutlichung der Vorhersagegenauigkeit sind in den Streudiagrammen zusätzlich zu den Schätz- und

Messwerten die Konfidenzintervalle für eine 95 %-ige Vorhersagegenauigkeit der Komponentenkonzentrationen abgebildet. Die Vorhersagen ermöglichen keine Angaben über absolute Konzentrationen, können aber im Rahmen eines Vertrauensintervalls von ungefähr +/- 5 Prozentpunkten, bezogen auf den Mittelwert der erhobenen Messwerte, Tendenzen innerhalb eines Stichprobenumfangs aufzeigen.



**Abb. 66: Streudiagramme der vorhergesagten ( $c_{pred}$ ) und gemessenen ( $c_{meas}$ ) Konzentrationen ausgewählter Nährelemente (N, P, K) durch interne Validierung**

Die Kreuzvalidierung dient der Überprüfung der These, dass die durch die Regressionsanalyse detektierten Spektralbereiche für die jeweilige Spektralvariable geeignet sind, um Konzentrationsschätzungen vergleichbarer Datensätze herbeizuführen. Hierzu werden die Wellenlängenkanäle der Schätzmodelle für die EC-30-Daten auf Regressionsmodelle von Datensätzen gleicher Spektralvariablen zu anderen phänologischen Stadien übertragen. Die Kennwerte der aus diesen Regressionsmodellierungen hervorgegangenen Vorhersagemodelle sind in Tab. 38 dargestellt.

Die Stärke der Zusammenhänge zwischen den Einflussvariablen und den Messwerten ist generell niedriger als bei den entsprechenden Modellierungen für den Testdatensatz, insgesamt können Zusammenhänge nachgewiesen werden, die allerdings nicht auf dem den vorherigen Auswertungen zugrunde liegenden Konfidenzniveau von 95% signifikant sind (vgl. Tab. 32). Die mittleren Residuen der Schätzwerte liegen für N und K unter dem in Kap. 7.4.1.2 definierten Grenzwert für die maximale mittlere Abweichung von den Messwerten, für die P-Gehalte wird dieser Schwellenwert leicht überschritten.

Als Ergebnis der Kreuzvalidierung ist für die vorliegende Untersuchung festzuhalten, dass die durch die Regressionsanalyse eines Testdatensatzes gewonnenen Wellenlängenkanäle für vergleichbare Datensätze zu anderen Aufnahmezeitpunkten nur zum Teil übertragbare Information beinhalten, was sich in zwar auf den ersten Blick relativ guten Regressionsmodellen niederschlägt, die jedoch dem Kriterium der statistischen Signifikanz nicht standhalten.

**Tab. 38: Ergebnisse der Kreuzvalidierung für ausgewählte Nährelemente und unterschiedliche Wachstumsstadien von Winterweizen (VNIR/SWIR-Bereich)**

	N		P		K	
	EC-30	EC-39/41	EC-30	EC-39/41	EC-30	EC-39/41
<b>RMSE<sub>a</sub></b>	0.305	0.513	0.292	0.251	0.582	0.331
<b>RMSE<sub>n</sub></b>	0.266	0.12	0.058	0.036	0.2	0.194
	0.061	0.057	0.103	0.108	0.045	0.069

Der dritte Teil der Validierungsuntersuchungen befasst sich mit den Möglichkeiten der allgemeinen Übertragbarkeit des Verfahrensablaufs zur Schätzung von Komponentenkonzentrationen für Winterweizenbestände auf andere Untersuchungsgebiete. Hierzu wird das zuvor als bestes Schätzmodell entwickelte Verfahren der multiplen linearen Regression mit Hilfe von Ableitungsspektren ( $R'$ ) auf einen Datensatz von Spektralsignaturen des HyMap<sup>®</sup>-Hyperspektralscanners für das Untersuchungsgebiet Neetzow (Mecklenburg-Vorpommern, siehe Kap. 3.1.2) angewendet. Der Vergleich der HyMap<sup>®</sup>-Spektren mit den *in situ* Spektralmessungen im Untersuchungsgebiet Imbshausen erfordert die vorherige Reduktion der Wellenlängenkanäle des ASD FieldSpec<sup>®</sup> auf die spektrale Bandbreite des HyMap<sup>®</sup>-Sensors (siehe hierzu Kap. 7.2.2).

Die Güte der Schätzmodelle liegt für die HyMap<sup>®</sup>-Daten in Neetzow beachtlich über den Werten für die simulierten HyMap<sup>®</sup>-Daten des Untersuchungsgebiets Imbshausen. Einschränkend muss allerdings an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die postulierten Zusammenhänge nicht für identische Spektralbereiche gelten, sondern lediglich das Verfahren der Regressionsmodellierung betreffen. Die deterministische Herangehensweise durch direkte Regression (Einschlussverfahren, MLR<sub>E</sub>) vorgegebener Wellenlängenkanäle des Testdatensatzes führt zu keinem Ergebnis. Dies ist aber aufgrund der bereits früher erläuterten (Kap. 7.3.1.2) Interkorrelationen der Variablen mit Hintergrundvariablen (v.a. O-H-Bindungen) generell für *in situ* Spektralmessungen nicht zu erwarten.

**Tab. 39: Multiple lineare Regression mit Hilfe von Ableitungsspektren für die Untersuchungsgebiete "Imbshausen" (HyMap<sup>®</sup> simuliert) und "Neetzow" (HyMap<sup>®</sup>-Kampagne 1999)**

	korr. $r^2$ , HyMap <sup>®</sup> simuliert (Imbshausen, Mai 2001)	korr. $r^2$ , HyMap <sup>®</sup> (Neetzow, Mai 1999)
<b>N</b>	0.512**	0.619**
<b>P</b>	0.634**	0.718**
<b>K</b>	0.481**	0.736**
<b>Mg</b>	0.409**	0.494**
<b>Ca</b>	0.272*	0.805**
<b>S</b>	0.334**	0.287*

\* Der Zusammenhang ist innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % (zweiseitig) statistisch signifikant.

\*\* Der Zusammenhang ist innerhalb eines Konfidenzintervalls von 99 % (zweiseitig) statistisch signifikant.

## 7.5 Abschließende Beurteilung der Verfahren zur Zustandsbeschreibung von Pflanzenbeständen aus Spektraldaten

Die in den vorangegangenen Kapiteln durchgeführten Regressionsanalysen zur Schätzung ausgewählter Nährelemente und Pflanzenparameter von Winterweizenbeständen aus spektraler Information dienten zur Evaluierung der zu erwartenden Kausalzusammenhänge zwischen spektraler Reflexion und der Konzentrationen von Pflanzeninhaltsstoffen.

Die schrittweise multiple Regression ( $MLR_S$ ) ist als multivariates Verfahren zur Schätzung der Konzentrationen von Pflanzeninhaltsstoffen geeignet, da sie leicht anzuwenden und nachvollziehbar ist und i. d. R. zu akzeptablen Ergebnissen führt. Hierbei müssen allerdings verschiedene Annahmen berücksichtigt werden:

- ⇒ Es existieren kausale Beziehungen zwischen den Einflussvariablen (Spektralvariablen) des Regressionsmodells und den Komponentenkonzentrationen
- ⇒ Diese Beziehungen sind linearer Natur.
- ⇒ Die Beziehungen werden nicht beeinträchtigt von anderen physiologischen und biophysikalischen Faktoren (Phänologie, Geometrie, etc.)
- ⇒ Der Messfehler der Referenzmessungen ( $c_{meas}$ ) ist vernachlässigbar klein.

Die Bewertung ausgewählter Vegetationsindizes bezüglich Ihres Informationsgehalts zur Ableitung von Nährelementkonzentrationen führte zu unbefriedigenden Ergebnissen (Kap. 7.4.1.1). Die räumlichen Variabilitäten des Versorgungszustands von Pflanzenbeständen können zwar durch die Ratiobildung ausgewählter Wellenlängenkanäle sichtbar gemacht werden, eine direkte Beziehung zwischen Indexwerten (z. B. *NDVI*, *REI*) und Nährelementkonzentrationen kann jedoch nicht nachgewiesen werden (so auch bei SEMBIRING et al. 1998). Hohe Bestimmtheitsmaße für Korrelationen zwischen Spektralratios und N-Gehalt, wie sie z. B. für Wintergerste bei JENSEN et al. (1990) gefunden werden, können nicht bestätigt werden.

Die Regressionsmodelle benutzten die spektrale Information im VNIR und im SWIR-Bereich, um die Konzentrationen ausgewählter Pflanzenparameter vorherzusagen. Diese Modelle basieren auf den theoretischen und in zahlreichen Veröffentlichungen (z. B. KOKALY 2001, CURRAN et al. 2001, PETERSON et al. 1988) empirisch bestätigten Zusammenhängen zwischen Elektronenübergängen im VIS und dem Chlorophyllgehalt bzw. Schwingungsabsorptionsbanden, verursacht durch Kombinations- und Oberschwingungen von Molekülbindungen im NIR/SWIR und den Gehalten biochemischer Verbindungen bzw. Elemente in der Pflanze. Die wesentlichen Bindungsmechanismen, die für die Absorption im NIR/SWIR verantwortlich sind, sind Bestandteile der wichtigsten Moleküle der Stoffwechselprodukte der Pflanze (C-H, O-H, N-H, C-C, C-N, bzw. äquivalente Bindungen anderer Nährelemente mit organischen Bestandteilen).

Obwohl die Hauptnährelemente nur zu einem geringen Anteil zur Bruttozusammensetzung der Pflanzen beitragen, schlägt sich der Anteil der durch diese gebildeten Bindungsmechanismen in eng begrenzten Absorptionsbereichen des solaren Spektrums nieder. Diese Effekte sind für den Stickstoffgehalt landwirtschaftlicher (z. B. PEÑUELAS et al. 1994 für Sonnenblumenblätter, LACAPRA et al. 1996 für Reis, MORAGHAN et al. 2000 für Zuckerrübenblätter) und forstwirtschaftlicher (z. B. WESSMAN et al. 1988, CARD et al. 1988) Pflanzenbestände bzw. von vorverarbeiteten Pflanzenteilen (i. d. R. getrocknet und gemahlen) eindeutig belegt, auch wenn die Wellenlängenbereiche, in denen signifikante Signaturmerkmale festgestellt werden, nicht immer Kongruenz zwischen den einzelnen Untersuchungen aufweisen (siehe hierzu auch Tab. 40 weiter unten). Die multiple schrittweise Regression hat sich in diesen Untersuchungen als adäquate Methode zur multivariaten Auswertung der Spektralsignaturen herausgebildet.

Die dargelegten Zusammenhänge können für die im Rahmen der eigenen Arbeit durchgeführten Messungen für *in situ* gemessene Pflanzenbestände bzw. für Teile frischer Pflanzenmasse nachgewiesen werden. Die Resultate der in Kap. 7.4.1.2 bis 7.4.4 durchgeführten Regressionsanalysen bestätigen die Untersuchungen verschiedener anderer Autoren (z. B. YODER & PETTIGREW-CROSBY 1995, JOHNSON et al. 1994, JACQUEMOUD et al. 1995, GROSSMAN et al. 1996, BOLSTER et al. 1996, WHITE et al. 2000), die ebenfalls für die Regressionsmodellierung auf Basis der Spektralsignatur bzw. derer Derivate für verschiedene Untersuchungsgebiete und Pflanzenarten vergleichbar gute Schätzergebnisse erhalten. Die Untersuchungen konzentrieren sich dabei in der Regel auf den Stickstoffgehalt ( $N_{tot}$ ) frischer Pflanzenmasse (Pflanzenbestände oder Pflanzenteile) und zusätzlich auf die wichtigsten Stoffwechselprodukte als komplexe Formen der Symbiose der Nährelemente mit organischen Verbindungen.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung lag der Schwerpunkt der Arbeiten auf der Schätzung von Pflanzenparametern für gezielte Maßnahmenverbesserungen im Pflanzenbau. Aus diesem Grunde stehen im Mittelpunkt der Untersuchungen zum Informationsgehalt der Spektraldaten nicht die Stoffwechselprodukte der Pflanzen, sondern die relative Bestimmung der Gehalte Ihrer wichtigsten Nährelemente, die durch den Landwirt den Pflanzen über das vorhandene Angebot hinaus zur Verfügung gestellt werden können.

Zusätzlich zum N-Gehalt erlauben die Resultate der durchgeführten Regressionsmodellierungen die Erweiterung der Aussagen früherer und vergleichbarer Untersuchungen zur multivariaten Schätzung des Stickstoffgehalts aus Spektralvariablen (ERASMI & KAPPAS 2001, LILIENTHAL et al. 2000) auf die Makronährelemente (N, P, K, Mg, Ca, S) für Winterweizenbestände. Ähnliche Ergebnisse können auch für weitere Kulturpflanzenbestände erwartet werden, bedürfen aber zusätzlicher Untersuchungen.

Die erste Ableitung hat sich als bestes Spektralderivat (Einflussvariable) für die multiple Regressionsanalyse herausgestellt. Der Vorteil der Ableitungsspektren liegt in Ihrer universellen Anwendbarkeit auf Spektralsignaturen, v. a. dann, wenn keine Kalibrierungsinformationen vorliegen (WESSMAN 1994). Durch die Normierung der Funktionsabschnitte auf deren Steigung (vgl. Kap. 6.6.1) erfolgt eine Standardisierung der lokalen Extrema einer Funktionskurve, die gleichzeitig zur Reduzierung multiplikativer (Stör-) Einflüsse auf das Reflexionssignal beiträgt (z. B. Bodenanteil, Pflanzengeometrie; siehe hierzu z. B. DEMETRIADES-SHAH et al. 1990). Die Ableitungsbildung führt weiterhin zur Hervorhebung bzw. Gleichstellung relativ enger, untergeordneter spektraler Merkmale biochemischer Inhaltsstoffe gegenüber den breiten Absorptionsbändern des Pflanzenwassers (JOHNSON et al. 1994). Der gleiche Effekt kann auch durch die Normierung der Kontinuum-transformierten Spektralbereiche (v.a. *SNC*-Skalierung, siehe hierzu Abb. 51 in Kap. 6.6.2.3) bewirkt werden, die Genauigkeit der Schätzmodelle reicht aber im Mittel nicht an die der Ableitungsspektren heran.

Unabhängig davon, welches Standardisierungsverfahren der Regressionsanalyse vorhergeht, wird bei der Interpretation der Regressionsparameter deutlich, dass die Wellenlängen (allg.: Einflussvariablen), die durch das Verfahren der schrittweisen multiplen Regression für ein gegebenes Nährelement vorgeschlagen werden, nicht bzw. nur bedingt übertragbar sind auf andere Datensätze. Dies haben die Kreuzvalidierungen der Regressionsmodelle für Datensätze unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte in Kap. 7.4.6 gezeigt. Umgekehrt ausgedrückt führen Regressionen auf Basis von Spektralkanälen, die aus anderen Untersuchungen hervorgehen, nicht zu signifikanten Vorhersagen bzw. zu keinem Regressionsergebnis. Vergleichbare Kritik wird u. a. bei GROSSMAN et al. 1996 und CURRAN 1989 geäußert. KOKALY & CLARK (1999) hingegen vertreten die Auffassung, dass durch geeignete Maßnahmen der Normierung bestimmter Absorptionsbanden (*CR*, *BNC*, *CR*-ratio) mit Hilfe multivariater Verfahren die Erstellung einer allgemeingültigen Formel zur Schätzung von Konzentrationen auch unterschiedlicher Pflanzenarten (für Messungen unter Laborbedingungen) möglich ist. Zur Überprüfung dieser These sind in Tab. 40 die Regressionsparameter ausgewählter Schätzmodelle sowohl für *in situ* als auch für Laboruntersuchungen von Pflanzenbeständen bzw. -teilen zusammengefasst. Sämtliche dieser Auflistung zugrunde liegenden Regressionsmodelle weisen signifikante



Werte  $r^2$  für die Güte der Vorhersage auf (Konfidenzniveau 99%). Die meisten Modelle zur Vorhersage des Stickstoffgehalts ( $N_{\text{tot}}$ ) frischer oder getrockneter Pflanzenmasse weisen zwar Wellenlängen auf, die in der Umgebung der von CURRAN (1989) u. a. für dieses Element zusammengefassten Absorptionsbereiche liegen, die Variabilität der detektierten Wellenlängenkanäle zwischen den einzelnen Modellen ist aber zu hoch, als das eine eindeutige Festlegung auf drei oder mehr konkrete Wellenlängenbereiche getroffen werden könnte.

Die Gesamtheit der Ergebnisse aus der Regressionsanalyse und der anschließenden Validierung macht die Probleme und Perspektiven der Vorhersage von Nährelementkonzentrationen aus spektraler Information frischer Pflanzenmasse deutlich. Die Auswahl der Spektralbänder durch die multiple Regression scheint im Allgemeinen nicht auf den Absorptionscharakteristika der untersuchten biochemischen Komponenten zu beruhen (siehe hierzu auch BARET & FOURTY 1997 und GROSSMAN et al. 1996).

**Tab. 40: Vergleich der Regressionsparameter verschiedener Schätzmodelle (MLR<sub>S</sub>) zur Vorhersage des Stickstoffgehalts frischer und getrockneter Biomasse (VNIR/SWIR-Bereich)**

Referenz	Transformation	Wellenlängen [nm]	Pflanzenart	Vorverarbeitung
BOLSTER ET AL. (1996)	$R'$	[1928]*, 2044, <b>2140**</b> , 2156	Laub- und Nadelbäume (Blätter, Nadeln)	getrocknet & gemahlen
CARD ET AL. (1988)	$R'$	[510], 620, 650, 680, 850, [1670]	Laub- und Nadelbäume (Blätter, Nadeln)	getrocknet & gemahlen
CURRAN (2001)	$R'$	648, 680, [1496], <b>2172</b> , [2352]	Nadelbäume	getrocknet & gemahlen
EIGENE ARBEIT (1)	$R'$	1250, 859, <b>2180</b> , 820, 592	Winterweizen	<i>in situ</i>
EIGENE ARBEIT (2)	$R'$	940, 2015, 1190	Winterweizen	getrocknet & gemahlen
ERASMI & KAPPAS (2001)	$CR$	1043, 1089, <b>2132</b> , <b>2305</b>	Winterweizen	<i>in situ</i>
JOHNSON & BILLOW (1996)	$R'$	2156, <b>2172</b> , 2208, 2338	Nadelbäume (Nadeln)	<i>in situ</i> (nur Nadeln)
JOHNSON ET AL. (1994)	$R'$	[552]*, 1184, 2164	Waldbestände	<i>in situ</i>
KOKALY & CLARK (1999)	$CR$	2036, <b>2050</b> , 2078, 2152, <b>2180</b>	Laub- und Nadelbäume (Blätter, Nadeln)	getrocknet & gemahlen
LACAPRA ET AL. (1996)	$R'$	697, 762, 1492, 1571	Reis	<i>in situ</i>
WESSMAN ET AL. (1988)	$R'$	<b>2053</b> , <b>2063</b> , 2129, <b>2181</b> , <b>2293</b>	Laub- und Nadelbäume (Blätter, Nadeln)	getrocknet & gemahlen
YODER & PETTIGREW-CROSBY (1995)	$R'$	980, 1194, [1644], [1676], 2274	Laubwald (Blätter, Pflanzen)	<i>in situ</i> (nur Blätter)
<b>CURRAN (1989)</b>	<b><math>R, R'</math></b>	<b>1020</b> , [1510], <b>2060</b> , <b>2130</b> , <b>2180</b> , <b>2300</b>	<b>Laub- und Nadelbäume (Blätter, Nadeln)</b>	<b>getrocknet &amp; gemahlen</b>

\* Wellenlängenangaben in Klammern liegen außerhalb der in dieser Arbeit betrachteten Spektralbereiche

\*\* **fettgedruckte** Wellenlängenangaben indizieren einen Kausalzusammenhang (innerhalb von  $\pm 12$  nm eines nachgewiesenen Absorptionsbereichs eines reinen Proteinspektrums (nach CURRAN 1989))



## 8 Integration der Modellierungsergebnisse in einen Verfahrensablauf für das Teilschlagmanagement

### 8.1 Regionalisierung der Pflanzen- und Standortparameter

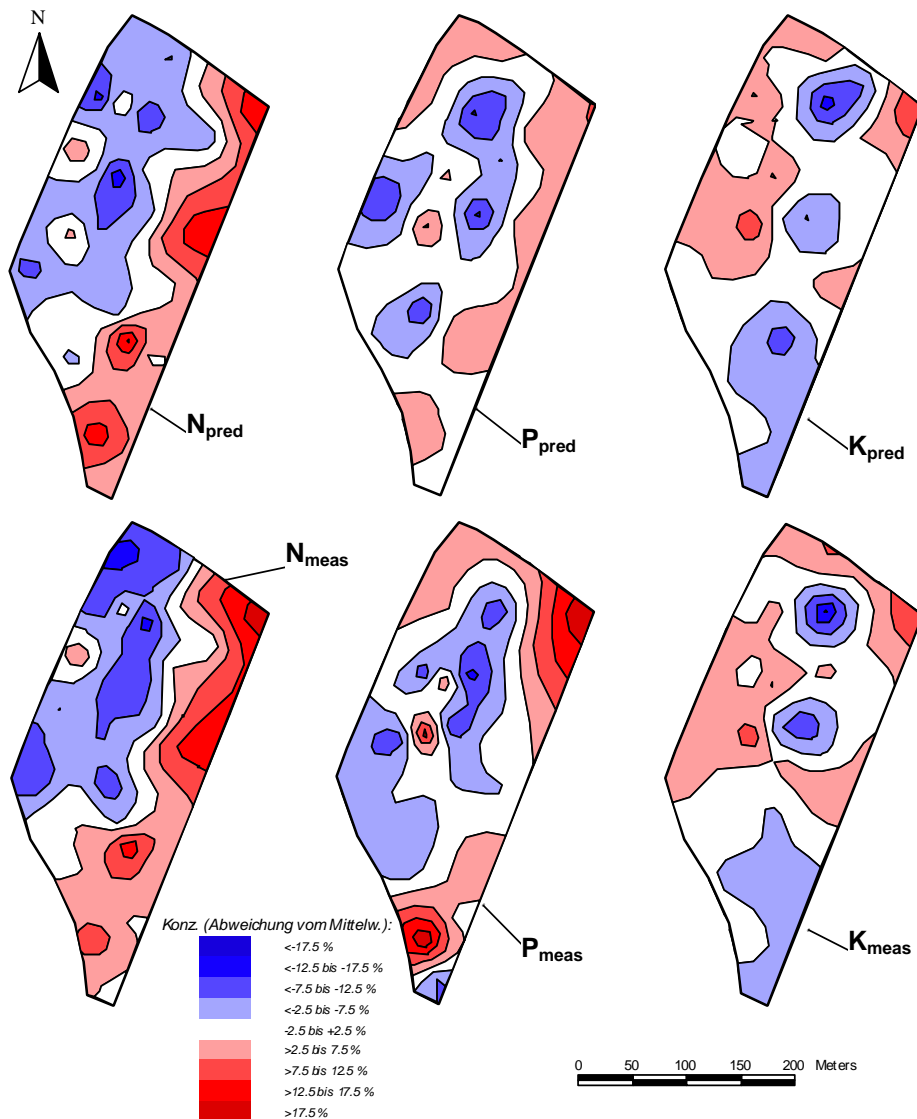
Die aus den Regressionsmodellen abgeleiteten Konzentrationsschätzungen für die Hauptnährelemente müssen für die Implementierung in einen Applikationsprozess für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung in eine räumliche, flächenhafte Datenebene transformiert werden. Hierzu ist zunächst eine Interpolation der lokalen punktuellen (kontinuierlichen) Informationen auf einen Flächendatensatz (Rasterlayer) notwendig. Anschließend erfolgt eine Abgrenzung homogener Merkmalsregionen innerhalb des erstellten Flächendatensatzes für das jeweilige Bestandsmerkmal (Regionalisierung) innerhalb derer eine einheitliche Maßnahmenapplikation durchgeführt werden soll.

Die Interpolation der lokalen Bestandsmerkmale erfolgt durch das Kriging-Verfahren, welches auf eine Entwicklung des südafrikanischen Geomathematiker Krige zurückgeht und erstmals von MATHERON (1963) publiziert wurde.

Die Kriging-Interpolation ist ein *Schätzverfahren*, bei dem ein Wert  $z$  (z. B. N-Konzentration Pflanze) am Punkt  $Z$  durch ein gewichtetes arithmetisches Mittel ( $w_i$ ) der vorhandenen Beobachtungswerte  $z_1$  bis  $z_n$  an den Punkten 1 bis  $n$  bestimmt wird. Im Gegensatz zu anderen häufig verwendeten Interpolationsverfahren (Dreiecksinterpolation, inverse Distanzen, Polynomannpassung) werden die Gewichte  $w_i$  jedoch nicht nur in Abhängigkeit der Entfernungen zwischen den Punkten 1 bis  $n$  und dem Zielpunkt  $Z$  bestimmt, sondern sie berücksichtigen auch die räumliche Struktur der Variablenwerte. Der Grad der räumlichen Erhaltungsneigung einer Variable (Semivarianz) stellt dabei den determinierten Anteil an der Struktur der räumlichen Variabilität dar. Nähere Erläuterungen zum Verfahren und zur Anwendung des Kriging-Algorithmus bzw. der Semivariogrammanalyse finden sich u. a. bei STOYAN et al. (1997), HOFFMAN & BÖHNER (1999) und CURRAN (1988).

Das Kriging-Verfahren eignet sich besonders für Datensätze, bei denen die Punktdaten nicht in einem regelmäßigen Muster über das Erhebungsgebiet verteilt vorliegen und die gewünschte Auflösung des zu erstellenden Rasters unter dem mittleren Punkteabstand liegt. Im vorliegenden Fall liegt der Abstand der Probepunkte zwischen 20 und 50 m, die gewünschte und für die Zielsetzung realistische Rasterzellenauflösung der Applikationskarten liegt bei 5 m.

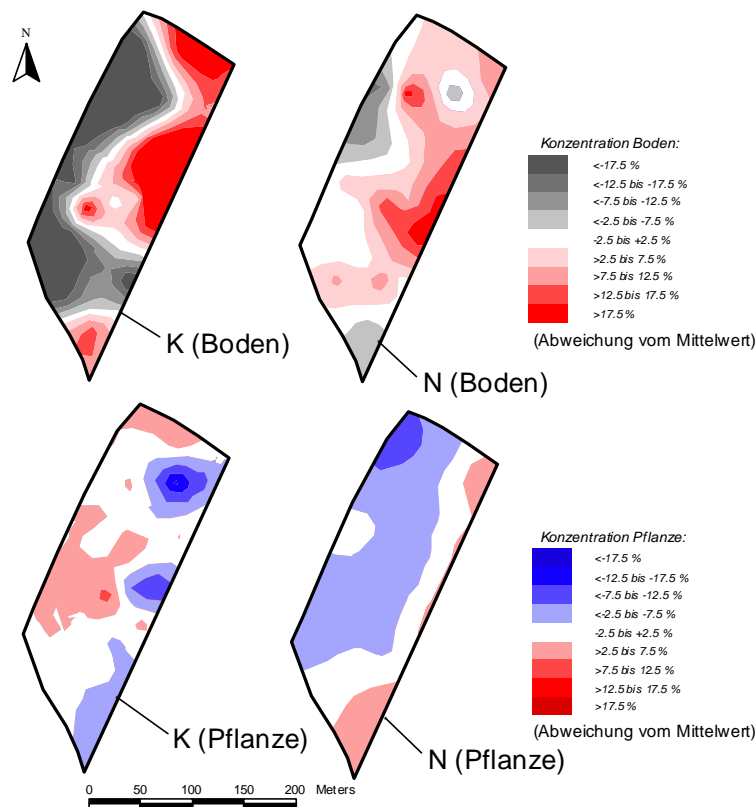
Die für die Düngbedarfsermittlung benötigten Informationsebenen zur Beschreibung des Pflanzenzustands werden mit Hilfe des Kriging-Verfahrens aus den spektroradiometrischen Punktmessungen abgeleitet. Die Güte der Vorhersage der Nährelementkonzentrationen aus den Spektraldaten wurde bereits in Kap. 7.4 anhand des Bestimmtheitsmaßes ( $r^2$ ) und der Residuen für die Regressionsmodellierung bewertet. Entsprechend dieser Vorhersagegenauigkeit sind auch bei der Interpolation der Schätzwerte ( $c_{pred}$ ) Abweichungen von den Messwerten ( $c_{meas}$ ) für die Flächenbildung zu erwarten. Die durch die Interpolation gebildeten flächenhaften Kartierungen für die Hauptnährelemente (N, P, K) sind in Abb. 67 vergleichend für die Schätz- und Messwerte dargestellt.



**Abb. 67:** Interpolation der Hauptnährelementkonzentrationen (N-, P-, K-Pflanze) aus den vorhergesagten ( $c_{pred}$ ) und den gemessenen ( $c_{meas}$ ) Werten für einen Ausschnitt des Schlags "Unter dem Echter Wege" (Imbshausen)

Die flächenhaften Modellierungen der Nährstoffkonzentrationen aus den Schätzwerten der Regressionsanalyse zeigen in Ihrer räumlichen Struktur gute Übereinstimmungen mit denen der laboranalytisch gewonnenen Messwerte. Lediglich bei den Schätzungen der P-Konzentrationen kommt es im NW- und S-Randbereich des Schlagausschnittes zu Unterschätzungen der tatsächlich im Labor gemessenen Werte. Generell ist für den betrachteten Schlagausschnitt eine Abnahme der Komponentenkonzentrationen von NO nach SW zu beobachten. Ein ähnliches Muster spiegelt sich auch in der räumlichen Verteilung der pflanzenverfügbaren Nährstoffe im Boden wider, was exemplarisch anhand der mobilen Nitrat-Konzentrationen und der relativ immobilen  $K^+$ -Ionenkonzentration im Oberboden in Abb. 68 aufgezeigt ist. Aus dem Vergleich der pflanzenverfügbaren Bodennährstoffe mit den in der Pflanze enthaltenen Mengen ist für den betrachteten Ausschnitt aber keine Regelmäßigkeit abzulesen. Dieses Ergebnis spiegelt auch die in Kap. 5.1.5 gewonnenen Erkenntnisse aus den Korrelations- und Kovarianzmatrizen der Boden- und Nährstoffgehalte

wieder. Diese nicht vorhandene Kongruenz der räumlichen Verteilung der pflanzenverfügbaren Nährelementgehalte stellen auch HACKBARTH & LAMP (2000) fest. Die konsequente Schlussfolgerung dieser Feststellungen in Bezug auf zukünftig durchzuführende Applikationsmaßnahmen im Getreideanbau ist, dass offensichtlich keine direkte Beziehung besteht zwischen dem N-Gehalt und Konzentrationen anderer Nährelemente (v. a. P, K) im Boden und in der Pflanze, was den Einsatz von Mehrkomponentendüngern im teilflächenspezifischen Ackerbau fraglich macht.



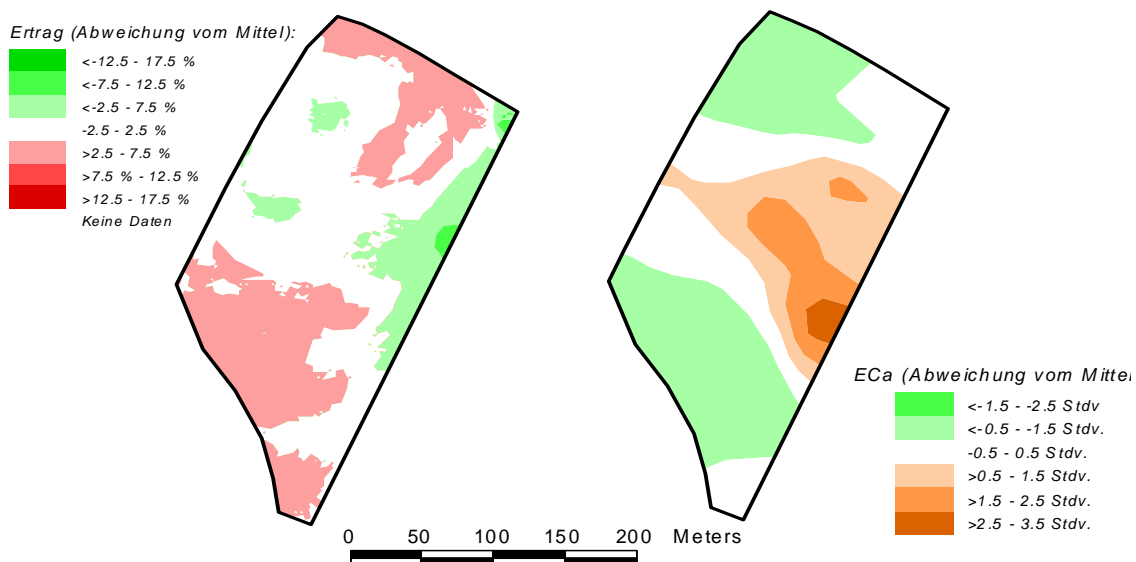
**Abb. 68:** Vergleich der flächenhaften Verbreitung der N- und K- Konzentrationen im Boden und in der Pflanze auf Basis der gemessenen Werte ( $c_{meas}$ ) für einen Ausschnitt des Schlags "Unter dem Echter Wege" (Imbshausen)

### Vergleich mit den flächenhaften Kartierungen

Zusätzlich zu den punktuellen Erhebungen des Bestandszustands liegen eine Reihe weiterer flächenhaft kartierter bzw. regionalisierter Standortinformationen vor, die für eine dynamische Modellierung von Applikationsmaßnahmen im Kulturpflanzenbau von Interesse sein können (Ertrag, Relief, Bodenart). Ein besonderes Augenmerk gilt der im Rahmen der Arbeit auf den Testschlägen im Untersuchungsgebiet Imbshausen durchgeführten Kartierung der elektrischen Leitfähigkeit (ECa) der oberen Bodenschicht (<1 m Tiefe). Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit liefert eine integrale Größe für ein begrenztes Volumenelement des Bodens (vgl. Kap. 4.3.2). Das empfangene Messsignale setzt sich aus verschiedenen Zustandsparametern des Bodenkörpers zusammen, über deren Interaktionen und Auswirkungen auf die Leitfähigkeit noch größtenteils Uneinigkeit herrscht. In mehreren Untersuchungen konnte eine Beziehung zwischen elektrischer Leitfähigkeit der oberen Bodenschichten und dem Ertrag bzw. Pflanzenzustand gefunden werden (siehe z. B. DOBERS et al. 2001, EHLERT et al. 2001). DOBERS et al. (2001) weisen aber auch darauf hin, dass der

Dynamikbereich der ECa-Werte nicht unbedingt ein Indikator für die Inhomogenität des Standorts ist und dass in gewissen Bereichen eine sog. Senkenanomalie der Werte zu beobachten ist, die möglicherweise auf die Strukturabhängigkeit (z. B. Lagerung von Bodenhorizonten / Bodenschichten in Senkenbereichen) der ECa-Signale zurückzuführen ist. Der Vorteil der Leitfähigkeitskartierung liegt demgegenüber in dem relativ geringen Kosten- und Zeitaufwand zur Erstellung einer flächenhaften Kartierung langfristig konstanter räumlicher Strukturen eines Standorts.

Neben der Kartierung der Leitfähigkeit liegt eine Ernteertragskartierung für die Testschläge vor. Hierbei ist aber ebenso wie bei den übrigen Verfahren zur indirekten Standortkartierung auf die möglichen Unschärfen bzw. Fehlerquellen der Erhebungen zu achten (Geschwindigkeit, Kornfeuchte, Neigung, Kornverlust, Schüttdichte, etc., siehe hierzu GRIEPENTROG 1998). Sowohl die Ertragskartierung als auch die Kartierung der elektrischen Leitfähigkeit liefern einen Datensatz punktueller Messungen in einem, im Vergleich zu den aus den spektroradiometrischen Messungen abgeleiteten Bestandsmerkmalen, engen Messintervall (1 Messung / sek.). Diese werden nach dem gleichen Schema wie oben für die Nährelemente beschrieben auf ein Raster von 5 m Rasterzellenweite interpoliert (siehe Abb. 69).



**Abb. 69:** Ertrags- und Leitfähigkeitskartierung (ECa-Boden) für einen Ausschnitt des Schlags "Unter dem Echter Wege" (Imbshausen)

## 8.2 Verfahren zur Abschätzung des Düngerbedarfs

Das Nährstoffangebot im Boden lässt unmittelbar keinen Rückschluss auf den Düngerbedarf einer Pflanze zu. Dieser kann bei gleichen Nährelementkonzentrationen im Boden sehr verschieden sein. Die tatsächliche Verfügbarkeit der im Boden enthaltenen Nährelementmengen, und der daraus resultierende Düngerbedarf sind u. a. von der Bodenart (Korngrößenzusammensetzung), dem Humusgehalt, dem pH-Wert, der Krumentiefe sowie dem Nachführungspotenzial an Nährelementen aus dem Unterboden abhängig (AUFHAMMER 1998). Neben diesen bodenbürtigen Faktoren wird der Bedarf durch Effekte des Luft- und Wasserhaushalts, der biologischen Aktivität sowie des Witterungsverlaufs und schließlich des Nährstoffanspruchs in Abhängigkeit von der Ertragsersparung für den Bestand beeinflusst.

Für die Abschätzung des Düngerbedarfs existieren eine Reihe von Bilanzierungsmodellen, die in der Regel von den Ergebnissen der Bodenuntersuchung ausgehen und über die Einbeziehung unterschiedlicher Standortfaktoren (inkl. organischer Düngung und Ernteresten) das zu erwartende Nährstoffangebot kalkulieren. Dies wird dem Nährstoffbedarf, abhängig von der Ertragserwartung, bilanzmäßig gegenübergestellt und resultiert in einer Düngeempfehlung (z. B. DÜNGEPLAN, SCHOOP-HANUS, vgl. bei SCHILLING 2000).

Simulationsmodelle (z. B. CANDY, N-SIM, vgl. bei SCHILLING 2000) berücksichtigen zusätzlich zu den Standortdaten die zentralen Prozesse, die im Wirkungsgefüge Boden-Pflanze ablaufen. Neben den statischen Zustandsparametern gehen aktuelle Witterungsdaten und Daten zur Produktionstechnik in die Modellierung ein und ermöglichen eine zeitnähere Erfassung der Nährstoff-Dynamik zwischen Boden und Pflanze. Zentraler Bestandteil solcher Modelle sind Wasserhaushalts- und Wachstumsmodelle, da der Wasserhaushalt des Bodens die Nährstoffdynamik und damit auch die Nährstoffaufnahme durch die Pflanze entscheidend steuert (AUFHAMMER 1998).

Im Mittelpunkt der angewandten Modellentwicklung zur Düngebedarfsermittlung steht die N-Düngung. Dem Stickstoff kommt bezüglich der Trockenmasseproduktion und der unmittelbaren Einflussnahme auf die Ertragsbildung eine zentrale Bedeutung zu. Daneben bedeutet eine übermäßige Stickstoffdüngung zum einen ökonomische Verluste, zum anderen eine ökologische Belastung durch Austrag ins Grundwasser. Aufgrund der Stickstoffdynamik im Boden sind die meisten vorhandenen Bilanzierungssysteme nur bedingt zur Ermittlung von N-Gaben tauglich. Neben dem im Boden vorhandenen bzw. zu erwartendem Angebot an mineralisiertem Stickstoff ( $N_{\min}$ ) sind deshalb auf das Entwicklungsstadium und den Zustand bezogene Informationen über die Bestandsentwicklung notwendig.

Die konventionelle Bodenbeprobung nach der  $N_{\min}$ -Methode ist daneben zeit- und kostenaufwendig und kann in der Regel nicht in einer schlagrepräsentativen Probendichte durchgeführt werden. Insgesamt sind die meisten verfügbaren Verfahren zur Ermittlung des Düngebedarfs auf die Ableitung eines mittleren schlagbezogenen Wertes beschränkt.

Aus diesen Gründen kommt der Einbeziehung von Geobasisinformationen und zeitnah verfügbaren flächenhaften Bestandsinformationen eine zentrale Bedeutung für die Entwicklung teilschlagbezogener Applikationsmodelle zu. Raumbezogene Geodaten (z. B. Reliefparameter, Bodenart) stehen in weiten Teilen Deutschlands flächenhaft zur Verfügung und können über GIS in Standortfaktoren für landwirtschaftliche Flächen transformiert werden, die für die Düngerbedarfsschätzung von Relevanz sind. Jüngere Untersuchungen auf diesem Sektor haben beispielsweise gezeigt, dass durch die gezielte, teilflächenspezifische Umsetzung der Düngeempfehlungen der LUFA (Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt) Einsparungen in der Düngemittelmenge bzw. teilflächenspezifische Ertragszuwächse erzielbar sind (siehe z. B. HACKBARTH & LAMP 2000, HERBST & LAMP 2000), auch, wenn diesen Perspektiven in der Praxis noch einige Hürden gegenüberstehen.

Diese teilflächengenauen Untersuchungen basieren aber ebenso wie die weiter oben erwähnten Bilanzierungsmodelle auf relativ konstanten Bodenkennwerten und Standortparametern, die u. a. auch aus flächenhaft abbildenden Fernerkundungsaufnahmen abgeleitet werden können (siehe z. B. MORAN et al. 1998). Dies bedeutet einerseits, dass die Ergebnisse weitgehend unabhängig von der Fruchtart über mehrere Jahre hinweg nutzbar sind, d. h., sie sind zur Erstellung von Applikationskarten z. B. für die teilschlagspezifische Grunddüngung geeignet. Auf der anderen Seite ist die Erfassung der zeitlichen Dynamik der mobilen Nährstoffe (v.a. Stickstoff) nicht möglich.

Die aus den multivariaten Analysen in Kap. 7 hervorgegangenen Schätzgrößen für die Konzentrationen der Hauptnährelemente können zusammen mit den übrigen digital verfügbaren Standortdaten für ein Untersuchungsgebiet wichtige zusätzliche Informationsebenen für die zeitnahe (near-real-time) Abschätzung des Düngerbedarfs von Winterweizenbeständen liefern. Ein Ansatz für die mögliche Implementierung der Schätzergebnisse aus den spektroradiometrischen Messungen zur Bestimmung des Düngedarfs wird im Folgenden vorgestellt.

### **8.3 Spektrale Information zur Beschreibung der teilschlagspezifischen Nährstoffmobilität und Standortvariabilität im Rahmen der Düngedarfsermittlung**

Die Möglichkeiten der Verwertung aktueller Bestandsinformationen aus spektralen Daten werden im Folgenden anhand des Beispiels der Düngedarfsermittlung für die Stickstoffdüngung aufgezeigt. Hierbei wird ein einfaches Bilanzierungsverfahren, wie es in den meisten Fällen im Getreidebau verwendet wird, auf den teilflächenspezifischen Ackerbau angepasst.

Die traditionellen Verfahren zur N-Bedarfs-Ermittlung basieren auf der  $N_{\min}$ -Beprobung von ganzen Schlägen oder im besten Falle in einem groben Raster für einen Schlag einheitlicher Nutzung. Im einfachsten Fall wird über das klassische Sollwertverfahren (Sollwert - Lieferung ( $N_{\min}$ ) = Düngung) aus den  $N_{\min}$ -Vorratswerten im Frühjahr ein Anhaltswert für den Gesamt-N-Bedarf des Bestands abgeleitet. Diese Gesamtmenge wird dann auf mehrere Gaben (i. d. R. 2 oder 3) verteilt zugeführt. Modernere Verfahren wie z. B. das SBA-System der LUFA Sachsen-Anhalt (LUFA [Hrsg.] 2000) oder das NPK-Online-Verfahren von HydroAgri (HYDROAGRI 2002) wenden in der Praxis bereits seit einiger Zeit zusätzlich schlag- bzw. soweit vorhanden teilschlagspezifische Standortbedingungen (z. B. Bodenart, Bodendichte, durchwurzelbare Tiefe) für die Ermittlung des pflanzenverfügbaren Anteils bzw. der N-Nachlieferung an. Je nach Ausprägung der Einflussgrößen erfolgt ein Zu- oder Abschlag auf den N-Bedarfswert.

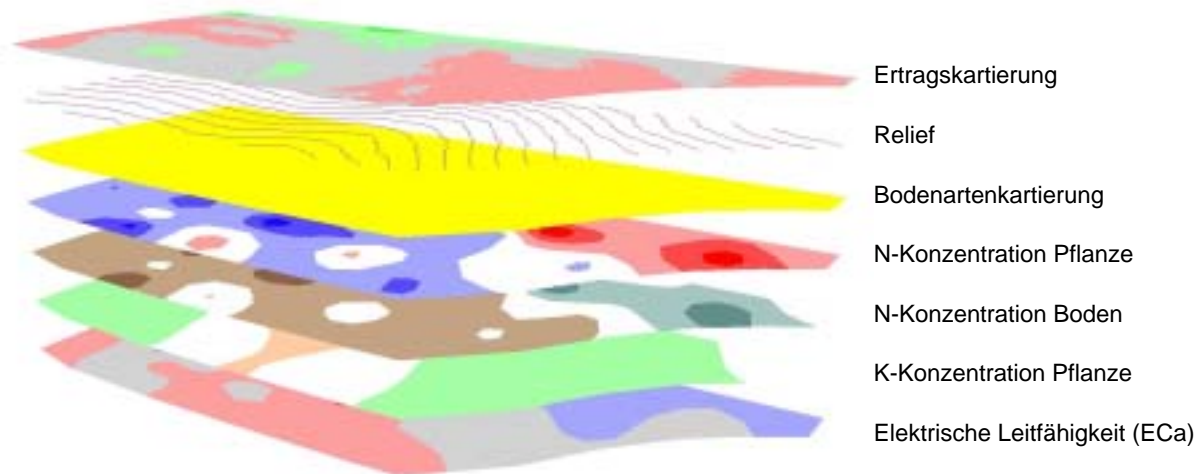
Die Variabilität der Standortparameter wird im vorliegenden Beispielmodell aus den zur Verfügung stehenden digitalen Geobasisdaten abgeleitet. Zunächst erfolgt eine Korrektur der N-Bedarfsmenge durch die Berücksichtigung der Bodenvariabilität über die vorliegende digitale Bodenkarte im Maßstab 1:5.000. Anhand der Bodenartenkartierung kann auf die potentielle Bodenverdichtung und -durchlüftung geschlossen werden, was wiederum den Wasser- und Nährstoffhaushalt entscheidend beeinflusst. Die Bodenarten werden hierzu nach ihrem Ton- und Feinsandanteil in Gruppen eingeteilt (nach DIN 19682, vgl. LUFA [Hrsg.] 2000). Das Resultat ist eine bodenartenspezifische Karte des N-Bedarfs, die bereits eine verbesserte N-Düngung ermöglicht.

Eine Alternative oder Ergänzung zur digitalen Bodenkarte für die flächenhafte Ableitung von Zustandsparametern der Ackerfläche ist die Einbeziehung einer Ertragskartierung. Die Ertragskartierung bildet unterschiedliche Ertragsniveaus innerhalb eines Schlages ab. Ertragsunterschiede und die ihnen zugrunde liegenden räumlichen Variabilitäten sind über mehrere Jahre und für unterschiedliche Kulturpflanzenarten für einen Schlag relativ konstant. Sie sind deshalb ein guter Indikator für Unterschiede im Boden, insbesondere für dessen Wasserspeichermöglichkeit (WANING et al. 2000), d.h. für Bodenarten bzw. Korngrößenklassen. Als weiteres Merkmal zur Ausscheidung kleinster Areale homogener Standortbedingungen kann die weiter oben beschriebene (Kap. 8.1) Kartierung der elektrischen Leitfähigkeit (ECa) herangezogen werden. Ebenso wie bei der Bodenarten- oder Ertragskartierung ist durch die Verschneidung der ECa-Messwerte mit den Bedarfsberechnungen für den Gesamtschlag eine Regionalisierung des Schlages in einzelne Teilflächen homogener Eigenschaften, d.h. gleicher Dünger-Gaben möglich. Welche der Kombinationen in der Praxis Anwendung findet, ist in



erster Linie von der Datenverfügbarkeit abhängig. In dem geplanten GIS-gestützten Düngeberatungsprogramm sind diese Merkmale beliebig kombinierbar.

In einem solchen anzustrebenden precision farming GIS-System ist darüber hinaus die Implementierung weiterer standortspezifischer Merkmalsebenen denkbar. Eine bedeutende Rolle bei der Standortbewertung zur Ableitung pflanzenverfügbarer Nährstoffe spielt die Ausprägung des Reliefs. In Senkenbereichen kommt es durch Verlagerung (oberirdischer Abfluss und Materialtransport durch Erosion, Rutschung → Kolluvienbildung) zur Konzentration aufgetragener Düngegaben, insbesondere bei extremen Witterungsbedingungen (Starkregen oder lange Trockenphasen in Verbindung mit starken Winden). Auf den Kuppen bzw. an Hängen kommt es dagegen zum Abtrag eines Teils der Düngergaben. Die Parametrisierung dieser reliefbedingten Standortvariabilität kann z. B. durch die Berechnung eines Wölbungsfaktors (Vertikal- und Horizontalkrümmung) aus den digitalen Höhendaten erfolgen (siehe hierzu z. B. SCHMIDT & BILL 2000).



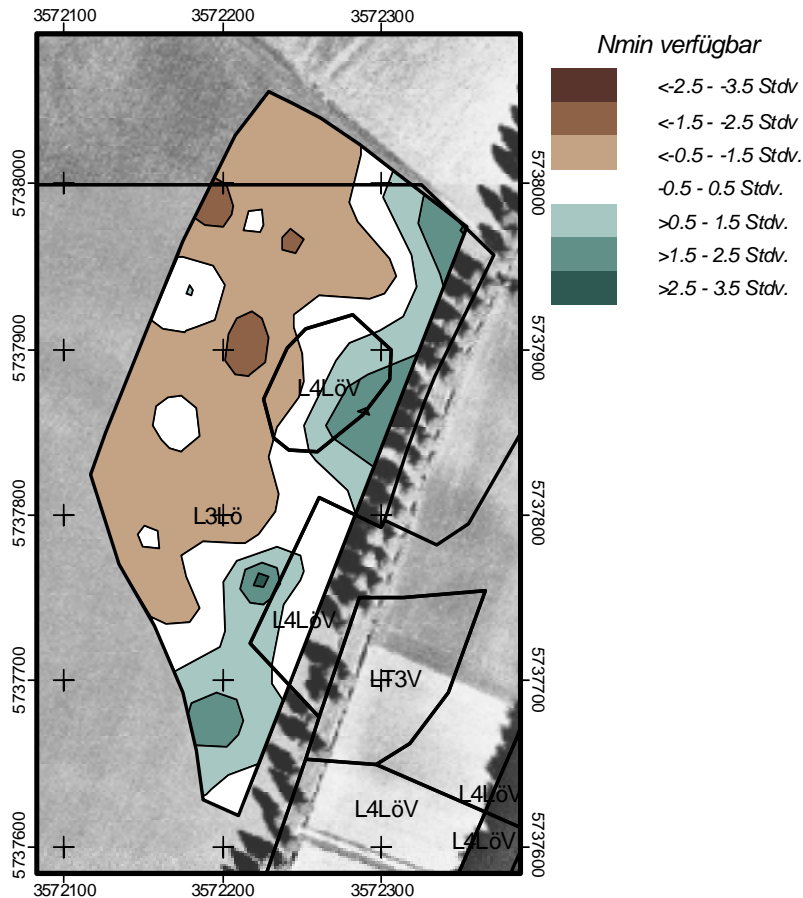
**Abb. 70: Mehrebenen-Konzept zur Bewertung der Standortvariabilität von Winterweizenschlägen**

Die bis zu diesem Verarbeitungsschritt erstellte Karte der Standortvariabilität kann zu jedem Zeitpunkt angefertigt und dem Landwirt, z. B. zur Durchführung von Grunddüngungsmaßnahmen (P, K, Mg, etc.) zur Verfügung gestellt werden. In einem weiteren Schritt kann dann durch die Einbeziehung der aus spektorradiometrischen Aufnahmen gewonnenen Karten der Nährstoffvariabilität in der Pflanze (vgl. Kap. 8.1) eine modifizierte Applikationskarte für die Stickstoffdüngung (2. und 3. Gabe) erstellt werden.

Die Bestimmung der pflanzenverfügbaren N-Anteile in der Ackerkrume basiert auf der Annahme eines Zusammenhangs zwischen dem verfügbaren Stickstoff im Boden und dem  $N_{\text{tot}}$ -Gehalt bzw. Proteingehalt in der Pflanze, der aus Aufnahmen von Pflanzenbeständen mit Hilfe abbildender Sensoren flächenhaft abgeleitet werden kann. Solche in der Regel linearen Zusammenhänge konnten bereits in früheren Untersuchungen für Getreidebestände nachgewiesen werden (siehe z. B. RAUN et al. 1998, STONE et al. 1996, VAUGHAN et al. 1990). In jüngeren Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Beziehung für den optimalen Versorgungsbereich linearer Natur ist (BAUSCH & DIKER 2001, ENGEL 1999). Im Luxusbereich kommt es zu einer Abschwächung des Zusammenhangs, im Mangelbereich zu negativen Korrelation. Die beste Annäherung des Zusammenhangs wird durch ein Polynom 2. Grades hergestellt (ENGEL 1999).

Die aus dieser Beziehung abgeleitete Karte (siehe Abb. 71) gibt nur ein Maß an für die Gehalte an pflanzenverfügbarem Stickstoff im Boden. Der tatsächliche N-Bedarf bzw. die

aufgenommene N-Menge richtet sich wiederum nach den bereits im oberen Teil des skizzierten Ablaufs berücksichtigten Standortfaktoren.



**Abb. 71: Flächenhafte Schätzung des pflanzenverfügbaren  $N_{\min}$ -Gehalts aus der multivariaten Analyse von *in situ* Spektralmessungen (EC-32, Schlag: "Unter dem Echter Wege")**

Der vorgestellte Ansatz gibt einen Einblick in die Möglichkeiten der Implementierung spektraler Daten in den Verfahrensablauf für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung am Beispiel von Winterweizenbeständen. Aufgrund der noch bestehenden hohen Unsicherheiten bei der Schätzung von Komponentenkonzentrationen aus Pflanzenmessungen sowie bei der Annahme der Beziehung zwischen Pflanzenkonzentration und verfügbaren Nährstoffgehalten im Boden, muss die Gültigkeit und Übertragbarkeit solcher Modelle zunächst noch in Frage gestellt werden. Relativierend stehen dem aber ebenso die Probleme bei der Nitratmessung aus konventionellen Bodenbeprobungen gegenüber (vgl. AUFHAMMER 1998), so dass insgesamt eine Bewertung und Empfehlung eines Verfahrensablaufs zur teilflächenspezifischen N-Applikation schwer möglich ist. Die Entscheidung für ein Verfahren zur Düngebedarfsermittlung richtet sich in der Gegenwart und auch in der Zukunft vielmehr nach den individuellen Möglichkeiten und - von nicht minderer Bedeutung - nach den Ambitionen der Anwender für den Einsatz von *precision farming* Technologien.

## 9 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden die Möglichkeiten und Grenzen der Schätzung von Komponentenkonzentrationen frischer Pflanzenmasse durch multivariate Analyseverfahren aus spektralen Messwerten dargestellt.

Nach der Einordnung der engeren Thematik in den weiteren, anwendungsbezogenen Rahmen der Arbeit (teilflächenspezifischer Pflanzenbau) (Kap. 1) erfolgte in Kap. 2 zunächst eine Einführung in die wichtigsten hier relevanten Zusammenhänge zwischen spektraler solarer Einstrahlung bzw. Reflexion und den zu untersuchenden Objekteigenschaften.

Die Ausführungen in Kap. 3 und Kap. 4 beschreiben die Lage der Untersuchungsgebiete sowie die Grundlagen der verwendeten Aufnahmegерäte. Kap. 5 beinhaltet die Beschreibung der Verfahren und Ergebnisse der Referenzdatenerhebung sowie die Erläuterungen zur Durchführung der spektroradiometrischen *in situ* Messungen und Labormessungen.

Das Untersuchungsgebiet "Imbshausen" (siehe Kap. 3.1) bildete die Grundlage für den Schwerpunkt der Datenerhebung. Hier wurden während phänologisch typischer Stadien der vegetativen Entwicklung von Winterweizenpflanzen zwei Messkampagnen zur Erfassung der spektroradiometrischen Messwertvariabilität auf Teilschlagebene durchgeführt. Insgesamt wurden auf drei Winterweizenschlägen 74 Bestandsausschnitte spektral vermessen, kartiert und laboranalytisch untersucht. Zusätzlich zu den *in situ* Aufnahmen der spektralen Reflexion erfolgte die spektroradiometrische Vermessung der getrockneten und homogenisierten Pflanzenproben unter Laborbedingungen. Jede einzelne Messung liefert einen Datensatz von 2152 spektralen Reflexionswerten, die wiederum in mehrere Spektralvariablen transformiert wurden. Zur Validierung der Ergebnisse aus der Auswertung der nicht-abbildenden spektroradiometrischen Messungen mit dem ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro Daten konnten außerdem Daten zweier Feldkampagnen herangezogen werden, die begleitend zu Befliegungen mit einem abbildenden Spektrometer (HyMap<sup>®</sup>) im Untersuchungsgebiet "Neetzow" (siehe Kap. 3.2) durchgeführt wurden.

Die Vorhersage der Konzentrationen biochemischer Pflanzenbestandteile aus spektraler Information ist abhängig von einer Fülle von Einflussvariablen der Umgebung, des Aufnahmesystems und des Objekts. Für eine zuverlässige Ableitung von Pflanzenparametern aus spektralen Messwerten ist deshalb die Durchführung eines standardisierten Ablaufs der Prozessierung unbedingt notwendig. Zur Standardisierung der spektroradiometrischen Messungen wurden in Kap. 6 absolute (Kalibrierung) und relative (Normierung) Transformationsverfahren auf den Datensatz der Spektralmessungen angewendet. Die Kalibrierung beinhaltete, neben einer spektralen Entmischung zur Ausweisung eines reinen Vegetationsspektrums, die Korrektur der Topographie durch ein Sonnenstands- und Reliefmodell (Kap. 6.3.2). Im Rahmen der Normierung der Spektralsignaturen wurden verschiedene Parametrisierungsansätze durch Verhältnisbildung der Strahlung im Rot und im NIR-Bereich verwendet (Kap. 6.5). Der Schwerpunkt der Normierungsansätze lag in der Funktionsanalyse der Spektralsignaturen und der Bildung von Spektralvariablen unter Verwendung bekannter und neu entwickelter Transformationsmethoden sowohl im Frequenz- ( $BNC$ ;  $SNC$ ,  $R_{FV}$ ) als auch im Ortsbereich ( $R_{OZ}$ ) der Reflexionsfaktoren (vgl. Kap. 6.6).

Die Standardisierung der Messwerte führte zur Bildung eines Datensatzes von Spektralvariablen, der den Eingangsdatensatz für die in Kap. 7 durchgeführte multivariate Analyse zur Ableitung biochemischer Zustandsparameter bildete. Die Maßnahmen der Datenreduktion führten auf der Basis der kausalen Beziehungen zu den Zielgrößen und sonstiger qualitativer Eigenschaften (lokale Extrema,  $SNR$ , Variationskoeffizient) zur Ausweisung von drei breiten Spektrumsabschnitten für die einzelnen Spektralvariablen, die

für die Modellbildung zur Schätzung von Pflanzenkomponenten geeignet sind (siehe Tab. 24 in Kap. 7.2.1).

Die multivariate Analyse der spektroradiometrischen Messungen verfolgte die bereits einleitend (siehe hierzu Kap. 1.3) aufgeführten Ziele und führte entsprechend dieser Vorgaben zu folgenden Ergebnissen.

- ⇒ Die Auswahl eines Verfahrens zur Standardisierung hat einen entscheidenden Einfluss auf das Resultat der multivariaten Analyse. Während die kalibrierten Messwerte der spektralen Reflexion in den meisten Fällen nur unzureichende Einflussvariablen für die multiple Regression liefern, können durch die Maßnahmen der relativen Standardisierung z. T. hohe Vorhersagegenauigkeiten zur Schätzung von Komponentenkonzentrationen erzielt werden. Hierbei ist zu beachten, dass den einzelnen Verfahren unterschiedliche Transformationsansätze zugrunde liegen, und aus diesem Grunde bei der Auswahl einer Methode immer eine eindeutige Beschreibung und Dokumentation des Prozessierungsablaufs notwendig ist (z. B. Angabe der Referenzwellenlängen bei der *SNC*- oder *BNC*-Transformation). Die Hauptkomponentenregression (PCR) ist zwar geeignet, um die Multikollinearitäten der Messwerte (vgl. Kap. 7.3.1.1) einer Spektralvariablen (z. B.  $R_{FV}$ ) zu minimieren und damit den Eingangsdatensatz auf eine minimale Anzahl von Variablen zu reduzieren, gleichzeitig wird der potentielle Informationsgehalt der Eingangsvariablen aber auf wenige Hauptkomponenten komprimiert, was sich nachteilig auf die Extraktion der untergeordneten Funktionsmerkmale in der Spektralsignatur (Schwingungs- und Rotationsbanden) für die Nährelementanteile auswirkt.
- ⇒ Das beste Vorhersagemodell zur Schätzung der Nährelementkonzentrationen wird jeweils durch die Verwendung einer wellenlängenbasierten Spektralvariable ( $R'$ , *BNC*, *SNC*, vgl. Kap. 7.4) gebildet. Insgesamt zeigen die Ableitungsspektren ( $R' = 1$ . Ableitung) die beste Eignung zur Verwendung in einem Regressionsmodell (schrittweise multiple lineare Regression  $MLR_S$ ) zur Ableitung von Komponentenkonzentrationen. Die Normierung der Funktionsabschnitte auf die Steigung führt zur Standardisierung der lokalen Extrema der Signaturkurve und gleichzeitig zur Unterdrückung multiplikativer Effekte, die das Reflexionssignal beeinträchtigen. Gleichzeitig werden untergeordnete Spektralmerkmale von Komponentenkonzentrationen gegenüber breiten Absorptionsbanden (z. B.  $H_2O$ ) gleichgestellt.
- ⇒ Spektrale Vegetationsindizes können räumliche Variabilitäten von Bestandsfaktoren abbilden (siehe z. B. Abb. 60). Die durch die Indizes aufgezeigten Strukturen stehen aber in den meisten Fällen in keinem direkten Zusammenhang zu den gemessenen Nährelementkonzentrationen der Pflanzenmasse und können bestenfalls jeweils die Verteilung eines Bestandsmerkmals aufzeigen. Die betrachteten Vegetationsindizes und Parametrisierungsansätze (*REI*) werden deshalb nicht zur Schätzung von Komponentenkonzentrationen verwendet.
- ⇒ Sowohl die aus den Labormessungen als auch die aus den spektroradiometrischen Feldmessungen hervorgegangenen Spektralvariablen liefern für die Schätzung der Hauptnährelementkonzentrationen im gesamten betrachteten Wellenlängenbereich (VNIR/SWIR) signifikante Regressionsmodelle. Die Variablen mit dem größten Anteil erklärter Varianz, die in die schrittweise Regression aufgenommen werden, zeigen aber in den meisten Fällen keine Übereinstimmungen zwischen den *in situ* und den Labormessungen. Das bedeutet, dass die Funktionsmerkmale der unter Laborbedingungen gemessenen Pflanzenproben nicht oder nur zum Teil in den Feldspektren sichtbar sind, da sie hier von primären Absorptionvorgängen überlagert werden. Offen bleibt die Frage, ob durch die Vorverarbeitung der Pflanzenproben die Molekülstruktur einiger Nährstoffe

bzw. Ihrer Stoffwechselprodukte so weit geschädigt werden, dass sie in den Labormessungen nicht mehr in ihrer ursprünglichen Form hervortreten.

- ⇒ Die Spektralvariablen des VNIR-Bereichs (580 – 1050 nm) weisen insgesamt einen höheren potentiellen Informationsgehalt bezüglich der Ableitung von Bestandskomponenten auf, was sich in besseren Schätzergebnissen ( $r^2$ ) für die untersuchten Hauptnährelemente niederschlägt. Die zusätzliche Verwendung des SWIR-Bereichs kann in den meisten Fällen die Vorhersagegenauigkeit geringfügig verbessern, das Signifikanzniveau der Vorhersage bleibt hiervon aber unbeeinträchtigt. Die Nährelemente bzw. die durch sie gebildeten Molekülkomplexe zeichnen sich deutlicher in den breiten Absorptionsbanden des VNIR-Bereichs (bei 670 nm und bei 980 nm) bzw. in den diesen untergeordneten sekundären Signaturmerkmalen innerhalb eines Absorptionsbereichs ab, als in den schmalen Absorptionsbereichen niederer Ordnung, die v. a. im SWIR-2 auftreten. Neben den kausalen Beziehungen (Lage der Schwingungsabsorptionsbanden der Molekülbindungen im VNIR) ist für dieses Ergebnis die schlechtere spektrale Auflösung und v. a. die hohe Messunsicherheit (hohe  $SNR$ ) des ASD FieldSpec<sup>®</sup> im SWIR verantwortlich. Das Ergebnis bestätigt die bereits zu Beginn der Arbeit (Kap. 4.1.3) aufgezeigten Probleme der Auswertung spektroradiometrischer Messungen v. a. im SWIR-2-Bereich.
- ⇒ Der Stickstoffgehalt sowie die Konzentration der Hauptnährelemente P und K können durch die Regressionsanalyse mit Hilfe einer wellenlängenbasierten Spektralvariable (s.o.) gut beschrieben werden (Signifikanzniveau 99 %), wenn maximal fünf Einflussvariablen (Wellenlängen) zur Erklärung der Varianz im Regressionsmodell zugelassen wurden. Die signifikante Schätzung weiterer Nährstoffkonzentrationen aus dem vorhandenen Datensatz ist nicht möglich.
- ⇒ Die Resultate der Regressionsanalyse (Auswahl der Wellenlängenkanäle) für einen bestimmten Zeitpunkt während der vegetativen Phase von Winterweizen sind nicht direkt auf Vorhersagemodellierungen zu anderen phänologischen Stadien während der Wachstumsphase übertragbar (Kreuzvalidierung, vgl. Kap. 7.4.6).
- ⇒ Die spektrale Bandbreite eines Sensors ist ab einem Schwellenwert, der bei ca. 10 nm festgelegt werden kann (entspricht der Auflösung bestehender Systeme, wie z. B. Hyperion, AVIRIS), kein limitierender Faktor bei der Auswertung von Spektralsignaturen für Vegetationsaufnahmen. Die Simulation verschiedener Sensoren durch Reduktion der Wellenlängenkanäle auf die jeweilige spektrale Bandbreite (vgl. Kap. 7.2.2 und Kap. 7.4.4) hatte keinen Einfluss auf die Resultate der Schätzmodelle zur Vorhersage von Komponentenkonzentrationen ( $c_{meas}$ ). Für die spektrale Aufnahme von Vegetationsbeständen ist nicht die Anzahl sondern vielmehr die Lage und spektrale Bandbreite der Wellenlängenkanäle sowie das Signal-Rausch-Verhältnis ( $SNR$ ) des Sensors verantwortlich. Für absolute Empfehlungen über die Lage der Zentrumswellenlängen für zukünftige Spektralsensoren sind vertiefende methodische Untersuchungen notwendig. Hierzu ist der Einsatz von Sensoren mit einer höheren Stabilität im SWIR-2 erforderlich. Das verwendete ASD FieldSpec<sup>®</sup> Pro JR kann den für eine solche Untersuchung erforderlichen Ansprüchen nur bedingt (im VNIR bis SWIR-1) genügen.
- ⇒ Die schrittweise multiple lineare Regression (MLR<sub>S</sub>) hat sich als solides Verfahren zur Schätzung von Bestandsparametern aus Spektraldaten erwiesen, da es als nicht-deterministisches Verfahren die Variabilität des Eingangsdatensatzes unabhängig von Zielvorgaben analysiert. Hierdurch ist gewährleistet, dass die Ergebnisse der Regressionsanalyse eindeutig nachvollziehbar und somit leicht interpretierbar sind. Die Eingangsbeschränkungen für die Spektralvariablen (keine Kollinearitäten) konnten durch

geeignete Maßnahmen der Datentransformation ( $R'$ ,  $BNC$ ,  $SNC$ ) erfüllt werden. Der Tauglichkeit des Verfahrens stehen die Unsicherheiten der Einflussvariablen gegenüber. Die durch die  $MLR_S$  ausgewählten Variablen (Wellenlängenkanäle) für die Vorhersage von Komponentenkonzentrationen sind nicht konstant und somit die Ergebnisse der Regressionsmodelle nicht übertragbar. Insgesamt liegen die detektierten Wellenlängen aber in den meisten Fällen in der Umgebung eines nachgewiesenen Absorptionsbereichs für ein Element bzw. dessen Verbindungen (vgl. Tab. 37 und Tab. 40). Der Einschluss von Wellenlängenkanälen in ein Regressionsmodell scheint nicht auf deren Kausalbeziehung zur untersuchten biochemischen Komponente zu beruhen.

Abschließend wurden die Ergebnisse der Modellierung von Zustandsgrößen aus den Spektraldaten verwendet, um einen Ausblick auf die Möglichkeiten der Einbeziehung spektraler Information zur Kartierung aktueller Standort- und Bestandsdaten für eine teilflächenspezifische Maßnahmenapplikation im modernen Ackerbau zu geben (Kap. 8).

Als übergreifendes Fazit der durchgeführten Untersuchungen und hier zusammengefassten Ergebnisse zur Bewertung des Informationsgehalts spektraler *in situ* Messungen von Pflanzenbeständen lässt sich feststellen, dass die Schätzung von Komponentenkonzentrationen der Hauptnährelemente von Winterweizenpflanzen mit Hilfe spektroradiometrischer Messungen möglich ist. Hierbei sind aber, wie oben erläutert, eine Reihe einschränkender Aspekte zu berücksichtigen.

Raumbezogene Geodaten können einen entscheidenden Beitrag zur optimierten und objektiven Datenerhebung für die Darstellung von Standortvariabilitäten im Rahmen des teilflächenspezifischen Ackerbaus (*precision farming*) leisten. Hierbei nehmen Fernerkundungsdaten in Abhängigkeit von ihrer verfügbaren zeitlichen, räumlichen und spektralen Auflösung eine zunehmend bedeutendere Stellung bei der Kartierung räumlicher Inhomogenitäten sowohl konstanter Standortfaktoren (Bodenart, Feuchteregime) als auch immobilier Nährstoffkonzentrationen in der Pflanze ein. Darüber hinaus bieten spektral und geometrisch hochauflösende Sensoren ein hohes Potenzial zur Ableitung mobiler biochemischer Konzentrationen von Winterweizenbeständen, insbesondere zur Vorhersage des Stickstoffgehalts von Pflanzen während der vegetativen Phase.

Die z. T. enttäuschenden Ergebnisse der multivariaten Analyse im Rahmen dieser Arbeit sollen nicht das hohe Potenzial spektroradiometrischer Aufnahmen von Pflanzenbeständen zur zeitnahen Zustandsbeschreibung von Kulturpflanzenbeständen überschatten, sondern vielmehr den hohen zukünftigen Forschungsbedarf zur Analyse der komplexen Zusammenhänge zwischen elektromagnetischer Strahlung und der quantitativen Beschreibung von Pflanzenparametern unterstreichen.

## Literaturverzeichnis

- AL-ABBAS, A. H., BAR, R., HAL, J. D., CRANE, F. L. & M. F. BAUMGARDNER (1974): Spectra of normal and nutrient deficient maize leaves. In: *Agronomy Journal*, Vol. 66, S.16-20
- AMBERGER, A. (1996): *Pflanzenernährung*. 4. Aufl., Stuttgart.
- ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES INC. (ASD) (1999): *Technical Guide*. 3. Aufl., Boulder.
- ASCOUGH, J. C., HOAG, D. L., FRASIER, W. M. & G. S. MCMASTER (1999): Computer use in agriculture: an analysis of Great Plains producers. In: *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 23, S. 189-204
- AUERNHAMMER, H. (2001): Precision farming - the environmental challenge. In: *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 30, S. 31-43
- AUFHAMMER, W. (1998): *Getreide und andere Körnerfruchtarten*. Stuttgart.
- BACH, H. & W. MAUSER (1993): Extraction of agricultural parameters from Imaging-Spectrometry data and simulated MERIS data through Red Edge Analysis. In: Guyenne, T. D. [Hrsg.]: *European Imaging Spectroscopy Aircraft Campaign. Proceedings of an ESA & JRC-IRSA Workshop / European Space Agency*, ESA SP-360, Noordwijk, S. 81-92
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W. & R. WEIBER (2000): *Multivariate Analysemethoden*. 9. Aufl., Berlin und Heidelberg.
- BAHRENBERG, G, GIESE, E. & J. NIPPER (1992): *Statistische Methoden in der Geographie. Band 2 - Multivariate Statistik*. Stuttgart.
- BARET, F. & S. JAQUEMOUD (1994): Modeling canopy spectral properties to retrieve biophysical and biochemical characteristics. In: Hill, J. & J. Mégier [Hrsg.] (1994): *Imaging spectrometry - a tool for environmental observations. Euro Courses, Remote Sensing*, Vol. 4, S. 145-167
- BARET, F. & T. FOURTY (1997): The limits of a robust estimation of canopy biochemistry. In: G. Guyot & T. Phulpin (eds.): *Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing (International Symposium, Courchevel, France, 7-11 April 1997)*, Vol. 2, S. 413-420
- BARTON, F. E., HIMMELSBACH, D. S., DUCKWORTH, J. H. & M. J. SMITH (1992): Two-dimensional vibration spectroscopy: correlation of mid- and near-infrared regions. In: *Applied Spectroscopy*, Vol. 46, S. 420-429
- BATESON, A. & B. CURTISS (1996): A method fo manual endmember selection and spectral unmixing. In: *Remote Sens. Environ.*, Vol. 55, S. 229-243
- BATTE, M. T. (2000): Factors influencing the profitability of precision farming. In: *Journal of soil and water conservation*, Vol. 55, Nr. 1, S. 12-18
- BAUER, M. E., DAUGHTRY, C. S., BIEHL, L. L., KANEMASU, E. T. & F. G. HALL (1986): Field spectroscopy of agricultural crops. In: *IEEE Trans. Geosc. & Electronics*, Vol. 24, S. 65-75
- BAUMGARDNER, M. F., SILVA, L. F., BIEHL, L. L. & E. R. STONER (1985): Reflectance properties of soils. In: *Advance in Agronomy*, Vol. 38, S. 1-38
- BAUSCH, W. C. & H. R. DUKE (1996): Remote sensing of plant nitrogen status in corn. In: *Transactions of the ASAE*, Vol. 39, Nr. 5, S. 1869-1875

- BAUSCH, W. C. & K. DIKER (2001): Innovative remote sensing techniques to increase nitrogen use efficiency of corn. In: Communications in soil science & plant analysis, Vol. 32, Nr. 7&8, S. 1371-1390
- BEN-DOR, E., IRONS, J. R. & EPEMA, G. F. (1999): Soil Reflectance. In: Rencz, A. N. [Hrsg.]: Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing Bd. 3, 3. Aufl., S. 111-188
- BERGMANN, W. [HRSG.] (1993): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen - Entstehung, visuelle und analytische Diagnose. 3. Aufl., Jena u.a.
- BIRTH, G. S. & G. MCVEY (1968): Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer. In: Agronomy Journal, Vol. 60, S. 640-643
- BLACKBURN, G. A. (1998a): Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: An evaluation of some hyperspectral approaches. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 66, S. 273-285
- BLACKBURN, G. A. (1998b): Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. In: Int. J. Remote Sensing, Vol. 19, Nr. 4, S. 657-675
- BLACKMER, T. M., SCHEPERS, J. S., VARVEL, G. E. & E. A. WALTER-SHEA (1996): Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. In: Agronomy Journal, Vol. 88, Nr. 1, S. 1-5
- BOLSTER, K.L., MARTIN M.E. & J. D. ABER (1996): Determination of carbon fraction and nitrogen concentration in tree foliage by near infrared reflectance: A comparison of statistical methods. In: Canadian journal of forest research, Vol. 26, Nr. 4, S. 590-600
- BONHAM-CARTER, G. F. (1988): Numerical procedures and computer program for fitting an inverted gaussian model to vegetation reflectance data. In: Computers & Geosciences, Vol. 14, Nr. 3, S. 339-356
- BRISCO, B., BROWN, R. J., HIROSE, T., MCNAIRN, H. & K. STAENZ (1998): Precision agriculture and the role of remote sensing: a review. In: Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 24, Nr. 3, S. 315-327
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMVEL) (2001): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMVEL) (2002): Ernährungs- und agrarpolitischer Bericht der Bundesregierung.
- CARD, D. H.; PETERSON, D. L.; MATSON, P. A.; ABER, J. D. (1988): Prediction of leaf chemistry by the use of visible and near infrared reflectance spectroscopy. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 26, S. 123-147
- CHAPPELLE, E. W., MOON, S. K. & S. K. MCMURTREY (1992): Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of Chlorophyll a, Chlorophyll b and Carotenoids in soybean leaves. In: Remote Sens. Environ., Vol. 39, S. 239-247
- CHEN, F. C., KISSEL, D. E., WEST, L. T. & W. ADKINS (2000): Field-scale mapping of surface soil organic carbon using remotely sensed imagery. In: Soil Science Society of America Journal, Vol. 64, S. 746-753
- CIHLAR, J., M. DOBSON, T. SCHMUGGE, P. HOOGBOOM, A. JANSE, F. BARET, G. GUYOT, LE TOAN, T. & P. PAMPALONI (1987): Procedures for the description of agricultural crops



- and soils in optical and microwave remote sensing studies.. In: *Int J. Remote Sensing*, Vol. 8, Nr. 3, S. 427 - 439
- CLARK, R. N. & T. L. ROUSH (1984): Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. In: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, Nr. B7, S. 6329-6340
- CLARK, R. N. (1999): Spectroscopy of rocks and minerals and principles of spectroscopy. In: Rencz, A. N. [Hrsg.]: *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing Bd. 3*, 3. Aufl., S. 3-58
- CLARK, R. N., KING, T. V., KLEWJA, M., SWAYZE, G. A. & N. VERGO (1990): High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. In: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, Nr. B8, S. 12653-12680
- CLEVERS, J. (1999): The use of imaging spectrometry for agricultural applications. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54, S. 299-304
- CLEVERS, J. (2001): MERIS and the Red Edge Index. In: Bakker, W. et al. [Hrsg.]: 2nd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, 7.-11. July 2000, Enschede
- CLEVERS, J. & C. BÜKER (1991): Feasibility of the red edge index for the detection of nitrogen deficiency. In: *Proc. 5th Int. Coll. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel, France, ESA SP-319, S. 165-168
- CLEVERS, J. P. (1994): Imaging spectrometry in agriculture - plant vitality and yield indicators. In: Hill, J. & J. Mégier [Hrsg.] (1994): *Imaging spectrometry - a tool for environmental observations*. Euro Courses, Remote Sensing, Vol. 4, S. 193-219
- COCKS, T., R. JENSSEN, A. STEWART, I. WILSON & T. SHIELDS (1998): The Hymap airborne hyperspectral sensor: the system calibration and performance. In: Shaepman, M., D. Schläpfer & K. Itten [Hrsg.]: 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, RSL Univ. Zürich, Zwitzerland 6.-8. Oct. 1998, S. 37-42
- CURRAN, P.J. (1988): The semivariogram in remote sensing: an introduction. In: *Remote Sensing of Environment*, Vol. 24, S. 493-507
- CURRAN, P. J. (1989): Remote sensing of foliar chemistry. In: *Remote Sensing of Environment*, Vol. 30, S. 271-278
- CURRAN, P. J., DUNGAN, J. L. & D. L. PETERSON (2001): Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry - Testing the Kokaly and Clark methodologies. In: *Remote Sensing of Environment*, Vol. 76, S. 349-359
- DAUGHTRY, C. S. T., WALTHALL, C. L. KIM, M. S., BROWN DE COLSTOUN, E. & J. E. MCMURTREY (2000): Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. In: *Remote Sensing of Environment*, Nr. 74, S. 229-239
- DAWSON, T. P. & P. J. CURRAN (1998): A new technique for interpolating the reflectance red edge position. In: *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 19, S. 2133-2139
- DAWSON, T. P., CURRAN, P. J. & S. E. PLUMMER (1998): LIBERTY - Modeling the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra. In: *Remote Sens. Environ.*, Vol. 65, S. 50-60
- DEERING, D. W., ROUSE, J. W., HAAS, R. H. & J. A. SCHELL (1975): Measuring forage production of grazing units from Landsat MSS data. In: *Proc. 10th Int. Symp. on remote Sensing fo Environment*, Ann Arbor: ERIM, Vol. 2, S. 1169-1178

- DEMETRIADES-SHAH, T.-H., STEVEN, M. D. & J. A. CLARK (1990): High resolution derivative spectra in remote sensing. In: *Remote Sens. Environ.*, Vol. 33, S. 55-64
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2002): Klimainformationssystem des DWD. URL: <http://www.dwd.de/research/klis/> (10.03.2002)
- DOBERS, E.S., B. MEYER & R. ROTH (2001): Comparison of Wheat Yields and Soil Apparent Electric Conductivity of Sandloess-Soils in Brandenburg/Germany. In: *European Journal of Agronomy*
- DUFFIE (1991): *Solar engineering of thermal processes*. 2. Aufl. New York u.a..
- DUGGIN, M. J. (1980): The field measurement of reflectance factors. In: *Phot. Eng. & Rem. Sens.*, Vol. 46, Nr. 5, S. 643-647
- EHLERT, D. & DOMSCH, H. (2001): Korrelationen zwischen Boden- und Pflanzenparametern. In: *Landtechnik*, Vol. 56, Nr. 3, S. 134-135
- ELVIDGE, C. D. & Z. CHEN (1995): Comparison of Broad-Band and Narrow-Band Red and Near-Infrared Vegetation Indices. In: *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 54, Nr. 1, S. 38-48
- ENGEL, R.E., LONG, D. S., CARLSON, G. R. & C. MEIER (1999): Method for Precision Nitrogen Management in Spring Wheat: 1 Fundamental Relationships. In: *Precision Agriculture*, Vol. 1, S. 327-338
- ERASMI, S. & M. KAPPAS (2001): Spectral signatures of cultivated crops for GIS-supported applications in precision farming. In: *Proc. 21<sup>st</sup> EARSeL-Symposium*, 14-16 May 2001, Paris, France, S. 209-214
- ERB, W. [Hrsg.] (1989): *Leitfaden der Spektroradiometrie*. Berlin u.a..
- ESCADAFAL, R. (1994): Soil spectral properties and their relationships with environmental parameters - examples from arid regions. In: Hill, J. & J. M egier [Hrsg.] (1994): *Imaging spectrometry - a tool for environmental observations*. Euro Courses, Remote Sensing, Vol. 4, S. 71-87
- FOURTY, F., F. BARET, S. JACQUEMOUD, G. SCHMUCK, J. VERDEBOUT (1996): Leaf optical properties with explicit description of its biochemical composition: direct and inverse problems. In: *Remote Sensing of Environment*, Vol. 56, Nr. 2, S. 104-117
- FRAHM, B. [HRSG.] (1993): *Der Landwirt 1: Pflanzenbau, Gr nland, Landtechnik*. Stuttgart
- GASTELLU-ETCHEGORRY, J. P., F. ZAGOLSKI, E. MOUGIN, G. MARTY & G. GIORDANO (1995): An assessment of canopy chemistry with AVIRIS - a case study in the Landes Forest, South-west France. In: *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 16, Nr. 3, S. 487-501
- GATES, D. M. (1970): Physical and physiological properties of plants. In: National Academy of Sciences [Hrsg.]: *Remote sensing with special references to agriculture and forestry*, S. 224-252
- GEISLER, G. (1988): *Pflanzenbau: ein Lehrbuch*. 2. Aufl. Berlin u.a..
- GOETZ, A. F. H. (1992): Principles of narrow band spectrometry in the visible and IR: instruments and data analysis. In: Toselli, F. & J. Bodechtel [Hrsg.] (1992): *Imaging spectrometry - fundamentals and prospective applications*. Euro Courses, Remote Sensing, Vol. 2, S. 21-32
- GONG, P., PU, R. & R. C. HEALD (2002): Analysis of in situ hyperspectral data for nutrient estimation of giant sequoia. In: *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 23, Nr. 9, S. 1827-1850

- GRIEPENTROG, H.-W. (1998): Fehlerquellen der Ertragsermittlung beim Mähdrusch. In: Landtechnik, Vol. 53, S. 333-334
- GROFFMAN, P.M. (1997): Ecological constraints on the ability of precision agriculture to improve the environmental performance of agricultural production systems. In: Lake, J.V., G.R. Bock & J.A. Goode (eds.): Precision agriculture: spatial and temporal variability of environmental quality, S. 52-67
- GROSSMAN, Y. L., S. L. USTIN, S. JACQUEMOUD, E. W. SANDERSON, G. SCHMUCK & J. VERDEBOUT (1996): Critique of stepwise multiple linear regression for the extraction of leaf biochemistry information from leaf reflectance data. In: Remote Sens. Environ., Vol. 56, S. 182-193
- GUYOT, G. & F. BARET (1988): Utilisation de la haute resolution spectrale pour suivre l'etat des couverts vegetaux. In: Proc. 4th Int. Coll. Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Aussois, France, ESA SP-287, S. 279-286
- HACKBARTH, S. & J. LAMP (2000): Computergestützte Erstellung von Karten für die Grunddüngung im "Precision Farming". In: Wasser & Boden, Vol. 52, Nr. 6, S. 4-6
- HABELBAUER, R. P. (1989): Kartierung und Analyse einer Gesellschaft von Böden der Entwicklungssequenz Schwarzerde-Parabraunerde mit Veränderung durch Erosion und Akkumulation in einer Lössmulde des südniedersächsischen Berglandes. unveröff. Diplomarbeit, Inst. f. Bodenwissenschaften, Univ. Göttingen.
- HENKEL, G. (1999): Der ländliche Raum : Gegenwart und Wandlungsprozesse seit dem 19. Jahrhundert in Deutschland. 3. Aufl. Stuttgart u.a..
- HERBST, R. & J. LAMP (2000): geostatistische Analyse für effiziente Probenahmen im "Präzisen Landbau". In: Wasser & Boden, Vol. 52, Nr. 6, S. 7-10
- HILDEBRANDT, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung. Heidelberg.
- HILL, J. (1998): Neue Wege zur geowissenschaftlichen Auswertung multispektraler Fernerkundungsdaten. In: Geographische Rundschau, Vol. 50, Nr. 2, S. 113-119
- HOFFMANN, H. & J. BÖHNER (1999): Spatial pattern recognition by means of representativeness measures. In: Proc. IGARSS'99, in press
- HORLER, D., DOCKRAY, M. & J. BARBER (1983): The red edge of plant leaf reflectance. In: Int. J. Remote Sensing, Vol. 4, S. 273-288
- HOSTERT, P., JARMER, T., UDELHOVEN, T. & J. HILL (2001): Sensitivity analysis of HyMap data for agricultural applications. In: Bakker, W. et al. [Hrsg.]: 2nd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, 7.-11. July 2000, Enschede
- HUNT, G. R. (1977): Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. In: Geophysics, Vol. 42, Nr. 3, S. 501-513
- HUNT, G. R. (1980): Electromagnetic radiation: the communication link in remote sensing. In: Siegal, B. S. & A. R. Gillespie: Remote Sensing in Geology, S. 5-45
- HYDROAGRI (2002): Hydro Agri's Precision Farming Website. URL: <http://www.hydroprecise.com/> (09.05.2002)
- JACQUEMOUD, S., J. VERDEBOUT, G. SCHMUCK, G. ANDREOLI & B. HOSGOOD (1995): Investigation of leaf biochemistry by statistics. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 54, S. 180-188

- JACQUEMOUD, S., S. L. USTIN, J. VERDEBOUT, G. SCHMUCK, G. ANDREOLI & B. HOSGOOD (1996): Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. In: Remote Sens. Environ., Vol. 56, Nr. 3, S. 194-202
- JENSEN, A; LORENZEN, B.; SPELLING OSTERGAARD, H.; KLOSTER HVELPLUND, E. (1990): Radiometric estimation of biomass and nitrogen content of barley grown at different nitrogen levels. In: Int. J. Remote Sensing, Vol. 11, S. 1809-1820
- JENSEN, J. R. (2000): Remote Sensing of the Environment - An Earth Resource Perspective. London u.a..
- JET PROPULSION LABORATORY (JPL) (25.10.2001): ASTER Spectral Library. URL: <http://speclib.jpl.nasa.gov/> (08.05.2002)
- JOHNSON, L. F. & C. R. BILLOW (1996): Spectrometric estimation of total nitrogen concentration in Douglas-fir foliage. In: Int. J. Remote Sensing, Vol. 17, Nr. 3, S. 489-500
- JOHNSON, L. F., C. A. HLAVKA & D. L. PETERSON (1994): Multivariate analysis of AVIRIS data for canopy biochemical estimation along the oregon transect. In: Remote Sens. Environ., Vol. 47, S. 216-230
- KNEUBÜHLER, M. (2001): Spectroradiometry as a tool for phenological characterization of agricultural crop stands. In: 21. Jahrestagung der DGPF, 4.-7. Sept. 2001, Konstanz (Publikationen der DGPF, Bd. 10), S. 379-388
- KOKALY, R. F. & R. N. CLARK (1999): Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 67, S. 267-287
- KOKALY, R. F. (2001): Investigating a physical basis for spectroscopic estimates of leaf nitrogen concentration. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 75, S. 153-161
- KORDUAN, P., GRENZDÖRFFER, G. & R. BILL (2000): Informationsmanagement und Informationsbeschaffung in der modernen Landwirtschaft. In: Proc. 2. Wismarer Wirtschaftsinformatiktage
- KOSTKOWSKI, H. J. (1997): Reliable spectroradiometry. La Plata, Md.
- KRAUS, K. & W. SCHNEIDER (1988): Fernerkundung. Band 1: Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken. Bonn.
- KRIEBEL, K.T., W. SCHLÜTER & J. SIEVERS (1975): Zur Definition und Messung der spektralen Reflexion natürlicher Oberflächen. In: Bildmessung und Luftbildwesen, Vol. 43, Nr. 1, S. 43-50
- KRUSE, F.A., A.B. LEFKOFF, J.W. BOARDMAN, K.B. HEIDEBRECHT, A.T. SHAPIRO, P.J. BARLOON & A.F.H. GOETZ (1993): The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. In: Remote Sens. Environ. Vol. 44, S. 145-163
- KUHLMANN, F. & C. BRODERSEN (2001): Information technology and farm management: developments and perspectives. In: Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 30, S. 71-83
- LABSPHERE, INC. (2001): A Guide to Reflectance Coatings and Materials. In: Labsphere Technical Guide

- LACAPRA, V. C., MELACK, J. M., GASTIL, M. & D. VALERIANO (1996): Remote sensing of foliar chemistry of inundated rice with imaging spectrometry. In: *Remote Sens. Environ.*, Vol. 55, S. 50-59
- LELONG, C. C.D, P. C. PINET & H. POILVE (1998): Hyperspectral Imaging and Stress Mapping in Agriculture: A Case Study on Wheat in Beauce (France). In: *Remote Sens. Environ.*, Vol. 66, Nr. 2, S. 179-191
- LI, Y, T. H. DEMETRIADES-SHAH, E. T. KANEMASU, J. K. SHULTIS & M. B. KIRKHAM (1993): Use of second derivatives of canopy reflectance for monitoring prairie vegetation over different soil backgrounds. In: *Remote Sens. Environ.*, Vol. 44, S. 81-87
- LILIENTHAL, H., HANEKLAUS, S., SCHNUG, E. & E. HAVERESCH (2000): Utilisation of hyperspectral data for the evaluation of the spatial variability of the nitrogen status of wheat. In: *Aspects of Applied Biology*, Vol. 60
- LINSEISEN, H., SPANGLER, A., HANK, K., WAGNER, P., STEINMAYER, T., DEMMEL, M., AUERNHAMMER, H., MANAKOS, I., SCHNEIDER, T. & J. LIEBLER (2000): Daten, Datenströme und Software in einem Inforamtionssystem zur teilflächenspezifischen Pflanzenproduktion. In: *Zeitschrift für Agrarinformatik*, Vol. 8, S. 36-43
- LÜCK, E., EISENREICH, M., H. DOMSCH & O. BLUMENSTEIN (2000): Geophysik für Landwirtschaft und Bodenkunde. In: *Stoffdynamik in Geosystemen – Bd. 4* Potsdam.
- LUFSA SACHSEN-ANHALT [HRSG.] (2000): Grundlagen der Düngebedarfsermittlung für eine gute fachliche Praxis beim Düngen.
- MANAKOS, I., SCHNEIDER, T. & U. AMMER (2001): Angular spectroradiometric field measurements for precision farming purposes. In: *Proceedings 3rd European Conference on Precision Agriculture*, Montpellier, Frankreich, S. 253-258
- MATHERON, G. (1963): Principles of Geostatistics. In: *Economy Geology*, Vol. 58, S. 1246-1266
- MEISTER, G. (1995): Messung der spektralen Reflexionsfunktion (BRDF) ausgewählter Oberflächen bei natürlicher Beleuchtung. unveröff. Dipl.-Arbeit Univ. Hamburg, FB Physik
- MENGEL, K. (1991): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. 7. Aufl., Jena.
- MILTON, E. J. (1987): Principles of field spectroscopy. In: *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 8, Nr. 12, S. 1807-1827
- MORAGHAN, J. T., SIMS, A. & L. SMITH (2000): Remote sensing of sugarbeet canopies for improved nitrogen fertilizer recommendations for a subsequent wheat crop. In: *Communications in soil science and plant analysis*, Vol. 31, Nr. 7-8, S. 827-836
- MORAN, M. S., INOUE, Y. & E. M. BARNES (1997): Opportunities and limitations for image-based remote sensing in Precision Crop Management. In: *Remote Sens. Environ.*, Vol. 61, S. 319-346
- MORAN, M. S., VIDAL, A., TROUFLEAU, D., INOUE, Y & T.A. MITCHELL (1998): Ku- and C-Band SAR for Discriminating Agricultural Crop and Soil Conditions. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 36, Nr. 1, S. 265-272
- MULLA, D.J (1997): Geostatistics, remote sensing and precision farming. In: Lake, J.V., G.R. Bock & J.A. Goode (eds.): *Precision agriculture: spatial and temoral variability of environmental quality*, S. 100-119

- MUNDEN, R., CURRAN, P. J. & J. A. CATT (1994): The relationship between red edge and chlorophyll concentration in the Broadbalk winter wheat experiment at Rothamsted. In: *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 15, Nr. 3, S. 705-709
- MYERS, V. I. (1970): Soil, Water and Plant Relations - Reflectance Studies on Plants and Soils and their Applications. In: National Academy of Sciences [Hrsg.]: *Remote sensing with special references to agriculture and forestry*, S. 253-297
- OTTO, M. (1998): *Chemometrics. Statistics and Computer Application in Analytical Chemistry*. 1. Aufl. Wiley-VCH, Weinheim.
- PEÑUELAS J., J. A. GAMON, A. L. FREDEEN, J. MERINO & C. B. FIELD (1994): Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. In: *Remote Sens. Environ.*, Vol. 48, Nr. 2, S. 135-146
- PETERSON, D. L., ABER, J. D., MATSON, P. A., CARD, D. H., SWANBERG, N. A. WESSMAN, C. A. & M. A. SPANNER (1988): Remote sensing of forest canopy and leaf biochemical contents. In: *Remote Sens. Environ.*, Vol. 24, S. 85-108
- PLANT, R. (2001): Site-specific management: the application of information technology to crop production. In: *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 30, S. 9-29
- PRICE, J. C. (1995): Examples of high resolution visible to near-infrared reflectance spectra as a standardized collection for remote sensing studies. In: *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 16, Nr. 6, S. 993-1000
- PURVES, (2001): *Life: The Science of Biology*. 6. Aufl., Gordonsville.
- RAUN, W.R., G.V. JOHNSON, H. SEMBIRING, E.V. LUKINA, J.M. LARUFFA, W.E. THOMASON, S.B. PHILLIPS, J.B. SOLIE & M.L. STONE (1998): PLENARY PRESENTATIONS - Indirect Measures of Plant Nutrients. In: *Communications in soil science and plant analysis*, Vol. 29, Nr. 11-14, S. 1571-1584
- RELIN, A. (1996): Kontrolle flächengestützter Beihilfen in der Landwirtschaft durch Satellitenfernerkundung.. In: *Schriftenreihe der Zentralstelle für Agrardokumentation und -information (ZADI)*, Bd. 8, Bonn.
- ROBINSON, D. A. & D. P. DE WITT (1983): Electro-optical non-imaging sensors. In: Colwell, R. N. [Hrsg.]: *Manual of Remote Sensing Bd. 1 - Theory, Instruments and Techniques*, 2. Aufl., S. 293-334
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A. & D. W. DEERING (1974): Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERST. In: *Proc. 3rd ERTS-1 Symposium, Greenbelt, NASA SP-351*, S. 3010-3017
- SADLER, E. J., BUSSCHER, W. J., BAUER, P. J. & D. L. KARLEN (1998): Spatial scale requirements for precision farming: A case study in the southeastern USA. In: *Agronomy Journal*, Vol. 90, S. 191-197
- SALISBURY, J. W. (1998): Spectral measurements field guide. In: *Defense Technology Information Center Report No. ADA362372*
- SANDMEIER, S. R. & K. I. ITTEN (1999): Field Goniometer System (FIGOS) for acquisition of hyperspectral BRDF data. In: *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, Vol. 37, Nr. 2, S. 978-986
- SAVITZKY, A. & M. J. E. GOLAY (1964): Smoothing and differentiation of data by simplified least square procedure. In: *Analytical Chemistry*, Vol. 36, S. 1627-1638

- SCHAEPMAN, M. E. (1998): Calibration of a field spectroradiometer: Calibration and Characterization of a non-imaging field spectroradiometer supporting imaging spectrometer validation and hyperspectral sensor modelling. In: Remote Sensing Series, Vol. 31 Zürich.
- SCHANDA, E. (1986): Physical fundamentals of remote sensing. Berlin u.a..
- SHELLBERG, J. (1990): Die spektrale Reflexion von Weizen - ein Beitrag zur Zustandsbeschreibung landwirtschaftlicher Kulturpflanzenbestände durch Fernerkundung. Inst. f. Pflanzenbau, Univ. Bonn, Diss.
- SCHIECHE, B., S. ERASMI, T. SCHRAGE & P. HURLEMANN (1999): Monitoring and registering of grassland and fallow fields with multitemporal ERS data within a district of Lower Saxony, Germany. In: Proc. IGARSS'99, June 1999, Hamburg.
- SCHILLING, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. München u.a..
- SCHMIDT, F. & R. BILL (2000): Digitale Geländemodelle in der Landwirtschaft. In: Liebig, W. & J. Schaller [Hrsg.]: ArcView GIS - GIS Arbeitsbuch, 2. Aufl., Heidelberg, S. 189-208
- SCHMIDT, W. (2000): Optische Spektroskopie - Eine Einführung. 2. Aufl. Wiley-VCH, Weinheim.
- SCHNEIDER, T. (1994): Möglichkeiten und Grenzen der spektralen Trennbarkeit ackerbaulicher Oberflächentypen - eine Abschätzung anhand spektroskopischer Untersuchungen über die Vegetationsperiode. In: Mangstl., A. & J. M. Pohlmann [Hrsg.]: Informationsmanagement in den Agrarwissenschaften, Bd. 4 Bonn.
- SCHÖNWIESE, C.D. (2000): Praktische Statistik fuer Meteorologen und Geowissenschaftler. 3. Aufl., Berlin.
- SCHOWENGERDT, R.A. (1997): Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. 2. Aufl. San Diego.
- SEMBIRING, H., RAUN, W. R., JOHNSON, G. V., STONE, M. L., SOLIE, J. B. & S. B. PHILLIPS (1998): Detection of nitrogen and phosphorus nutrient status in winter wheat using spectral radiance. In: Journal of Plant Nutrition, Vol. 21, Nr. 6, S. 1207-1233
- SMITH, D. L. & C. HAMEL (1999): Crop Yield - Physiology and Process. Berlin u.a..
- STONE, M. L., SOLIE, J. B., RAUN, W. R., WHITNEY, R. W., TAYLOR, S. L. & J. D. RINGER (1996): Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. In: Transactions of the ASAE, Vol. 39, Nr. 5, S. 1623-1631
- STOYAN, D., H. STOYAN & U. JANSEN (1997): Umweltstatistik - Statistische Verarbeitung and Analyse von Umweltdaten. Stuttgart und Leipzig.
- THOMAS, J. R. & G. F. OERTHER (1972): Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements. In: Agronomy Journal, Vol. 64, S. 11-13
- UDELHOVEN, T., JARMER, T. & J. HILL (2001): Die Nutzung von Hyperspektraldaten zur Erfassung von Bodeneigenschaften - Grundlagen und Anwendungsperspektiven. In: 21. Jahrestagung der DGPF, 4.-7. Spet. 2001, Konstanz (Publikationen der DGPF, Bd. 10), S. 369-377
- VAUGHAN, B., WESTFALL, D. G., BARBARICK, H. A. & P. L. CHAPMAN (1990): Spring nitrogen fertilizer recommendation models for dryland hard red winter wheat. In: Agronomy Journal, Vol. 82, S. 565-571

- VOGELMANN, J. E.; ROCK, B. N.; MOSS, M. (1993): Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. In: *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 14, Nr. 8, S. 1563-1575
- WAGNER, P. (2000): Neue Einkommenschancen durch Precision Farming und Marktorientierung. In: DLG [Hrsg.]: *Der Landwirt der Zukunft - Wege erfolgreicher Praktiker*. DLG-Wintertagung, 10.-12. Januar 2000 in München, Vol. 94, S. 135-170
- WALLACE, A. (1994): High-Precision Agriculture Is an Excellent Tool for Conservation of Natural Resources. In: *Communications in soil science and plant analysis*, Vol. 25, Nr. 1-2, S. 45-49
- WANING, J., NEWE, M. & A. WYTZISK (2000): Teilflächenspezifische Aussaat von Winterweizen. In: Liebig, W. & J. Schaller [Hrsg.]: *ArcView GIS - GIS Arbeitsbuch*, 2. Aufl., Heidelberg, S. 177-188
- WEIB, W. [HRSG.] (1996): *Mecklenburg-Vorpommern - Brücke zum Norden und Tor zum Osten*. In: *Perthes Länderprofile Gotha*.
- WESSMAN, C. A. (1994): Estimating canopy biochemistry through imaging spectrometry. In: Hill, J. & J. Mègier [Hrsg.] (1994): *Imaging spectrometry - a tool for environmental observations*. Euro Courses, Remote Sensing, Vol. 4, S. 57-69
- WESSMAN, C. A., ABER, J. D., PETERSON, D. L. & J. M. MELILLO (1988): Foliar analysis using near infrared reflectance spectroscopy. In: *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 18, Nr. 1, S. 6-11
- WHITE, J. D., C. M. TROTTER, L. J. BROWN & N. SCOTT (2000): Nitrogen concentration in New Zealand vegetation foliage derived from laboratory and field spectrometry. In: *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, Nr. 12, S. 2525-2531
- WOLF, S. A. & S. D. WOOD (1997): Precision Farming: Environmental Legitimation, Commodification of Information and Industrial Coordination. In: *Rural sociology*, Vol. 62, Nr. 2, S. 180-206
- YODER, B. J.; PETTIGREW-CROSBY, R. E. (1995): Predicting Nitrogen and Chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400-2500 nm) at leaf and canopy scales. In: *Remote Sens. Environ.*, Vol. 53, S. 199-211
- ZADOKS, J. C., CHANG, T. T. & C. F. KONZAK (1974): Decimal code for growth stages of cereals. In: *Eucarpia Bulletin*, Vol. 7, S. 49-55



---

**STEFAN ERASMI**

geb. 28.02.1969 in Bremen

**Anschrift:**

Reinholdstr. 8  
37083 Göttingen

Telefon: +49-551/7704094

E-Mail: [stefan@erasmi.de](mailto:stefan@erasmi.de)

**Staatsangehörigkeit:**

deutsch

**Familienstand:**

ledig, 1 Kind

**Wissenschaftlicher Werdegang**

10/1998 – 09/2002

**Universität Göttingen**

Wissenschaftlicher Angestellter am Geographischen Institut, Abt. Kartographie und Fernerkundung, Dissertation

11/1997 – 09/1998

**Universität Göttingen / DLR**

Wissenschaftlicher Angestellter am Geographischen Institut, ESA/DLR-Projekt zur ERS1-Radarsatellitenbilddauswertung

10/1992 – 10/1997

**Studium der Geographie, Universität Göttingen**

Abschluss: Diplom (Gesamtnote: "sehr gut")  
Nebenfächer: Bodenkunde, Geologie, Öffentliches Recht  
Studienschwerpunkte: Fernerkundung und Geographische Informationssysteme

10/1991 – 09/1992

**Studium der Geologie, Universität Göttingen**

**Beruflicher Werdegang**

1988 – 1991

Ausbildung zum Schifffahrtskaufmann (Abschluss 01/1991)

**Schulbildung**

1979 – 1988

KGS Waldschule Schwanewede

1975 – 1979

Grundschule Heideschule Schwanewede