Reflexionsparameter aus dem optischen Spektralbereich zur Zustandsbeschreibung und Ertragsprognose von Zuckerrübenbeständen

K. DOCKTER[1] und W. KÜHBAUCH[1]

ZUSAMMENFASSUNG

An Zuckerrübenbeständen wurde das Reflexionsverhalten im optischen Spektralbereich (400-1100 nm) in Abhängigkeit von charakteristischen Bestandesmerkmalen (Blatt- und Rübenmasse, Blattfläche, Chlorophyllgehalt der Blätter) unter dem Einfluß unterschiedlicher Witterung und Stickstoffdüngung untersucht. Berechnet wurden die Normalisierte Differenz aus roter und nah infraroter Strahlung (NDVI) und die Wellenlängenposition des Hauptwendepunktes (HWP) im Rot-Infrarot-Anstieg. Sowohl der NDVI als auch der HWP sind eng mit der Masse bzw. Fläche und dem Chlorophyllgehalt der Blätter korreliert und signalisieren den Zustand und die Leistungsfähigkeit der Bestände, deren Entwicklung und Unterschiede somit aufgezeigt werden können. Hieraus kann auf den Ertrag an Rübenmasse geschlossen werden.

ABSTRACT

The reflectance of sugar beet plots, influenced by different weather conditions and levels of nitrogen fertilization, were measured several times during vegetation period. Simultaneously, plants were analyzed for characteristic parameters. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the main inflection point (HWP) of the red edge were calculated. NDVI and HWP were shown to be sensitive to leaf biomass, area and content of chlorophyll and represent the status and potential productivity of a sugar beet crop. This information can be used for estimating the yield of beet mass.

EINLEITUNG

Fernerkundungsdaten werden zunehmend als Informationsquelle zur großräumigen Inventur des landwirtschaftlich genutzten Areals, Zustandsbeschreibung und Ertragsprognose der Pflanzenbestände nachgefragt; dies zur Erstellung von Agrarstatistiken, Planung und Lenkung des Agrarmarktes sowie zur Erfassung der Intensität und Umweltverträglichkeit der Landnutzung.

Zur Zeit können die von Satelliten und Flugzeugen aufgenommenen Signaturen nur zum Teil ausgewertet werden. Dies hängt zum einen damit zusammen, daß die kausalen Beziehungen zwischen der Rückstreucharakteristik verschiedener Pflanzenbestände und ihren stofflichen und morphologischen Kenngrößen nicht ausreichend er-

[1] Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau der Universität Bonn
Katzenburgweg 5, 5300 Bonn 1

forscht sind; zum anderen sind die verfügbaren Sensorsysteme oftnicht den Bedürfnissen der landwirtschaftlichen Fernerkundung angepaßt, da eine umfassende Definition der für landwirtschaftliche Fragestellungen nutzbaren Spektralbereiche und deren spektralen Auflösung bisher nicht erfolgte.

Über das Reflexionsverhalten von Zuckerrübenbeständen liegen nur wenige Untersuchungen vor. Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, unterschiedliche Reflexionsparameter aus dem optischen Spektralbereich auf ihre Aussagekraft bezüglich Zustand und Ertragsaussicht von Zuckerrübenbeständen hin zu untersuchen.

Im Hinblick hierauf wurden Zuckerrübenbestände unter dem Einfluß unterschiedlicher Witterung und Stickstoffdüngung beobachtet. Wasserversorgung und Intensität der Stickstoffdüngung stellen wichtige Einflußfaktoren auf das Zuckerrübenwachstum und die Ertragsbildung dar. Da die Zuckerrübenpflanzen eine erhebliche Menge an Frischmasse/Fläche produzieren, ist der Wasserbedarf in der gesamten Wachstumszeit, besonders aber in der Hauptwachstumsphase während der Ausbildung der Rüben (Stadium C: Bestandesschluß bis Ernte, WINNER 1974), sehr hoch. Stickstoff wird von den Zuckerrübenpflanzen zum Aufbau des Blattapparates, während der Hauptwachstumsphase hauptsächlich zur Produktion des Rübenkörpers verwendet. Generell wird die Leistungsfähigkeit der Pflanzen durch Stickstoff positiv beeinflußt.

MATERIAL UND METHODEN

Auf dem Versuchsgut 'Dikopshof' des Instituts für Pflanzenbau wurden in den Jahren 1986 und 1987 in einem Feldversuch Zuckerrüben angebaut und in unterschiedlicher Intensität mit Stickstoff gedüngt (N1: 120 kg N/ha, N2: 200 kg N/ha). An 8 (1986) bzw. 6 (1987) Terminen in der Hauptwachstumsphase wurde in einer Höhe von ca. 8 m über den Pflanzenbeständen die Lichtreflexion mit Hilfe eines Zweikanal-Spektroreflektometers im Wellenlängenbereich von 400-1100 nm mit einer spektralen Auflösung von 2-4 nm registriert. Parallel zu den Reflexionsmessungen wurden die Blatt- und Rübenmasse (dt/ha), der Blattflächenindex (BFI) und der Gehalt an Chlorophyll a+b in den Blättern (g/100g Trockensubstanz) bestimmt. Hierzu wurde der Blattapparat der Zuckerrübenpflanzen in fünf aufeinanderfolgende Etagen bzw. Fraktionen unterteilt. Die Kriterien der Fraktionierung waren die Position der Blätter im Blattapparat und das äußere Erscheinungsbild in Abhängigkeit vom Blattalter. Fraktion 1 bildet die unterste, Fraktion 4 die oberste Blattlage. Die Blätter von Fraktion 5 stehen aufrecht im Innern des Blattapparates.

ERGEBNISSE

1. Normalisierte Differenz aus roter und infraroter Strahlung (NDVI)

In den Jahren 1986 und 1987 konnte der Einfluß unterschiedlicher Niederschlagsmengen auf Wachstum und Entwicklung von Zuckerrübenbeständen und deren Reflexionsvermögen beobachtet werden.

Mit 788,9 mm lag der Jahresniederschlag von 1987 um 199,3 mm über dem von 1986. Von Mitte Juni bis Mitte August 1986 fielen nur vereinzelt Niederschläge. Im Gegensatz dazu war die Verteilung der Niederschläge in der Vegetationszeit im Jahr 1987 gleichmäßig.

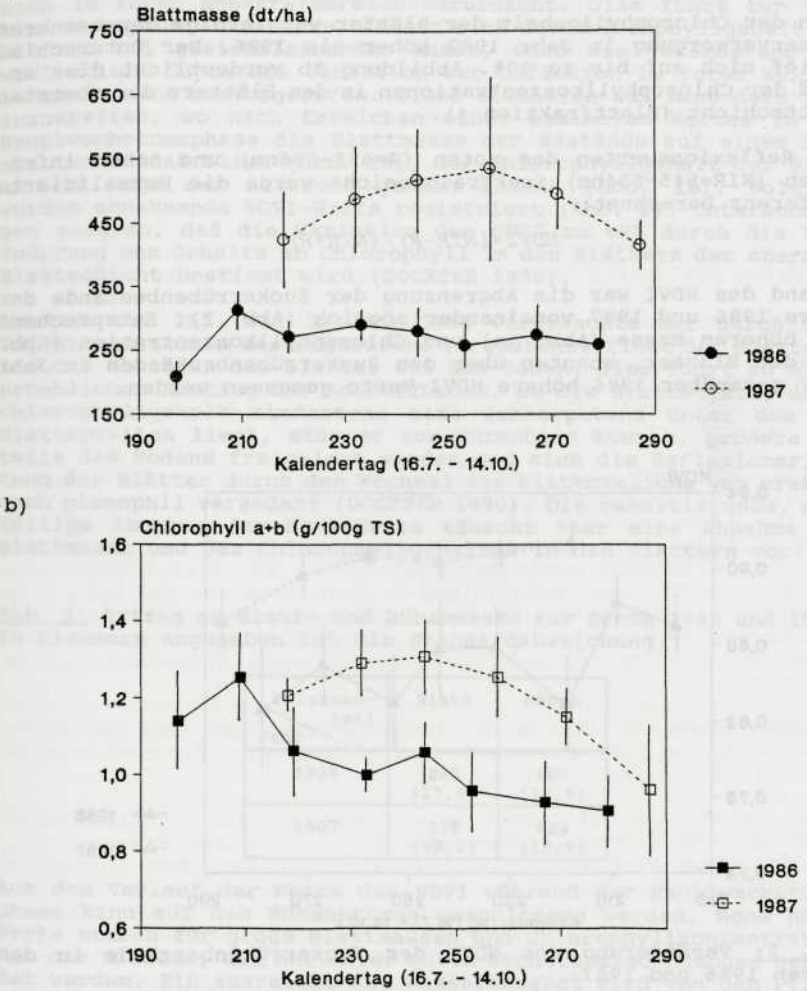

Abb. 1: Entwicklung der a) Blattmasse (dt/ha) und b) Chlorophyllgehalte der Blätter (g/100g Trockensubstanz) der Zuckerrübenbestände in den Jahren 1986 und 1987

Das Massenwachstum der Blätter wurde durch das hohe Wasserangebot im Jahr 1987 stark gefördert. Die Unterschiede zwischen der Blattmasse der in den Jahren 1986 und 1987 angebauten Zuckerrübenbestände in der jeweiligen Hauptwachstumsphase lagen zwischen 150 und 250 dt/ha, die 1987 mehr produziert wurden (Abb. 1a).

Abbildung 1 und die folgenden geben die Mittelwerte und Standardabweichungen der Werte von je 4 Beständen wieder.

Auch der Chlorophyllgehalt der Blätter war infolge der besseren Wasserversorgung im Jahr 1987 höher als 1986. Der Unterschied belief sich auf bis zu 30%. Abbildung 1b verdeutlicht dies anhand der Chlorophyllkonzentrationen in den Blättern der obersten Blattschicht (Blattfraktion 4).

Aus Reflexionswerten des roten (R=678-686nm) und nahen infraroten (NIR=845-854nm) Spektralbereichs wurde die Normalisierte Differenz berechnet:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

Anhand des NDVI war die Abgrenzung der Zuckerrübenbestände der Jahre 1986 und 1987 voneinander möglich (Abb. 2). Entsprechend der höheren Masse (Abb. 1a) und Chlorophyllkonzentration (Abb. 1b) der Blätter, konnten über den Zuckerrübenbeständen im Jahr 1987 gegenüber 1986 höhere NDVI-Werte gemessen werden.

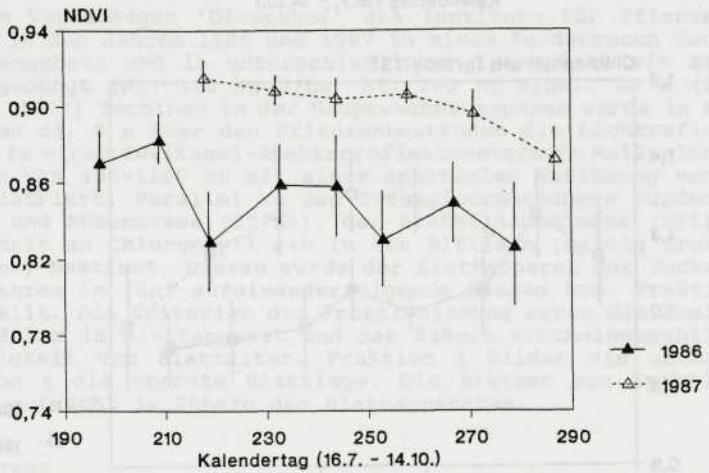

Abb. 2: Veränderung des NDVI der Zuckerrübenbestände in den Jahren 1986 und 1987

Neben der Unterscheidung der Bestände nach Witterungseinfluß in Abhängigkeit vom Anbaujahr, kann mit Hilfe des NDVI die Veränderung der Masse und des Chlorophyllgehalts der Blätter innerhalb der Vegetationsperiode eines Jahres nachvollzogen werden (vgl.

Abb. 1b und Abb. 2). Abnehmende Werte signalisieren die gegen Ende der Hauptwachstumsphase fortschreitende Alterung der Bestände, die mit dem Abbau von Blattmasse und Chlorophyll in den Blättern einhergeht.

Eine Abnahme an Blattmasse in den Zuckerrübenbeständen bewirkt die Verringerung der Reflexion im NIR, während eine niedrigere Chlorophyllkonzentration in den Blättern die Zunahme der Reflexion im roten Spektralbereich verursacht. Dies führt zur Verkleinerung der NDVI-Werte. Ändert sich der Chlorophyllgehalt der Blätter bei gleichbleibender Masse, wird die Veränderung von NDVI allein durch die Variation der Reflexion im roten Wellenlängenbereich hervorgerufen. Diese Situation war besonders 1986 anzutreffen, wo nach Erreichen eines maximalen Wertes in der Hauptwachstumsphase die Blattmasse der Bestände auf einem konstanten Niveau blieb (Abb. 1a), der Chlorophyllgehalt der Blätter im Zuge der Alterung jedoch absank (Abb. 1b). Folglich wurden abnehmende NDVI-Werte registriert (Abb. 2). Untersuchungen zeigten, daß die Variation des NDVI zu 69% durch die Veränderung des Gehalts an Chlorophyll in den Blättern der obersten Blattschicht bestimmt wird (DOCKTER 1990).

Am 219. und 253. Tag im Jahr 1986 verursachte der durch hohe Tagestemperaturen hervorgerufene Turgeszenzverlust der Blattzellen das Absinken der Blätter auf den Boden. Dies führt zu einem erheblichen Anstieg der Rotreflexion, da die Blattstiele, deren Chlorophyllgehalt mindestens eine Zehnerpotenz unter dem der Blattspreiten liegt, stärker zum Vorschein kommen, größere Anteile des Bodens freigelegt werden und sich die Reflexionsrichtung der Blätter durch den Wechsel der Blattstellung von erektonach planophil verändert (DOCKTER 1990). Die resultierende, auffällige Abnahme der NDVI-Werte täuscht hier eine Abnahme der Blattmasse und des Chlorophyllgehaltes in den Blättern vor.

Tab. 1: Ertrag an Blatt- und Rübenmasse zur Ernte 1986 und 1987. In Klammern angegeben ist die Standardabweichung.

Pflanzenteil / Jahr	Blatt	Rüben
1986	240 (27,4)	507 (28,5)
1987	379 (60,2)	624 (18,9)

Aus dem Verlauf der Werte des NDVI während der Hauptwachstumsphase kann auf den Rübenertrag geschlossen werden. Hohe NDVI-Werte stehen für große Blattmassen und Chlorophyllkonzentrationen der Blätter, die nur unter guten Wachstumsbedingungen gebildet werden. Ein ausreichendes Wasserangebot wird von den Pflanzen außer zum Aufbau des Blattapparates zur Massenbildung der Rübenkörper genutzt. Hohe NDVI-Werte während der Hauptwachstumsphase zeigen somit die Voraussetzungen an, unter denen hohe Frischmassenerträge der Rüben möglich sind. Dementsprechend lagen die Rübenerträge der Bestände des Jahres 1987 über denen von 1986 (Tab. 1).

2. Wellenlängenposition des Hauptwendepunktes im Rot-Infrarot-Anstieg (HWP)

Die Stickstoffdüngung wurde mit 120 bzw. 200 kg N/ha niedrig (N1) bzw. hoch (N2) bemessen.

Durch das hohe Stickstoffangebot (N2) wurde das Blattwachstum stark gefördert. Im Vergleich zu den Beständen mit geringer N-Versorgung konnten während des Beobachtungszeitraums um bis zu 1,4 größere Blattflächenindizes gemessen werden (DOCKTER 1990). Gleichzeitig stieg mit höherer Düngungsintensität der Chlorophyllgehalt in den Blättern um 20 bis 30% an.

Für weitere Untersuchungen wurden die Chlorophyllkonzentrationen der einzelnen Blattfraktionen mit den jeweiligen Blattflächenindizes gewichtet und zu einem Index (CBI) zusammengefaßt:

$$\sum_{x=1}^{5} CB = C_1 * B_1 + C_2 * B_2 + \ldots + C_5 * B_5$$

C = Chlorophyll; B = Blattflächenindex; 1-5 = Blattfraktionen.

In Abbildung 3 geben die oberen Kurven die Veränderung des CB-Index (CBI) im beobachteten Vegetationsabschnitt von Juli bis Oktober 1986 in Abhängigkeit von der Stickstoffdüngung wieder. Die hoch gedüngten wiesen im Vergleich zu den gering versorgten Beständen durchgehend höhere CB-Indizes auf, die zudem im Verlauf der Entwicklung weniger stark abnahmen.

Dem CB-Index (CBI) der Zuckerrübenbestände wurde in der weiteren Untersuchung die Wellenlängenposition des HWP gegenübergestellt. Aus dem Kurvenverlauf der Reflexionsspektren im Bereich des Rot(R)-Infrarot(IR)-Anstiegs zwischen 623 und 802 nm wurden die 1. und 2. Ableitung berechnet (DOCKTER et al. 1988). Der Punkt mit der höchsten Amplitude in der 1. Ableitung und dem Wert 0 in der 2. Ableitung entspricht dem **Hauptwendepunkt (HWP)** im R-IR-Anstieg der Reflexionssignaturen. Die Wellenlängenposition des HWP steht stellvertretend für die Lage des R-IR-Anstiegs im Spektrum.

Die Positionen des HWP in den Reflexionsspektren der Zuckerrübenbestände im Verlauf ihrer Entwicklung sind in den unteren Kurven in Abbildung 3 dargestellt.

Die Variation des CBI läßt sich mit der Veränderung der Wellenlänge des HWP nachvollziehen (die Kurven mit den offenen bzw. geschlossenen Symbolen geben jeweils CBI und HWP derselben Zuckerrübenbestände wieder). Die Zunahme des CBI in der Vegetationsperiode führt zu einer Verschiebung des HWP in den längerwelligen Bereich des Spektrums, die Abnahme zu einer Positionsänderung in Richtung kürzerer Wellenlängen. Hohe CBI-Werte, wie sie durch eine hohe Stickstoffdüngung (N2) erzielt werden, bedingen langwellige Positionen des HWP. Im Vergleich hierzu ist der HWP bei geringen Werten des CBI, die in den gering gedüngten Beständen (N1) aufgetreten, zu kürzeren Wellenlängen verschoben.

Die Kurvenverläufe des CBI und des HWP (Abb. 3) zeigen eine deutliche Übereinstimmung. Die Korrelation der Parameter ergab

Korrelationskoeffizienten von r=0,92 für N1 und r=0,94 für N2 (DOCKTER et al. 1988).

Es zeichnet sich somit die Möglichkeit ab, anhand der Verschiebung des HWP Unterschiede im Wachstumsverlauf von Zuckerrübenbeständen aufzuzeigen. In einem weiteren Schritt kann diese Information zur Abschätzung des Rübenmassenertrages herangezogen werden. Über die in den infraroten Wellenlängenbereich verschobenen Positionen des HWP kann auf hohe Werte des CBI und folglich auf hohe Massenerträge an Rüben geschlossen werden. Liegt der HWP im Verlauf der Entwicklung der Bestände im kurzwelligen Bereich des Spektrums, deutet dies auf eine geringe Leistungsfähigkeit der Pflanzen hin. Dementsprechend überstiegen die Rübenerträge der N2-Varianten mit 583 dt/ha die der N1-Varianten mit 566 dt/ha.

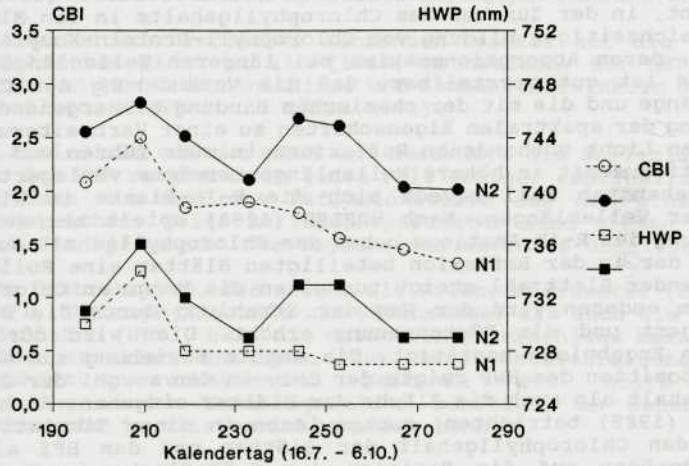

Abb. 3: Veränderung des CB-Index (CBI) und der Wellenlängenposition des Hauptwendepunktes (HWP) (nm) der Zuckerrübenbestände mit geringer (N1) und hoher (N2) Stickstoffdüngung im Jahr 1986

DISKUSSION

In der Literatur liegen nur wenige Arbeiten zur Zustandsbeschreibung und Ertragsschätzung von Zuckerrübenbeständen mit Hilfe des NDVI vor. An anderen Fruchtarten, z.B. an Weizen, wurde der NDVI ausführlich untersucht (u.a. TUCKER 1981, ASRAR 1984, GIOVACCHINI 1986).

DE WULF und GOSSENS (1986) schreiben über den Anstieg der NDVI-Werte mit zunehmender grüner Blattfläche in der Jugendphase von Zuckerrübenbeständen. Auch vom Bodendeckungsgrad zeigte sich der NDVI abhängig. Zwischen dem Zuckerertrag von Rübenbeständen und den über die Vegetationsperiode akkumulierten Werten des NDVI ergab sich eine lineare Beziehung, aus der jedoch die Schätzung

des Zuckerertrags des darauffolgenden Jahres nicht möglich war. Gute Witterungsbedingungen zum Ende der Vegetationsperiode hatten zu einer ungewöhnlich hohen Zuckereinlagerung der Rüben geführt, die über die spektrale Reflexion nicht erfaßt werden konnte.

Nach BARET et al. (1989) erlaubt der NDVI, die potentielle Produktivität eines Pflanzenbestandes mit hinreichender Genauigkeit zu schätzen. Eine Abstufung von Zuckerrübenbeständen nach ihrer relativen Ertragsfähigkeit ist, wie im eigenen Versuch gezeigt werden konnte, anhand des NDVI möglich.

Ein empfindlicheres Maß für den Zustand eines Zuckerrübenbestandes stellt der HWP dar, der eine exakte Beschreibung des Wachstumsverlaufs der Pflanzen ermöglicht.

Die Ursache für die Verschiebung des HWP bzw. R-IR-Anstiegs in Richtung längerwelliges Infrarot ist, wie COLLINS (1978) beschreibt, in der Zunahme des Chlorophyllgehalts in den Blättern und gleichzeitiger Bildung von Chlorophyll-Protein-Komplexen zu suchen, deren Absorptionsmaxima bei längeren Wellenlängen liegen. Es ist gut vorstellbar, daß die Veränderung der Chlorophyllmenge und die mit der chemischen Bindung einhergehende Veränderung der spektralen Eigenschaften zu einer Verbreiterung des im roten Licht vorhandenen Reflexionsminimums führen und der R-IR-Anstieg somit in höhere Wellenlängenbereiche verlagert wird. Im umgekehrten Fall bewegt sich die R-IR-Flanke in Richtung kürzerer Wellenlängen. Nach HORLER (1983) spielt bei der Verschiebung des R-IR-Anstiegs neben dem Chlorophyllgehalt auch die Anzahl der an der Reflexion beteiligten Blätter eine Rolle. Mit zunehmender Blattzahl steigt zum einen die Menge an Chlorophyll und zum anderen wird der Weg der Strahlung durch die Blätter verlängert und die Rückstreuung erhöht. Dies wird durch die eigenen Ergebnisse bestätigt. Die engste Beziehung zur Wellenlängenposition des HWP zeigte der CBI, in den sowohl der Chlorophyllgehalt als auch die Fläche der Blätter eingehen. Auch GUYOT et al. (1988) betrachten, nachgewiesen in einem Simulationsmodell, den Chlorophyllgehalt der Blätter und den BFI als die Einflußgrößen auf die Position der R-IR-Flanke im Spektrum. DEMETRIADES-SHAH und STEVEN (1988) konnten die Verschiebung des R-IR-Anstiegs in Reflexionsspektren von Zuckerrübenbeständen nicht ausreichend mit der Variation der Chlorophyllmenge pro m² Boden erklären. Erst an Reflexionssignaturen von einzelnen Blättern, d.h. unter Ausschaltung des Einflusses variierender Blattzahlen und -flächen, war die alleinige Abhängigkeit von Chlorophyllgehalt und Wellenlänge des HWP voneinander nachweisbar. CLEVERS und BÜKER (1991) berichten über den Einfluß des Chlorophyllgehalts und des BFI auf die Verschiebung des R-IR-Anstiegs in Reflexionssignaturen von Gerste und Grünland. Bestände mit unterschiedlich hoher Stickstoffdüngung können hiernach anhand der Position des HWP deutlich voneinander abgegrenzt werden.

Die Verwendung der Wellenlängenposition des HWP im R-IR-Anstieg als Parameter zur Zustandsbeschreibung von Pflanzenbeständen hat den Vorteil, daß eine weitgehende Unabhängigkeit von Störeinflüssen besteht. Vor allem zeigt sich der HWP unbeeinflußt durch die Bodenreflexion und unterschiedliche atmosphärische Bedingungen (GUYOT et al. 1988, CLEVERS und BÜKER 1991). Dies gilt nicht

für den NDVI, der sowohl in Abhängigkeit von der Bodenreflexion (BARET et al. 1989) als auch von atmosphärischen Kenngrößen (GUYOT et al. 1988) variiert.

Beide Reflexionsparameter, NDVI und HWP, reagieren auf Unterschiede in der Bestandesarchitektur (BARET et al. 1989, GUYOT et al. 1988, CLEVERS und BÜKER 1991). Nach CLEVERS und BÜKER (1991) nimmt der Einfluß der Blattstellung auf die Wellenlänge des HWP mit steigendem BFI zu. Bei einem BFI von 8 (Maximalwert des BFI in Zuckerrübenbeständen ca. 4) ist die maximale Differenz von 2,5 nm in der Wellenlängenposition des HWP zwischen einem erektophilen und planophilen Bestand erreicht. Unterschiede in der Blattstellung sind zwischen Zuckerrübenbeständen in der Regel wenig ausgeprägt. Eine extreme Veränderung der Pflanzenarchitektur tritt bei Zuckerrüben lediglich durch Turgeszenzverlust der Blätter bei hohen Temperaturen und Trockenheit auf. Die Auswirkungen auf den NDVI sind oben dargestellt. Es sollte vermieden werden, in dieser Situation spektrale Messungen durchzuführen.

Den Einfluß unterschiedlicher Sonnenzenitwinkel auf die Werte des NDVI konnten BARET et al. (1989) nachweisen. Der HWP wird nur bei großen Blattflächenindizes und Sonnenzenitwinkeln größer 50° beeinflußt (CLEVERS und BÜKER 1991).

Vegetationsindizes wie der NDVI und besonders die Wellenlängenposition des HWP reagieren in jedem Fall weniger empfindlich auf Störeinflüsse als absolute Reflexionswerte aus den einzelnen Spektralbereichen. Beide Reflexionsparameter sind diesen daher bezüglich der Wiedergabe des Vegetationszustandes überlegen.

Es bleibt festzuhalten, daß sowohl die Pflanzenparameter (Blattmasse, BFI, Chlorophyllgehalt und Rübenmasse) als auch die spektralen Meßdaten (NDVI, HWP) die relativen Unterschiede bekannter Zuckerrübenparzellen anzeigen. Zur Zustandsbeschreibung und Ertragsschätzung unbekannter Bestände mit Hilfe der Fernerkundung werden Trainingsfelder benötigt, an denen die Reflexionswerte jeweils geeicht werden können.

SCHLUßFOLGERUNG

Der NDVI verbindet Spektralbänder des roten und infraroten Wellenlängenbereichs, in denen vorwiegend der Pigmentgehalt der Blätter und die Blattmasse als für den Vitalitätszustand und die Leistungsfähigkeit eines Zuckerrübenbestandes wichtige Kriterien angesprochen werden. Der R-IR-Anstieg fungiert als Verbindungsglied zwischen dem roten und infraroten Spektralbereich und ist in seiner Wellenlängenposition (HWP) gleichermaßen von der Pigmentkonzentration in den Blättern und der Blattmasse abhängig.

Faktoren, die die Ausbildung des Blattapparates der Zuckerrübenpflanzen positiv beeinflussen, wie z.B. ein ausreichendes Wasserangebot und eine hohe Stickstoffdüngung, wirken in der Regel gleichzeitig fördern auf das Massenwachstum der Rübenkörper. Über die spektrale Erfassung der Phänologie der Blätter im Verlauf der Vegetationsperiode kann somit der Ertrag an Rübenmasse nach "hoch" und "gering" geschätzt werden.

Zur Schätzung der tatsächlichen Erträge ist die Einbindung der Reflexionsparameter in ein Ertragsmodell notwendig. Dieses sollte neben spektralen Werten Daten anderer Informationsebenen, wie solche über den Witterungsverlauf und den Boden sowie Daten über übliche Anbaupraktiken, enthalten. Zur Eichung der Reflexionsdaten sollten Trainingsflächen angelegt werden.

DANKSAGUNG

Das dieser Arbeit zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des BMFT unter dem Kennzeichen 01QS0947 gefördert.

LITERATURVERZEICHNIS

Asrar, G., M. Fuchs, E.T. Kanemasu und J.L. Hatfield, 1984: Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat. Agron. J. 76, 300-306.

Baret, F., G. Guyot und D.J. Major, 1989: Crop biomass evaluation using radiometric measurements. Photogrammetria (PRS) 43, 241-256.

Clevers, J.G.P.W. und C. Büker, 1991: High resolution spectroscopy in agriculture (EISAC '89). Report LUW/LMK/199101, Departement of Landsurveying and Remote Sensing, Agricultural University Wageningen, NL.

Dockter, K., 1990: Fernerkundung zur Zustandsbeschreibung von Zuckerrübenbeständen. Dissertation, Bonn.

Dockter, K. und W. Kühbauch, 1990: Fernerkundung der Entwicklung von Zuckerrübenbeständen in der Hauptwachstumsphase. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 3, 209-212.

Dockter, K., W. Kühbauch, F. Boochs, C. von Rüsten, U. Tempelmann und G. Kupfer, 1988: Die spektrale Reflexion von Zuckerrübenbeständen im sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich während des Wachstums. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 1, 55-57.

Giovacchini, A., 1986: An evaluation of different green vegetation indices for wheat yield forecasting. Int. Arch. Photogramm. and Remote Sensing 26 (7), 265-267.

Guyot, G., F. Baret und D.J. Major, 1988: High spectral resolution: determination of spectral shifts between the red and near infrared. Int. Arch. of Photogramm. and Remote Sensing 27 (11), VII 750-760.

Tucker, C.J., B.N. Holben, J.E. Elgin jr. und J.E. McMurtrey III, 1981: Remote Sensing of Total Dry-Matter Accumulation in Winter Wheat. Remote Sensing Environ. 11, 171-189.

Winner, C., 1974: Die Jugendentwicklung der Zuckerrübe in ihrer Bedeutung für das spätere Wachstum und den Ertrag. Zucker 27 (10), 517-527.

Wulf, R.R. de und R.E. Gossens, 1986: Sugar beet biomass estimation using spectral data derived from colour infrared slides. Int. Arch. of Photogramm. and Remote Sensing 26 (7), 239-243.