

## Erzeugung von Bilddaten aus bodengestützten hyperspektralen Feldmessungen

HOLGER LILIENTHAL<sup>1</sup>, NICOLE RICHTER<sup>1</sup>, BASTIAN SIEGMANN<sup>2</sup>, THOMAS JARMER<sup>2</sup>,  
THOMAS SELIGE<sup>3</sup> & BERNHARD HÖFLE<sup>4</sup>

*Zusammenfassung: Spektrale Geländemesskampagnen sind meist an Strahlungswetterlagen gebunden. Außerdem nimmt die Erhebung von terrestrischen Spektraldaten und den dazugehörigen Referenzparametern sehr viel Zeit in Anspruch, so dass meist nur kleine Flächen oder ausgewählte Plots erfasst werden können. Das mobile Penta-Spek System, eine Entwicklung des Julius Kühn-Instituts, erfasst Spektraldaten nahezu witterungsunabhängig und durch Kopplung mit einem GPS zudem hochgenau geokodiert. Das Spektralsystem besteht aus sechs Spektrometern. Ein Spektrometer dient der permanenten Messung des einfallenden Sonnenlichtes, die anderen fünf werden zur Vermessung des Bestandes eingesetzt. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die generierten Bilddaten des Penta-Spek Systems eine gute Ergänzung zu anderen bildgebenden hyperspektralen Verfahren darstellen können. Durch seine Witterungsunabhängigkeit kann das System Spektraldaten zudem mit hoher Flexibilität bereitstellen, was gerade für landwirtschaftliche Fragestellungen von hoher Bedeutung ist.*

### 1 Einleitung

Spektrale Sensortechnik hält immer mehr Einzug in die praktische Landwirtschaft. Bisher kommen hauptsächlich Systeme (z.B. Yara N-Sensor<sup>®</sup>, GreenSeeker<sup>®</sup>, Crop Circle<sup>™</sup>) zum Einsatz, die auf Basis von Spektralmessungen Indices ableiten, um die Düngermenge teilschlagsspezifisch anzupassen. Die dabei verwendeten Vegetationsindices, wie zum Beispiel der NDVI, können aber ab einem Blattflächenindex (LAI) von 3 zur Sättigung führen und erfassen dann keine Bestandesunterschiede mehr (BARET & GUYOT, 1991). Allen verfügbaren terrestrischen Systemen ist gemein, dass sie nicht direkt einen Vegetationsparameter (z.B. Biomasse oder LAI) messen, sondern indirekt über einen spektralen Index eine Beziehung zum Nährstoffbedarf ableiten. Wie das genau geschieht ist oft Firmengeheimnis und ist damit eine Blackbox. Ein weiteres Problem ist der räumliche Meßbereich, indem die Spektraldaten erfasst werden.

1) Holger Lilienthal & Nicole Richter, Julius Kühn Institut, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig;

E-Mail: [holger.lilienthal@jki.bund.de](mailto:holger.lilienthal@jki.bund.de); [nicole.richter@jki.bund.de](mailto:nicole.richter@jki.bund.de)

2) Bastian Siegmann & Thomas Jarmer, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück, Barbarastrasse 22b, 49076 Osnabrück;

E-Mail: [bsiegmann@igf.uni-osnabrueck.de](mailto:bsiegmann@igf.uni-osnabrueck.de); [tjarmer@igf.uni-osnabrueck.de](mailto:tjarmer@igf.uni-osnabrueck.de)

3) Thomas Selige, TU München, Lehrstuhl für Bodenökologie, Ingolstädter Landstrasse 1, 85764 Neuherberg; E-Mail: [selige@wzw.tum.de](mailto:selige@wzw.tum.de)

4) Bernhard Höfle, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Geographisches Institut, Berliner Straße 48, 69120 Heidelberg; E-Mail: [hoefle@uni-heidelberg.de](mailto:hoefle@uni-heidelberg.de)

Die Messung erfolgt meist nur einige Meter rechts und links der Fahrgasse. Da sich aber die Arbeitsbreiten in der Landtechnik stetig verbreitern (derzeit 24 – max. 54 m), kann die räumliche Variabilität des Vegetationsbestandes nicht hinreichend erfasst werden. Die Entwicklung neuer kostengünstiger hyperspektraler Sensoren bietet jedoch die Möglichkeit, Boden- und Pflanzenparameter direkt im Feld nicht-destruktiv zu bestimmen. Damit stehen völlig neue Möglichkeiten zur Verfügung, die den Schritt von der qualitativen hin zur quantitativen Bestimmung von Vegetationsparametern erlauben.

Die praktische Landwirtschaft stellt sehr hohe Anforderungen an die zeitliche Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten, da sich einerseits die Spektralsignatur aufgrund der phänologischen Entwicklung ständig verändert und andererseits die Reaktionsmöglichkeit des Landwirtes auf wenige Termine in der Vegetationsperiode beschränkt ist. Die klassische satelliten- und flugzeuggestützte Fernerkundung kann aufgrund der langen Vorverarbeitungszeiten und der unsicheren Datenverfügbarkeit nicht operationell in der praktischen Bestandesführung eingesetzt werden. Daher entwickelt das Julius Kühn Institut (JKI) derzeit das terrestrische Penta-Spek System, mit dem räumlich und spektral hochaufgelöste Reflexionsdaten im Feld gewonnen werden können. Ein wesentlicher Vorteil des Systems sind die geringen Vorverarbeitungszeiten, da aufwendige geometrische und atmosphärische Korrekturen entfallen können. Am Beispiel des LAI wird das Potenzial des Penta-Spek Systems den Daten des hyperspektralen Sensors AISA-DUAL (Airborne Imaging Spectrometer for Application) gegenübergestellt. Der LAI ist ein interessanter Bestandesparameter, da er für physiologische und ökologische Prozesse, wie zum Beispiel Lichtinterzeption, Photosynthese und Evapotranspiration von großer Bedeutung ist (WILHELM 2000, COOPS et al. 2004) und ein integratives Maß für die biotischen und abiotischen Einflussbedingungen darstellt (BOEGH et al. 2002).

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Das Penta-Spek System

Das mobile hyperspektrale Aufnahmesystem Penta-Spek besteht aus sechs einzelnen Spektrometern (Ocean Optics Inc.), die in zwei Modulen gruppiert sind. Die technischen Daten sind in Tabelle 1 dargestellt:

Tab. 1. Technische Daten des Penta-Spek-Systems.

<b>Eigenschaften</b>	<b>Modul 1 (VIS-NIR)</b>	<b>Modul 2 (UV-NIR)</b>
Gesamter Spektralbereich [nm]	340 - 1026	188 – 1036
Volle Auflösung	2048 Kanäle @ 0,34 nm	2048 Kanäle @ 0,42 nm
Effektiver Spektralbereich [nm]	400 -850	400 -850
Effektive Auflösung	46 Kanäle @ 10 nm	46 Kanäle @ 10 nm
Minimale Erfassungszeit	3 msec	3 msec

Fünf-Spektrometer sind nach unten gerichtet, um Boden- oder Pflanzenbestände zu vermessen. Das sechste Spektrometer wird als Einstrahlungsreferenz verwendet, um die anderen fünf Spektrometer zu korrigieren (LILIENTHAL & SCHNUG, 2010). Somit kann direkt im Feld die spektrale Reflexion bestimmt werden (Abbildung 1).

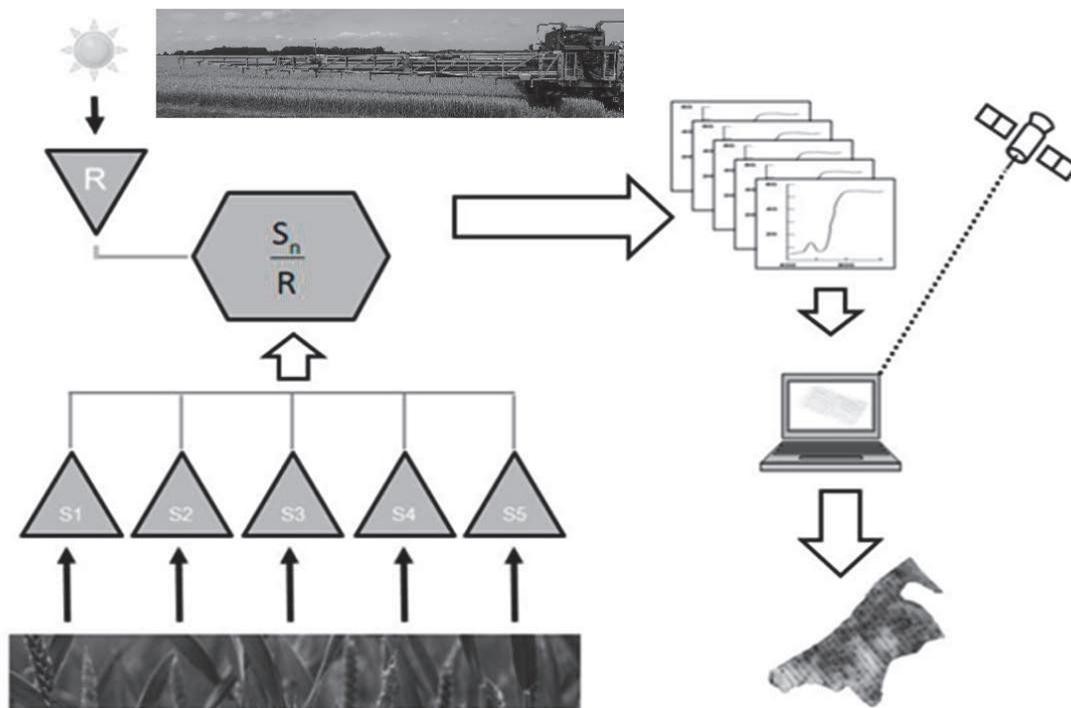


Abb. 1: Schematischer Aufbau des Penta-Spek-Systems.

Die geometrische Auflösung des Systems wird einerseits durch die Fahrgeschwindigkeit des Geräteträgers, andererseits durch die Sensorabstände entlang des Meß-Auslegers bestimmt. Neben der minimalen Fahrgeschwindigkeit (bei einem Traktor etwa 0,5 km/h) wird die räumliche Auflösung auch durch die maximale Frequenz des GPS-Signals (eine Koordinate pro Sekunde) bestimmt. Unter diesen Voraussetzungen kann eine maximale geometrische Auflösung von ca. 0,15 m in Fahrtrichtung erreicht werden. Die Auflösung in Richtung des Meß-Auslegers wird auch vom Sichtfeld der Optik (hier 45°) und der Entfernung zum Objekt bestimmt. Ein Setup mit einem Sensorabstand von 1 m zum Objekt erlaubt die Erfassung einer Fläche von 0,82 m<sup>2</sup> pro Sensor.

## 2.2 Datenauswertung

Für die Auswertung von Hyperspektraldaten eignen sich multivariate Methoden wie zum Beispiel die Partial Least Squares Regression (PLSR) (HÖSKULDSSON, 1988). Hierbei werden durch lineare Transformation aus einer großen Anzahl von Original-Deskriptoren (Spektralkanälen) neue orthogonale Faktoren (latenten Variablen) berechnet. Die latenten Variablen werden so ausgewählt, dass sie eine maximale Korrelation mit der abhängigen Variable (hier LAI) aufweisen.

### 2.3 Kalibrierungsdatensatz

Für die Entwicklung stabiler Vorhersagemodelle ist eine Kalibrierung notwendig, die den zu untersuchenden Parameter (LAI) in einer Vielzahl unterschiedlicher Ausprägungen beinhaltet. Aus diesem Grund wurde im Jahr 2011 in Braunschweig, Deutschland (52,29° N; 10,43° E) ein Feldversuch mit Winterweizen (*Triticum aestivum*) unter Bewässerung und unter Trockenstress durchgeführt. An mehreren Meß-Terminen vor der Blüte wurde im Gelände die bidirektionale Bestandesreflexion mit einem ASD FieldSpec Pro VNIR Spektroradiometer (Analytical Spectral Devices, Inc.) gemessen. Die Reflexionsspektren haben eine Auflösung von 1 nm, decken den Wellenlängenbereich von 350 bis 1100 nm ab und wurden auf einen Reflexionsstandard (Spectralon®) kalibriert. Anschließend wurden die Daten auf 10 nm resampled, und auf einen Wellenlängenbereich von 450 - 850 nm ausgeschnitten, um zu den Penta-Spek Daten kompatibel zu sein.

Parallel zu den Spektralmessungen wurde im Gelände der LAI mit einem Sunscan Gerät (Delta-T Devices Ltd) bestimmt. Der daraus resultierende Kalibrierdatensatz besteht aus 64 spektralen Signaturen und den dazugehörigen LAI-Messungen für vier verschiedene Meß-Termine. Tabelle 2 stellt die deskriptive Statistik dar.

Tab. 2. Deskriptive Statistik der LAI Messungen in Braunschweig 2011.

	LAI KW 16		LAI KW 19		LAI KW 20		LAI KW 23	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Winterweizen	0,69	1,95	2,95	5,15	1,48	5,44	0,00	4,34
	N	Min	Max	Mean	Median	Std	Var	
LAI	64	0,00	5,44	2,52	2,68	1,46	2,13	

KW: Kalenderwoche

### 2.4 Bilddaten

Am 22. Juni 2011 wurden auf einem 45 ha großen Winterweizen Schlag in der Nähe von Köthen (51,80° N; 11,91° E) Penta-Spek Daten erhoben. Das Penta-Spek System war auf einem Düngerstreuer mit 36 m Arbeitsbreite montiert. Die fünf Spektrometer wurden im Abstand von 3,75 m auf dem 18 m langen linken Ausleger montiert. Durch zweimalige Überfahrt in entgegengesetzter Richtung konnte eine vollständige Abdeckung des Feldes erreicht werden.

Die spektralen Daten wurden in voller Auflösung aufgezeichnet. Da Hyperspektraldaten aber eine hohe Multikollinearität aufweisen, konnte die Bandbreite auf 10 nm reduziert werden, um den LAI noch mit einer ausreichenden Genauigkeit vorherzusagen (JARMER et al., 2010). Der Resampling-Prozess führt zu einer Glättung der Daten und reduziert dabei den Rauschanteil. Zur Übertragung in einen räumlichen Kontext wurde ein regelmäßiges Raster mit einer Zellgröße von 10 m über das Feld gelegt. Im nächsten Schritt wurde ein Mittelwertspektrum pro Zelle berechnet, das alle Reflexionsspektren berücksichtigt, die vollständig innerhalb der Zelle liegen.

Am 28. Juni 2011 fand eine Befliegung des gleichen Untersuchungsgebietes mit dem flugzeuggetragenen Hyperspektralsensor AISA-DUAL (Specim) des UFZ Leipzig statt. Die

Aufzeichnung der Bilddaten erfolgte in 367 Spektralkanälen mit einer geometrischen Auflösung von 3 m. Die geometrische und atmosphärische Prozessierung der Daten erfolgte analog, wie bei SIEGMANN et al. (2012) in diesem Tagungsband beschrieben.

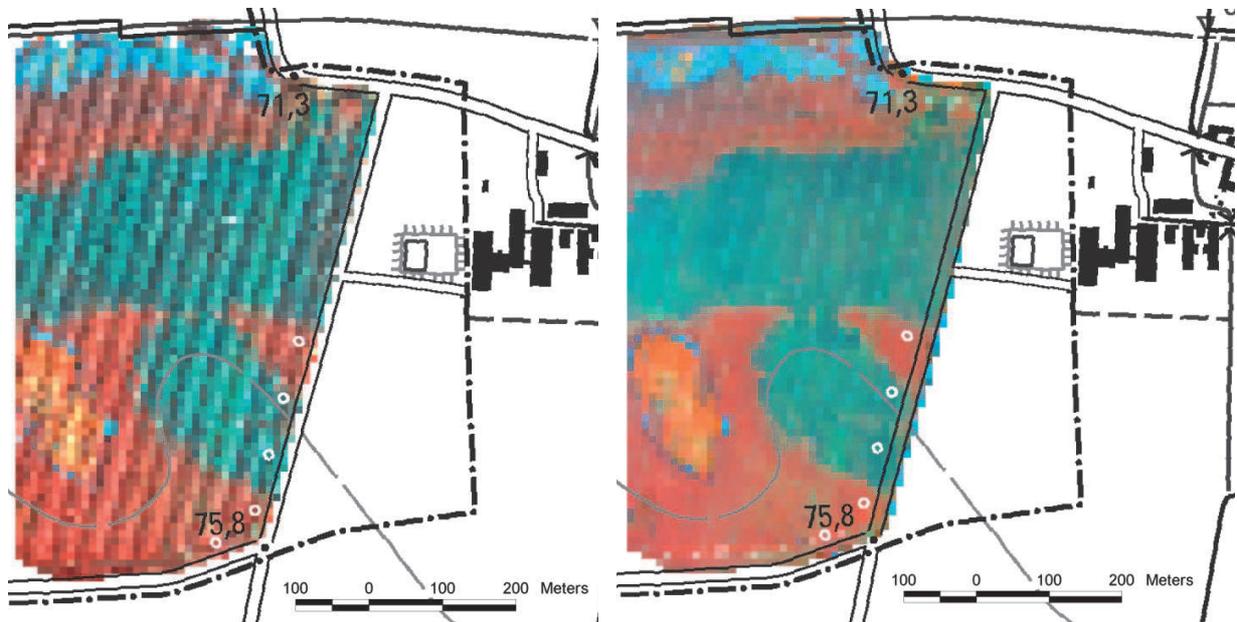


Abb. 2: (l) Penta-Spek Aufnahme vom 22.6.2011 (r) AISA-DUAL Aufnahme vom 28.6.2011 (R/G/B = 850/550/450). Hintergrund: Topographische Karte 1: 25.000 (Quelle: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie).

Für den Vergleich zwischen den Datensätzen wurden die AISA-DUAL Daten auf die Auflösung des Penta-Spek Datensatzes (10 m Bodenauflösung, 10 nm Spektralkanäle) resampled (Abbildung 2). Anschließend wurde der Zielparameter (LAI) auf Basis des PLSR Kalibrationsdatensatzes aus Braunschweig berechnet.

### 3 Ergebnisse

Aus den Penta-Spek Punktmessungen (24.000 Einzelmessungen) wurde ein Bilddatensatz mit 10 m Pixelgröße generiert, der genauso wie die angepassten AISA-DUAL Daten als Eingangsdaten für die LAI Schätzung genutzt wurde (Abb. 3). Die streifige Textur (Abb. 3 links) in den Penta-Spek Daten (Abb. 2 links) ergibt sich aus den Fahrgassen, da die Sensoren 3,75 m von der Mitte der Spur montiert wurden. Das führt zu einem 7,5 m breiten Bereich, der nicht von einem Spektrometer erfasst wurde.

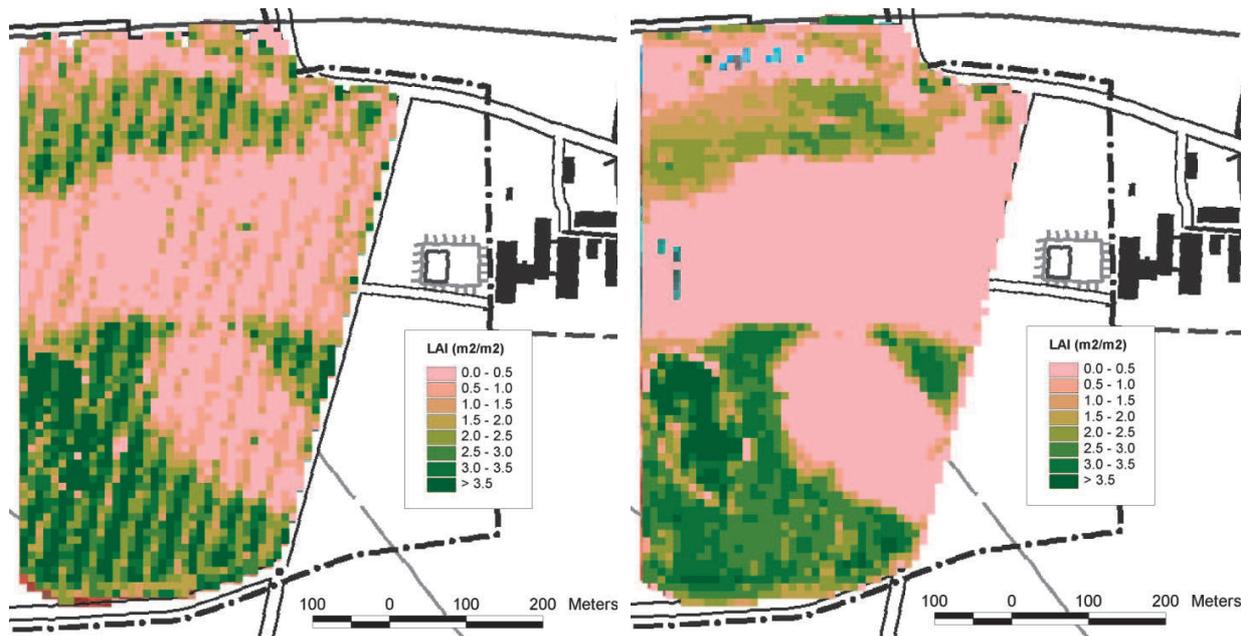


Abb. 3: (l) LAI aus Penta-Spek Daten vom 22.6.2011 (r) LAI aus AISA-DUAL Daten vom 28.6.2011.

Die aus den AISA-DUAL Daten geschätzten LAI Werte (Abb. 3 rechts) liegen im Wertebereich etwas niedriger als die geschätzten LAI Daten des Penta-Spek Systems (Abb. 3 links). Da zwischen den Aufnahmetermen ein zeitlicher Abstand von einer Woche liegt, sind diese Unterschiede auf das Abreife-Verhalten innerhalb der Vegetationsperiode zurückzuführen. Die Validierung der geschätzten LAI-Werte aus den Penta-Spek-Daten wurde unter Verwendung von acht LAI Referenz-Messungen im Feld durchgeführt. Für die AISA-DUAL Daten ist leider keine Validierung möglich, da zum Aufnahmezeitpunkt in diesem Feld aufgrund des späten Entwicklungsstandes der Vegetation keine Referenzmessungen mehr durchgeführt wurden. Der Validierungssatz für die Penta-Spek Daten sehr klein ist ( $n = 8$ ), zeigt aber, dass sich der LAI aus dem Kalibrierdatensatz aus Braunschweig vorhersagen lässt (Abb. 4).

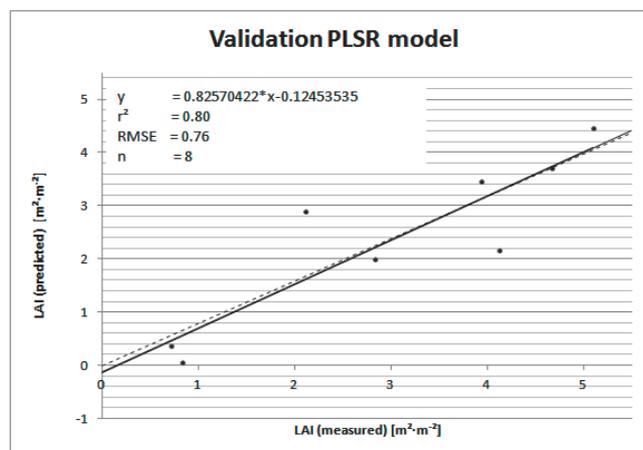


Abb. 4: Validierung der LAI Prognose für die Penta-Spek Daten basierend auf Feldmessungen.

Durch die Trockenphase im Frühsommer 2011 kam es in Köthen zu starken Schäden durch Trockenstress, was dazu führte, dass der LAI in großen Teilen des Schlages nur einen Wertebereich von 1 – 2 erreichte. Gerade dieser Wertebereich ist aber bei den Kalibrierdaten in Braunschweig nur unzureichend erfasst worden (Tab. 2).

Im visuellen Vergleich bilden aber das Penta-Spek System und die AISA-DUAL Daten die gleichen räumlichen Strukturen ab. Damit ist nun ein System verfügbar, mit dem sehr schnell Hyperspektraldaten im Gelände erhoben werden können.

#### **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Die Ergebnisse zeigen, dass die generierten Bilddaten des Penta-Spek Systems eine gute Ergänzung zu anderen bildgebenden hyperspektralen Verfahren darstellen können. Durch die Witterungsunabhängigkeit kann das System zudem Spektraldaten mit hoher Flexibilität bereitstellen, was gerade für landwirtschaftliche Fragestellungen von großer Bedeutung ist.

Terrestrische hyperspektrale Fernerkundung ist ein Werkzeug, mit dem die zeitliche und räumliche Variabilität verschiedener Vegetationsparameter ermittelt werden kann. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Vorhersage des LAI mit Hilfe der hyperspektralen Reflexionsmessungen des Penta-Spek-Systems möglich ist. Weitere Vegetationsparameter (z.B. Biomasse, Chlorophyllgehalt etc.) werden derzeit kalibriert, indem während der kommenden Vegetationsperioden regelmäßig Vegetationsbestände spektral vermessen und destruktiv beprobt werden. Es ist das Ziel, mittelfristig spektrale Kalibrierdaten für unterschiedliche Vegetationsparameter und Anbaukulturen bereit zu stellen.

Aufgrund der sehr hohen Messdichte können die Spektraldaten des Penta-Spek Systems ohne Interpolation auf die Fläche umgerechnet werden. Das Penta-Spek System kann im Gegensatz zu bisher verfügbaren terrestrischen Sensoren in der Landwirtschaft Bilddaten produzieren, die die räumliche Variabilität der Bestände erfassen kann. Damit stehen für inhaltliche Auswertungen der Daten neben den chemometrischen Verfahren auch alle Techniken der hyperspektralen Bildverarbeitung zur Verfügung. Besonders interessant ist das Penta-Spek System für die landwirtschaftliche Bilddatenerfassung zu Zeitpunkten, in denen die klassische Fernerkundung selten Daten liefern kann. Aufnahmen im frühen Frühjahr eignen sich zum Beispiel zur Erfassung der Bestandesentwicklung nach dem Winter und zur Dokumentation von Auswinterungsschäden.

Mit dem Penta-Spek-System steht eine kostengünstige Technologie für die Erfassung von Hyperspektraldaten im Gelände zur Verfügung. Durch die kontinuierliche Messung der einfallenden Strahlung werden Beleuchtungsunterschiede direkt kompensiert, so dass das System nahezu unabhängig von den Wetterbedingungen arbeiten kann. Für die landwirtschaftliche Fernerkundung ergeben sich aus der Kombination von flugzeug-, satellitengestützten und terrestrischen Systemen wichtige Synergieeffekte, die den Einsatz dieser Technologie in der praktischen Landwirtschaft zukünftig unterstützen können.

## Danksagung

Die Arbeit wurde im Rahmen des EnMap Vorbereitungsprogramms durchgeführt und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des Projektes ‚Hyland‘ (FKZ 50EE1014) finanziert.

## 5 Literaturverzeichnis

- BARET, F., GUYOT, G., 1991: Potentials and limits of vegetations indices for LAI and APAR assessment, *Remote Sensing of Environment*, **35**, S. 161-173.
- BOEGH, E., SOEGAARD, H., BROGE, N., HASAGER, C. B., JENSEN N. O., SCHELDE, K., THOMSEN, A., 2002: Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture, *Remote Sensing of Environment*, **81** (2–3), S. 179–193.
- COOPS, N.C., SMITH, M.L., JACOBSEN, K.L., MARTIN, M. & OLLINGER, S., 2004: Estimation of plant and leaf area index using three techniques in a mature native eucalypt canopy. *Austral Ecology*, **29**, S. 332-341.
- HÖSKULDSSON, A., 1988: PLS Regression Methods. *Journal of Chemometrics*, **2**, S. 211-228.
- JARMER, T., LILIENTHAL, H., EHLERS, M., ROSSO, P., 2010: Die Erfassung organischen Kohlenstoffs des Oberbodens mittels Hyperspektraldaten, *Bornimer Agrartechnische Berichte*, **73**, S. 94-103.
- LILIENTHAL, H., SCHNUG, E., 2010: Bodengestützte Erfassung räumlich hochaufgelöster Hyperspektraldaten. *Das Penta-Spek System. Bornimer Agrartechnische Berichte*, **73**, S.86-93.
- SIEGMANN, B., JARMER, T., LILIENTHAL, H., RICHTER, N., SELIGE, T., HÖFLE, B., 2012: Die Ableitung des Blattflächenindex von Weizenbeständen aus abbildenden Hyperspektraldaten, *DGPF Tagungsband 21 /2012*.
- WILHELM, W.W., RUWE, K. & SCHLEMMER, M.R., 2000: Comparison of three leaf area index meters in a corn canopy. *Crop Science*, **40**, S. 1179-1183.