

Spektroradiometrische Ableitung biophysikalischer Vegetationsparameter von Weizenbeständen: Vergleichende Untersuchung verschiedener empirisch-statistischer Verfahren

THOMAS JARMER, BENJAMIN KÖTZ & CLEMENT ATZBERGER, Trier

Keywords: remote sensing, spectroscopy, leaf area index, chlorophyll content, precision farming

Zusammenfassung: Fernerkundung hat sich als sehr wertvoll zur Überwachung von Pflanzenbeständen erwiesen. Räumlich kontinuierlich abgeleitete Bestandsparameter können beispielsweise im Konzept des „precision farming“ als Grundlage für agronomische Entscheidungen dienen. Dabei ist jedoch meist ungeklärt, welcher methodische Ansatz am geeignetsten ist. Um eine Hilfestellung bei der Auswahl der geeignetsten Schätzmethoden zu liefern, wurden in dieser Arbeit verschiedene empirisch-statistische Methoden zur spektroradiometrischen Bestimmung von Vegetationsparametern aus spektral hoch aufgelösten Daten miteinander verglichen. Dabei wurden sowohl Reflexionsspektren als auch deren 1. Ableitung einbezogen. Untersucht wurden unter anderem Inflexionspunktverschiebungen, normalisierte Differenzen, univariate Regressionen sowie die Partial Least Square Regression. Der für diese Analysen im Gelände akquirierte Datensatz umfaßt über den gesamten Phänologiezyklus die Dynamik der Vegetationsparameter und der Bestandssignatur von 4 Weizenbeständen. Die Kreuzvalidierten Ergebnisse zeigen, dass die Zielgrößen Blattflächenindex (LAI), Blattchlorophyll- (Cab) und Bestandschlorophyllgehalt (Cab x LAI) mit den vier verwendeten Ansätzen zuverlässig bestimmt werden können. Unter den analysierten empirisch-statistischen Methoden ergab die Partial Least Square Regression (PLS) unter Verwendung der Ableitungsspektren die stabilsten Ergebnisse (kreuzvalidiertes r_{cv}^2 zwischen 0.8 und 0.9). Relative $RMSE_{cv}$ lagen bei dieser Methode je nach Zielgröße zwischen 12,8 und 14,1 %.

Summary: *Spektroradiometric determination of wheat canopy biophysical variables: Comparison of several empirical-statistical methods.* Remote sensing has been proven to be a valuable tool for monitoring vegetation surfaces. Canopy parameters can be derived from spatially continuous remote sensing data providing for example information relevant for crop management within the precision farming concept. The objective of this study is to compare the performance of several empirical-statistical methods to derive vegetation parameters from hyperspectral data. We analyzed shifts in the inflection point, normalized differences, univariate linear regressions and partial least square regressions with reflectance spectra and first derivatives as input variables. A data set has been acquired, comprising top of canopy reflectances and the corresponding canopy parameters of four wheat canopies over the full phenological crop cycle. The assessment of the different approaches shows reliable retrieval performances for the leaf area index (LAI), leaf chlorophyll content (Cab) and canopy chlorophyll content (Cab x LAI). The results of the Partial Least Square Regression (PLS) were nevertheless the most stable with cross-validated r_{cv}^2 between 0.8 and 0.9. Percent $RMSE_{cv}$ were for this method in the range between 12,8 and 14,1 %.

1 Einführung

„Precision Farming“ ist ein relativ neues Konzept innerhalb der Agrarwirtschaft, das die lokale Variabilität innerhalb eines Vegetationsbestandes bei der Bewirtschaftung von Agrarflächen berücksichtigt. Durch die räumlich differenzierte Aufbringung von Dünger- und Pflanzenschutzmitteln ist es möglich, den wirtschaftlich optimalen Ertrag zu erzielen und gleichzeitig die Belastung der Natur zu minimieren (BRYSON et al. 2000, DUTHILL 1999, MORAN et al. 1997, MORAN 2000, POILVÉ 2002).

Vitalität und Produktivität einer Pflanze werden hauptsächlich von ihrer Photosynthese und Evapotranspiration bestimmt. Beide Prozesse sind direkt abhängig von der vorhandenen aktiven Blattfläche und dem Chlorophyllgehalt im Blatt. Sowohl strukturelle Bestandeseigenschaften wie der Blattflächenindex (LAI), als auch der Blattchlorophyllgehalt (Cab) können aus optischen Fernerkundungsdaten in hoher räumlicher Auflösung bestimmt werden, da beide Vegetationsgrößen die spektrale Signatur des Vegetationsbestandes bestimmen (u. a. BARET et al. 2000).

Relativ früh wurden empirische Schätzverfahren auf der Grundlage spektraler Indizes entwickelt (z. B. TUCKER 1980). Diese meist auf der Rot- und nIR-Reflexion basierenden Indizes sind auch heute noch weit verbreitet und werden für operationelle Vegetationsbeobachtungen eingesetzt (u. a. DAUGHTRY 2000). Durch die zunehmende Verfügbarkeit von Hyperspektraldaten stehen für die Auswertung neben den klassischen Vegetationsindizes jedoch noch weitere empirisch-statistische Schätzverfahren zur Verfügung, von denen einige wichtige im Rahmen dieser Geländestudie vergleichend untersucht werden sollen. Auf die Möglichkeiten und Grenzen von physikalisch basierten Reflexionsmodellen zur Bestimmung biophysikalischer Vegetationsparameter kann hier aus Platzgründen nicht eingegangen werden. Siehe dazu auch ATZBERGER (2003; dieses Heft).

2 Datengrundlage

Vier Weizenbestände wurden im Jahr 2000 über den gesamten Phänologiezyklus spektrometrisch und hinsichtlich ihrer biophysikalischen Eigenschaften erfasst (Abb. 1). Die vier Bestände (B1a, B1b, B2a und B2b) liegen im Bitburger Gutland, zirka 20 km nördlich von Trier. In allen Beständen wurden jeweils drei 40 cm × 40 cm große Plots an vier wolkenfreien Beobachtungstagen innerhalb der Vegetationsperiode vermessen (Day of Year: 115, 129, 160, 172).

Die spektralen Messungen wurden mit einem tragbaren Spektrometrisch (ASD FieldSpec II) in einer Höhe von 1,5 m direkt über jedem einzelnen Plot durchgeführt und durch eine Referenzpanelmessung in absolute Reflexionswerte umgerechnet. Das Instrument misst dabei die vom Vegetationsbestand reflektierte Strahlung im Wellenlängenbereich 350–2500 nm mit einer spektralen Auflösung von 3–10 nm. Auf Grund hoher Rauschanteile wurden die Messungen unter 420 und über 2400 nm eliminiert. Ebenfalls eliminiert wurden die Reflexionswerte in den Wasserdampfbanden der Atmosphäre (1,34–1,45 µm, 1,75–1,97 µm). Um die Rauscheffekte im Hinblick auf die Bildung von Ableitungsspektren zu minimieren, wurden die Spektren unter Verwendung des Savitzky-Golay-Algorithmus gefiltert (SAVITZKY & GOLAY 1964). Bei diesem Filterverfahren gleitet ein (hier 31 nm breites) „Fenster“ über das zu glättende Spektrum, entnimmt die entsprechenden Reflexionswerte, fittet ein Polynom als Funktion der Wellenlänge durch die Originalwerte (hier Polynom 3. Grades) und schreibt den gefitteten Reflexionswert an die zentrale Stelle des gleitenden Fensters zurück. Die so geglätteten Reflexionsspektren und ihre Ableitungsspektren 1. Ordnung wurden für die anschließende Auswertung verwendet. Eine weitere Datenvorbehandlung der Reflexionsmessungen erfolgte nicht.

Zur Bestimmung des grünen Blattflächenindex (LAI) wurden anschließend die Pflanzen von den einzelnen Plots abgeerntet und mit Hilfe des LICOR3100 ausplanimetriert. So war ein direkter Zusammenhang

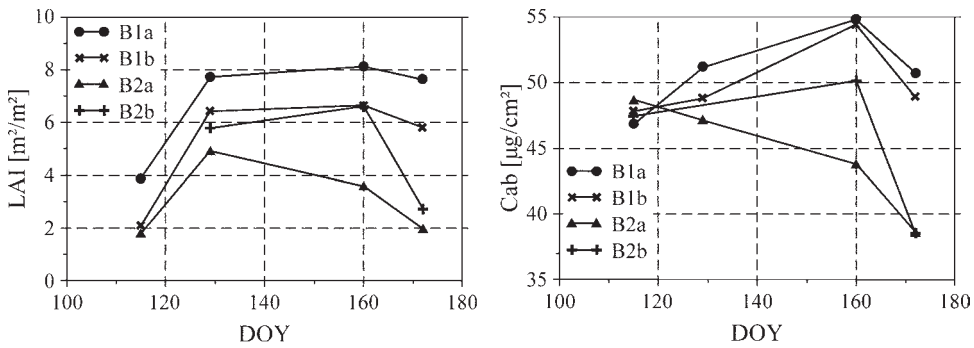


Abb. 1: Zeitlicher Verlauf von LAI (links) und Blattchlorophyllgehalt (rechts) der untersuchten Weizenbestände (aus Gründen der Deutlichkeit wurden die einzelnen Messwerte in der graphischen Darstellung verbunden).

Tab. 1: Grüner LAI, Blatt- und Bestandschlorophyllgehalte der untersuchten Weizenbestände.

	LAI [m ² /m ²]*					Cab [µg/cm ² Blattfläche]**					Cab x LAI [µg/cm ² Bodenfläche]***				
	B1a	B1b	B2a	B2b	ges.	B1a	B1b	B2a	B2b	ges.	B1a	B1b	B2a	B2b	ges.
n _{obs}	12	12	12	9	45	4	4	4	3	15	12	12	12	6	42
mean	6,8	5,3	3,1	5,0	5,0	51	50	45	45	48	352	265	139	218	247
stdv	2,1	2,2	1,7	1,9	2,4	3,3	3,0	4,5	6,1	4,7	117	117	80	125	134
max	8,7	8,7	6,9	7,2	8,7	55	55	49	50	55	475	474	325	345	475
min	2,6	1,4	1,0	2,3	1,0	47	48	39	39	39	122	67	38	87	38

* für den Bestand B2b konnten am DOY115 keine LAI-Messungen durchgeführt werden
 ** die Messungen der Blattchlorophyllgehalte des Bestandes B2b am DOY129 waren inkonsistent und wurden nicht berücksichtigt
 *** für den Bestand B2b ergab sich als Folge der fehlenden LAI- und Blattchlorophyllgehalte eine geringere Stichprobenanzahl

zwischen den Strukturmessungen und den Spektralmessungen gewährleistet.

Da eine nennenswerte Variation des Blattchlorophyllgehaltes innerhalb der einzelnen Bestände nicht zu erwarten war, wurden die Chlorophyllmessungen lediglich bestandsbezogen durchgeführt. Dazu wurden 20 zufällig über den Bestand verteilte Pflanzen selektiert und mit Hilfe eines optischen Chlorophyll-Meters (SPAD-502, Spectrum Technologies, Inc.) vermessen. Die SPAD-Werte wurden dann unter Verwendung einer empirischen Beziehung (MARKWELL et al. 1995) in absolute Blattchlorophyllgehalte konvertiert. Zusätzlich wurde über eine Multiplikation der beiden primären biophysikalischen Parameter LAI und Cab der Bestandschlorophyllgehalt (Cab x LAI) abgeleitet. Die Variabilität der erhobenen Bestandsparameter resultierte im Wesentlichen aus der Dynamik des Wachstumsverhaltens des Weizens, der lokalen Variabilität innerhalb eines Bestandes und der Anbauweise der jeweiligen Schläge (vgl. Tab. 1).

Die spektroradiometrische Schätzung der drei untersuchten abhängigen Vegetationsparameter (LAI, Cab, Cab x LAI) wurde mit verschiedenen empirisch-statistischen Verfahren durchgeführt:

3 Methoden

Die spektroradiometrische Schätzung der drei untersuchten abhängigen Vegetationsparameter (LAI, Cab, Cab x LAI) wurde mit verschiedenen empirisch-statistischen Verfahren durchgeführt:

- 1) Partial Least Square Regression (PLS) mit Reflexionsspektren bzw. 1. Ableitungen
- 2) Univariate lineare Regression mit Reflexionsspektren bzw. 1. Ableitungen
- 3) Normalisierte Differenzen mit Reflexionsspektren
- 4) Verschiebung des Inflexionspunktes in der sogenannten „red-edge“

Die Validierung der Modelle erfolgte über eine Kreuzvalidierung mit der leave-one-out-Schätzmethode. Die leave-one-out-Methode liefert im Vergleich zum Trainingsfehler eine nahezu unverzerrte Schätzung (OTTO 1997, FAHRMEIR 1996). Als Kriterien zur Beurteilung der kreuzvalidierten Modellergebnisse wurden das Bestimmtheitsmaß (r^2_{cv}), der Standardfehler ($RMSE_{cv}$) sowie der relative prozentuale Standardfehler ($PRMSE_{cv}$) verwendet.

Partial Least Square Regression (PLS)

Bei der Partial Least Square Regression (PLS) werden – wie auch bei der Hauptkomponentenregression – die Ausgangsdaten X in einem ersten Schritt in die Faktoren T transformiert. Im Gegensatz zur Hauptkomponentenregression wird allerdings für die Berechnung der Transformationsmatrix zusätzlich die Zielgröße Y verwendet (BÜNTING 1999). Bei diesem Verfahren wird die Richtung jeder PLS latenten Variable der X-Matrix derart verändert, daß zwischen dieser und den Vektoren der Y-Matrix die Kovarianzen maximiert werden (OTTO 1997). Das PLS-Verfahren berücksichtigt bei der Bestimmung der latenten Variablen somit neben einer möglichst großen Varianz in den Ausgangsdaten auch eine möglichst große Kovarianz zwischen Ausgangsdaten und Zielgrößen. Die Bestimmung der latenten Variablen ist dabei ein iterativer Prozess. Die Auswahl der Anzahl der latenten Variablen erfolgt anschließend anhand statistischer Kriterien. Die selektierten latenten Variablen fließen dann in eine multivariate lineare Regression ein.

Univariate lineare Regression

Die univariaten linearen Regressionskoeffizienten zwischen den Spektraldaten und den drei Vegetationsparametern wurden in 1 nm Schritten für alle Wellenlängen im Spektralbereich zwischen 420 und 2400 nm berechnet. Anschließend wurden die Beziehungen selektiert, die den engsten statistischen Zusammenhang zu den abhängigen Zielvariablen aufwiesen.

Normalisierte Differenzen

Die Berechnung aller theoretisch möglichen normalisierten Differenzen wäre bei einer Spektralaufösung von 1 nm zu rechenzeitintensiv. Daher wurden die Originalspektren zunächst auf eine Bandbreite von 10 nm resampled. Anschließend erfolgte die Berechnung der normalisierten Differenzen entsprechend:

$$nd = ((\lambda_1 - \lambda_2))/(\lambda_1 + \lambda_2) \quad (1)$$

Die so berechneten normalisierten Differenzen wurden anschließend einzeln mit den drei Vegetationsparametern in eine lineare Beziehung gesetzt. Es wurden wiederum die statistisch am signifikantesten Regressionen selektiert.

Inflexionspunktverschiebungen

Der Inflexionspunkt in der so genannten „red-edge“ (zwischen 700 und 750 nm) entspricht der Wellenlänge, bei der die erste Ableitung der Reflexionsspektren maximal ist:

$$\Delta\rho = ((\rho_1 - \rho_2))/(\lambda_1 - \lambda_2) \quad (2)$$

Die so berechneten Inflexionspunkte wurden anschließend mit den abhängigen Zielvariablen in eine lineare Beziehung gesetzt.

4 Ergebnisse

Blattflächenindex (LAI)

Der Blattflächenindex (LAI) ist eine wichtige Größe zur Charakterisierung der strukturellen Eigenschaften eines Bestandes und

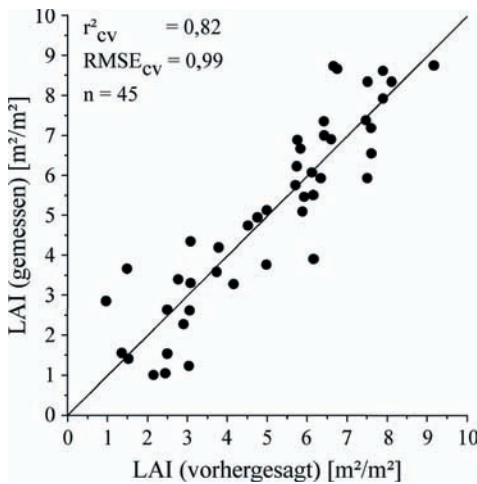


Abb. 2: Scatterplot der Kreuzvalidierung des PLS-Modells zur Vorhersage der LAI-Werte von Weizenproben (Ableitungsspektren 1. Ordnung).

variiert erheblich in Abhängigkeit von den Standortbedingungen und dem Phänologie-stadium des Bestandes (vgl. Tab.1). Die Schätzung der LAI-Werte aus den Reflexionsmessungen erfolgte auf der Basis der plotbezogenen Daten ($n_{obs} = 45$). Die Ergebnisse der Kreuzvalidierungen der LAI-Schätzungen mit PLS, normalisierter Diffe-

renz und Inflexionspunkt unterscheiden sich nur geringfügig ($r^2_{cv} = 0,81-0,83$; $RMSE_{cv} = 0,97-1,01$ (Abb. 2 u. Tab. 2). Während die Schätzung des LAI durch eine univariate Regression auf Basis der Ableitungsspektren noch ein gutes Resultat zulässt ($r_{cv} = 0,75$; $RMSE_{cv} = 1,16$), erlaubt das gleiche Verfahren bei den Reflexionsspektren keine ausreichend genaue Prognose des LAI ($r_{cv} = 0,48$; $RMSE_{cv} = 1,69$).

Auffällig sind die vergleichsweise großen Abweichungen einzelner Proben im Wertebereich von LAI 2,5 bis 4,0. Diese Proben stammen alle von einem Standort am Oberhang des untersuchten Weizenschlages B2a. Möglicherweise weist dieser Standort eine abweichende Bodensignatur auf, die diese Unterschiede erklärt.

Blattchlorophyllgehalt (Cab)

Der Blattchlorophyllgehalt steht in einer engen Beziehung zum Stickstoffgehalt der Pflanze und kann daher als Vitalitäts-indikator fungieren (CURRAN 1989). Wie bereits erläutert, wurden die Chlorophyllgehalte lediglich bestandsbezogen ermittelt ($n_{obs} = 15$).

Die Vorhersage der Blattchlorophyllgehalte über die PLS liefert mit einem r^2_{cv} von

Tab. 2: Bestimmtheitsmaß r^2 , Standardfehler RMSE und prozentualer RMSE der Kreuzvalidierung für die verwendeten Verfahren zur Schätzung von Vegetationsparametern der untersuchten Weizenbestände aus Reflexionsmessungen.

Verfahren	LAI			Cab			Cab x LAI		
	r^2	RMSE (PRMSE)	sel. λ^*	r^2	RMSE (PRMSE)	sel. λ^*	r^2	RMSE (PRMSE)	sel. λ^*
PLS	ρ	0,81 1,01 (13,0)	4	0,74 2,31 (22,7)	5	0,79 59,2 (13,6)	4		
	ρ'	0,82 0,99 (12,8)	2	0,90 1,44 (14,1)	5	0,81 56,6 (13,0)	2		
Uni- vari- at	ρ	0,48 1,69 (21,8)	707	0,55 3,08 (30,3)	721	0,50 93,5 (21,4)	709		
	ρ'	0,75 1,16 (15,0)	758,5	0,75 2,26 (22,2)	688,5	0,72 69,4 (15,9)	757,5		
nd	0,83	0,97 (12,5)	865;765	0,71	2,46 (24,2)	565;504	0,82	55,7 (12,8)	834;765
Inflexions- punkt	0,83	0,98 (12,6)	–	0,54	3,12 (30,6)	–	0,83	53,7 (12,3)	–

* bei der PLS ist an dieser Stelle die Anzahl der latenten Variablen angegeben

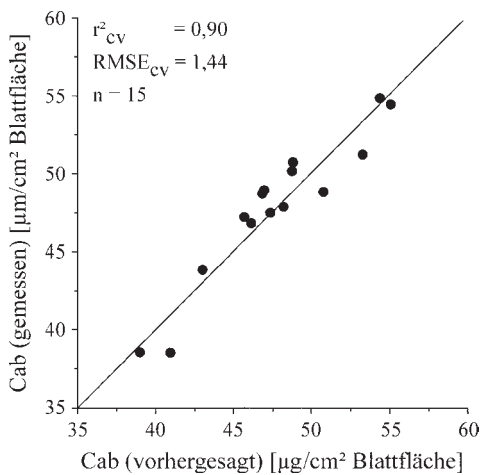


Abb. 3: Scatterplot der Kreuzvalidierung des PLS-Modells zur Vorhersage der Blattchlorophyllgehalte von Weizenproben aus integrierten Reflexionsmessungen (Ableitungsspektren 1. Ordnung).

0,90 ($RMSE_{cv} = 1,44$) für die Ableitungsspektren das mit Abstand beste Resultat (Abb. 3 u. Tab. 2). Dieses gute Ergebnis ist auf die Vorverarbeitung der Spektren zurückzuführen, denn ein PLS-Modell basierend auf Reflexionsspektren erlaubt nur noch eine Schätzung mit einer Modellgüte von 0,74. Der gleiche Effekt der Vorverarbeitung ist auch für die univariate Regression feststellbar. Bei diesem Verfahren steigt die Güte der Schätzung durch die Vorverarbeitung auf ein r_{cv}^2 von 0,75 ($RMSE_{cv} = 2,26$) gegenüber einem r_{cv}^2 von 0,55 für die Reflexionsspektren ($RMSE_{cv} = 3,08$). Eine Vorhersage des Blattchlorophyllgehaltes über die normalisierte Differenz ergibt ein r_{cv}^2 von 0,71 ($RMSE_{cv} = 2,46$), wohingegen sich eine Schätzung über den Inflexionspunkt als nicht möglich erwies (vgl. Tab. 2).

Bestandschlorophyllgehalt (Cab x LAI)

Da die fernerkundlichen Sensoren die integrierte Reflexion des Gesamtbestandes erfassen und nicht das Reflexionsspektrum eines Einzelblattes, wurde auch untersucht, ob sich sinnvolle empirisch-statistische Modelle zwischen Bestandschlorophyllge-

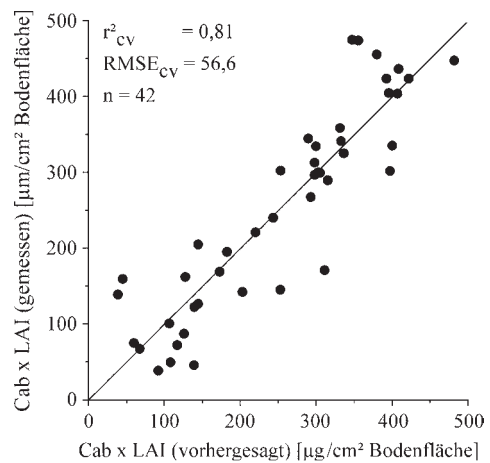


Abb. 4: Scatterplot der Kreuzvalidierung des PLS-Modells zur Vorhersage der Bestandschlorophyllgehalte von Weizenproben (Ableitungsspektren 1. Ordnung).

halten und Reflexionsmessungen etablieren lassen. Daher wurden aus den plotbezogenen LAI-Werten und den bestandsweise gemittelten Blattchlorophyllgehalten Bestandschlorophyllgehalte ($Cab \times LAI$) berechnet ($n_{obs} = 42$). Die erreichten Modellgüten sind denen für die Schätzung des LAI sehr ähnlich. Die Ergebnisse von PLS, normalisierter Differenz und Inflexionspunkt sind vergleichbar und liefern ein r_{cv}^2 zwischen 0,79 und 0,83 ($RMSE_{cv}$: 53,7–59,2). Wiederrum fallen die Proben des Weizenschlages B2a wegen überdurchschnittlicher Abweichungen auf (Abb. 4). Eine Prognose der Bestandschlorophyllgehalte über eine univariate Regression ergibt für die abgeleiteten Spektren ein r_{cv}^2 von 0,72 ($RMSE_{cv} = 69,4$). Eine univariate Regression unter Verwendung der Reflexionsspektren erwies sich auch zur Schätzung der Bestandschlorophyllgehalte als ungeeignet ($r_{cv}^2 = 0,50$; $RMSE_{cv} = 93,5$).

5 Diskussion und Ausblick

Für die untersuchten Weizenbestände war eine spektrometrische Ableitung biophysikalischer Größen mit empirisch-statistischen Verfahren grundsätzlich möglich. In

Abhängigkeit von der Zielgröße zeigten sich für die verschiedenen Verfahren jedoch erhebliche Unterschiede in den Schätzergebnissen. Die auf normalisierten Differenzen bzw. Inflexionspunkten beruhenden Verfahren ermöglichten eine fast identische Qualität der Vorhersage des LAI und der Bestandschlorophyllgehalte. Die Ergebnisse der univariaten Regressionen fielen im Vergleich dazu deutlich schlechter aus. Für die Schätzung der Blattchlorophyllgehalte erlaubten die univariaten Regressionen hingegen ähnliche Schätzgenauigkeiten wie die beiden anderen Verfahren.

Das einzige Verfahren, das für alle untersuchten Zielgrößen konstant gute Resultate lieferte, ist die Partial Least Square Regression, während sich mit den übrigen Methoden maximal zwei der untersuchten Größen mit einer vergleichbaren Genauigkeit vorhersagen ließen. Damit scheint die durch die PLS vorgenommene Datentransformation der Reflexionsspektren eine optimale Extraktion der vorhandenen Informationen und somit eine gute Schätzung aller Zielgrößen zu ermöglichen. Die Reflexionsmessungen von Vegetationsbeständen enthalten allerdings einen sehr hohen Anteil redundanter Information, so dass die benötigte Information teilweise bereits in ein oder zwei Wellenlängen enthalten ist (vgl. Tab. 2).

Die Ergebnisse der PLS und der univariaten Regressionen verdeutlichen außerdem den Vorteil einer Datenvorverarbeitung durch die Bildung von Ableitungsspektren 1. Ordnung. Für alle untersuchten Zielgrößen waren die Schätzergebnisse unter Verwendung von abgeleiteten Spektren besser als für die Originalspektren.

Die vorliegende Untersuchung hat auch gezeigt, dass der sichtbare Wellenlängenbereich (ab ca. 500 nm) und das nIR die wesentlichen Spektralinformationen für die Erfassung biophysikalischer Größen von Weizenbeständen beinhalten (vgl. Tab. 2; selektierte Wellenlängen). In diesen Spektralbereichen ist daher eine sehr hohe spektrale Auflösung existenziell, die eine Berechnung geeigneter spektraler Parameter wie Inflexionspunkt oder normalisierter Differenz in hoher spektraler Auflösung erlaubt. Die

außerhalb dieses Wellenlängenbereiches erfassten Spektralinformationen scheinen dagegen für die Erfassung der untersuchten Vegetationsgrößen nur von untergeordneter Bedeutung zu sein.

In einem nächsten Schritt soll untersucht werden, ob sich durch die schrittweise Multiple Regression bzw. den Einsatz künstlicher neuronaler Netze verbesserte Schätzgenauigkeiten erreichen lassen. In diesem Zusammenhang ist dann auch zu untersuchen, welche Ergebnisse sich mit Hilfe physikalisch basierter Reflexionsmodelle ergeben.

Danksagung

Diese Arbeiten wurden vom Forschungsfonds der Universität Trier sowie aus Mitteln des Kapitels 1512 finanziell gefördert. Für die gewährte Unterstützung bedanken sich die Autoren nachdrücklich. Die Autoren danken ebenfalls dem Maschinenring der Region Trier für die Hilfe bei der Auswahl geeigneter Flächen. Den an der Studie beteiligten Landwirten wird für ihre Bereitschaft gedankt, uns Zutritt zu ihren Schlägen zu gewähren. Darüber hinaus gilt unser besonderer Dank den Herren JAN KRAUSE, ANDREAS MARX und SEBASTIAN MADER für die geleisteten Gelände- und Laborarbeiten.

Literatur

- ATZBERGER, C., 2003: Möglichkeiten und Grenzen der fernerkundlichen Bestimmung biophysikalischer Vegetationsparameter mittels physikalisch basierter Reflexionsmodelle. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, 2003 (1): 51–61 (dieses Heft).
- BARET, F., WEISS, M., TROUFLEAU, D., PREVOT, L. & COMBAL, B., 2000: Maximum information exploitation for canopy characterisation by remote sensing. – Aspects of Applied Biology, 60 – Remote sensing in agriculture: 71–82.
- BRYSON, R. J., CLARKE J. H. & CLARK, W. S., 2000: The role of remote sensing technologies in UK arable production. – Aspects of Applied Biology, 60 – Remote sensing in agriculture: 61–70.
- BÜNTING, U. H., 1999: Auswertemethoden für die zeitaufgelöste Fluoreszenzspektroskopie. –

- Göttingen (<http://webdoc.gwdg.de/diss/1999/buenting>).
- CURRAN, P.J., 1989: Remote Sensing of Foliar Chemistry. – *Remote Sensing of Environment*, **30**: 271–278.
- DAUGHTRY, C.S.T., WALTHALL, C.L., KIM, M.S., BROWN DE COLSTOUN, E. & MCMURTREY, J.E., 2000: Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. – *Remote Sensing of Environment*, **74**: 229–239.
- DUTHIL, P., STRANG, M., NORMAN, K., BLONDLOT, A., GATE, P., BARET, F., FOURTY, T., BAGHDADI, N., GARCIA SANCHEZ, P., ALARCON, S., KERDILES, H., GILL, G., LEMOINE, G., DESCHAUX, V., PINET, P., POILVE, H., FOURTY, T. & POLVERINI, U., 1999: PAAGE: Pilot Project for Agriculture and Agri-Environment, Final report.
- FAHRMEIR, L. (Hrsg.), 1996: *Multivariate statistische Verfahren*. – 902 S., Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- MARKWELL, J., OSTERMAN, J.C. & MITCHELL, J.L., 1995: Calibration of Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. – *Photosynthetic Research*, **46**: 467–472.
- MORAN, S., VIDAL, A., TROUFLEAU, D., QI, J., CLARKE, T.R., PINTER, P.J., MITCHELL, T.A., INOUE, Y. & NEALE, C.M.U., 1997: Combining multifrequency microwave and optical data for crop management. – *Remote Sensing of Environment*, **61**: 96–109.
- MORAN, S., 2000: New imaging sensor technologies suitable for agricultural management. – *Aspects of Applied Biology*, **60** – Remote sensing in agriculture: 1–10.
- OTTO, M., 1997: *Chemometrie. Statistik und Computereinsatz in der Analytik*. – 355 S., Weinheim.
- POILVÉ, H., 2002: CROMA: Crop Reflectance Operational Models for Agriculture, Final report, EC research project EVG1-CT-2000-00027.
- SAVITZKY, A. & GOLAY, M.J.E., 1964: Smoothing and differentiation of data by simplified least square procedure. – *Analytical chemistry*, **36**: 1627–1638.
- TUCKER, C.J., HOLBEN, B.N., ELGIN, J.E. & MCMURTEY, J.E., 1980: The relationship of spectral data to grain yield variation. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **46**: 657–666.

Anschriften der Autoren:

Dipl.-Geogr. THOMAS JARMER, Universität Trier, Abt. Fernerkundung, Behringstrasse, D-54286 Trier, Tel.: +49-651-201-4605, Fax: +49-651-201-3815, e-mail: jarmer@uni-trier.de

Dipl.-Umw. BENJAMIN KÖTZ, Universität Zürich, Remote Sensing Laboratories, CH-8057 Zürich, Tel.: +41-1-635-5251, Fax: +41 1 635 68 46, e-mail: bkoetz@geo.unizh.ch

Dr. rer. nat. CLEMENT ATZBERGER, Universität Trier, Abt. Fernerkundung, Behringstrasse, D-54286 Trier, Tel.: +49-651-201-4605, Fax: +49-651-201-3815, e-mail: atzberger@feut.de

Manuskript eingereicht: November 2002

Angenommen: November 2002