

Hyperspektraldaten zur Erfassung des Blattflächenindex von Weizenbeständen

Bastian SIEGMANN^{a,1}, Thomas JARMER^a, Holger LILIENTHAL^b,
Nicole RICHTER^b, Thomas SELIGE^c und Bernhard HÖFLE^d

^a*Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück,
Barbarastrasse 22b, D-49076 Osnabrück, Email: bsiegmann@igf.uni-osnabrueck.de,
tjarmer@igf.uni-osnabrueck.de*

^b*Julius Kühn-Institut, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Bundesallee 50,
D-38116 Braunschweig, Email: holger.lilienthal@jki.bund.de,
nicole.richter@jki.bund.de*

^c*TU München, Lehrstuhl für Bodenökologie, IngolstädterLandstrasse 1,
D-85764 Neuherberg, selige@wzw.tum.de*

^d*Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Geographisches Institut, Berliner Straße 48,
69120 Heidelberg, hoefle@uni-heidelberg.de*

Keywords. Blattflächenindex, Spektroskopie, Partial Least Squares Regression,
Penta-Spek

Zusammenfassung

Biochemische und biophysikalische Eigenschaften landwirtschaftlicher Pflanzenbestände sind zeitlich und räumlich sehr variabel. Die Erfassung der räumlichen Variabilität von Vegetationsbeständen ist sehr kosten- und zeitintensiv und daher für großräumige Anwendungen nicht praktikabel. In diesem Zusammenhang stellt die Reflexionsspektrometrie, als nicht-destruktive Methode, ein schnelles Screening-Tool zur Ableitung von Zustandsparametern von Pflanzenbeständen zur Verfügung. Neuere technische Entwicklungen ermöglichen es, sowohl terrestrisch, als auch mit Satellitensensoren, hyperspektrale Reflexionsmessungen auf unterschiedlichen Maßstabsebenen durchzuführen.

Vor dem Hintergrund der für 2015 geplanten deutschen Satellitenmission EnMAP (**E**nvironmental **M**apping and **A**nalysis **P**rogram) stellt sich die Frage, ob und mit welcher Güte sich Vegetationsparameter aus Hyperspektraldaten ableiten lassen. An Bord des EnMAP Satelliten wird sich der sogenannte Hyperspectral Imager (HSI) befinden, ein hyperspektrales Spektrometersystem mit 228 Kanälen, das einen Spektralbereich von ca. 420 – 2450nm abdecken wird.

In der vorliegenden Studie wird beispielhaft die Erfassung des Blattflächenindex (LAI) von Weizenbeständen aus Hyperspektraldaten vorgestellt. Der LAI ist definiert als Blattfläche pro Bodenoberfläche. Dieser Vegetationsparameter ist maßgeblich an der Steuerung der Evapotranspiration, sowie der Photosyntheseleistung beteiligt und

¹ Corresponding Author.

wirkt sich daher maßgeblich auf die Ertragsleistung landwirtschaftlicher Kulturen aus. Im Rahmen des Verbundprojektes HyLand wurde der LAI eines Weizenfeldes nordwestlich von Köthen (Sachsen-Anhalt) analysiert. Im Feld wurden Reflexionsmessungen mit einem ASD FieldSpec-III Spektroradiometer, sowie die Bestimmung des LAI mit einem SunScan Messgerät durchgeführt. Aus den ASD-Messungen wurden synthetische Spektren mit der spektralen Auflösung des geplanten HSI Sensors generiert. Parallel zu den Felderhebungen fand eine Befliegung der Region mit dem Sensor AISA-DUAL (Airborne Imaging Spectrometer for Application) statt. Die hyperspektralen AISA-DUAL Daten wurden zunächst auf die spektrale Auflösung des HSI transformiert. In einem weiteren Schritt wurden die simulierten Bilddaten mit einer geometrischen Auflösung von 3m auf die endgültige Auflösung des HSI (30m) resampled. Der LAI wurde aus den hochaufgelösten Reflexionsspektren aus dem Feld und den simulierten HSI Spektren mittels Partial Least Squares Regression (PLSR) modelliert. Das Regressionsmodell auf der Basis der Feldspektren erlaubt die Vorhersage des LAI mit einer hohen Genauigkeit ($r^2_{cv}=0.963$; $RMSE_{cv}=0.129$; $n=37$). Die aus den simulierten HSI Spektren geschätzten LAI-Werte lassen sich auch mit hoher Genauigkeit schätzen ($r^2_{cv}=0.920$; $RMSE_{cv}=0.186$; $n=37$). Die Übertragung des PLSR Modells auf die spektral simulierten HSI Bilddaten (3m geometrische Auflösung) führte zu einer geringeren Güte ($r^2=0.522$; $RSME=0.502$; $n=37$). Die spektrale und geometrische (30m) Simulation des HSI Sensors zeigte eine weitere Abnahme der Vorhersagegüte des LAI ($r^2=0.268$; $RSME=0.595$; $n=36$). Grundsätzlich verdeutlichen die Ergebnisse aber, dass eine Vorhersage des LAI mit der spektralen Auflösung des HSI sehr gut möglich ist. Für eine räumliche Simulation des LAI auf AISA-DUAL Bilddaten, die geometrisch an die Auflösung von EnMAP angepasst wurden, muss in Zukunft die Beprobungsstrategie im Gelände an die 30 x 30 m großen Pixel angepasst werden, um den LAI besser vorhersagen zu können.

1. Einleitung

Der LAI, der das Verhältnis der Blattoberfläche zur Bodenfläche angibt, erlaubt Rückschlüsse auf die photosynthetische Aktivität und damit auf die Produktivität von Vegetation [1]. Er ist ein integratives Maß für die biotischen und abiotischen Einflussbedingungen, da er von ertragsreduzierenden Faktoren wie Pflanzenkrankheiten und Bewirtschaftungsfehlern maßgeblich beeinflusst wird [2, 3, 4]. Regionale Ertragsprognosen benötigen den LAI als einen wichtigen Parameter, da er die Lichtinterzeption und somit die Ertragsbildung beeinflusst. Eine räumliche Erfassung der saisonalen Veränderungen des LAI durch Messtechnik im Gelände ist lediglich auf kleine Areale begrenzt und für regionale Abschätzungen nicht praktikabel.

Multispektrale Fernerkundungsdaten haben wesentlich dazu beigetragen das großräumige Monitoring des LAI in den letzten Jahrzehnten zu verbessern. Zusätzlich steht gegenwärtig eine immer größere Anzahl an hyperspektralen Sensoren zur Verfügung, die eine noch genauere Erfassung der saisonalen Veränderungen des LAI ermöglichen [5]. Für das Jahr 2015 ist die deutsche Satellitenmission EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program, www.enmap.org) mit dem Hyperspectral Imager (HSI) geplant [6]. Das System besteht aus zwei abbildenden Spektrometern. Ein Spektrometer ist im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich sensitiv (VNIR, 94 Kanäle, Bandbreiten ca. 6nm). Das zweite Spektrometer ist für das mittlere Infrarot (SWIR 134 Kanäle, Bandbreiten ca. 10nm) ausgelegt.

Insgesamt wird mit 228 Kanälen ein Spektralbereich von ca. 420 – 2450nm abgedeckt. In dieser Studie wird das Potenzial des geplanten HSI Sensors untersucht. Auf der Basis von hochauflösenden Feldspektren wird die spektrale Auflösung des HSI simuliert und es werden mittels Partial Least Squares Regression (PLSR) Kalibrationsmodelle zur Bestimmung des LAI entwickelt. Parallel zu den Feldmessungen fand eine Befliegung des Untersuchungsgebietes mit dem Sensor AISA-DUAL des Umweltforschungszentrums Leipzig (UFZ) statt. Die Bilddaten wurden ebenfalls auf die spektrale Auflösung des HSI transformiert und der LAI wurde auf den simulierten Bilddaten für eine geometrische Auflösung von 3m (Originalauflösung AISA-DUAL) und 30m (Auflösung HSI) modelliert. Mit Hilfe der Daten wird beispielhaft eine flächendeckende Vorhersage des LAI für einen Weizenschlag vorgenommen.

2. Datengrundlage

2.1. Untersuchungsgebiet

Der untersuchte Weizenschlag hat eine Größe von 80 ha und befindet sich nordwestlich der Stadt Köthen in Sachsen-Anhalt ($51^{\circ}47.62$ N; $11^{\circ}54.9$ E) (Abb.1). Aufgrund der Lage des Untersuchungsgebietes im Regenschatten des Harzes beträgt die jährliche Niederschlagssumme lediglich 430mm. Damit ist die Region ein Teil des mitteldeutschen Trockengebietes, mit einer jährlichen Durchschnittstemperatur von 9°C . Schwarzerden sind der bodenlandschaftlich bestimmende Bodentyp im Untersuchungsgebiet.

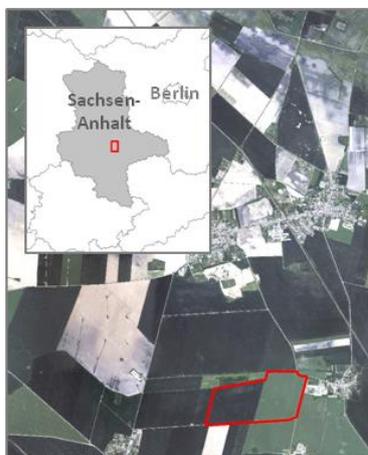


Abbildung 1. Weizenschlag im Untersuchungsgebiet bei Köthen.

2.2. Felddaten

Während einer Geländekampagne vom 7. bis 10. Mai 2011 wurde an 37 Standorten der LAI mit Hilfe eines SunScan Messgerätes (Delta-T Devices Ltd.) bestimmt. Die Auswahl der Position der einzelnen Messflächen erfolgte im Vorfeld der Geländekampagne, mit dem Ziel die heterogenen Bestandsstrukturen innerhalb des Ackerschlagess möglichst gut abzubilden (vgl. Abb. 2).

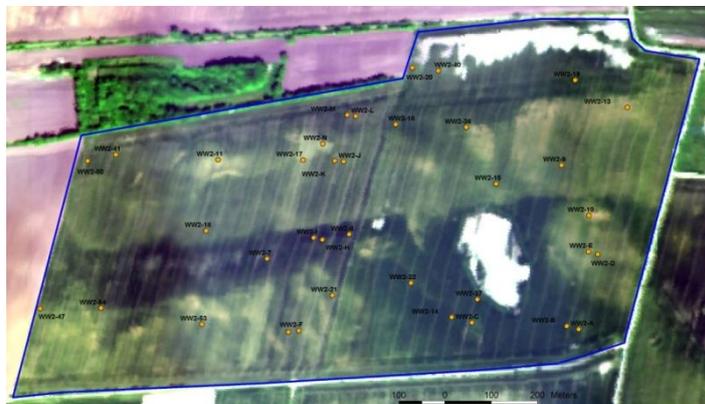


Abbildung 2. Untersuchter Weizenschlag mit Messflächen (Hintergrund AISA-DUAL).

Der LAI wurde jeweils innerhalb eines 0.25m^2 großen Plots 6-mal gemessen und die Einzelmessungen gemittelt. Um nicht-repräsentative Einzelmessungen ausschließen zu können, erfolgte die Bildung der Mittelwerte nur aus den Messungen, die innerhalb der einfachen Standardabweichung lagen.

Zu jeder LAI Messung wurde die spektrale Reflexion mit einem ASD FieldSpec-III Spektrometer (Analytical Spectral Devices Inc.) in 1 nm-Auflösung im Wellenlängenbereich von 350 - 2500nm gemessen. Die Messungen fanden an 5 Punkten innerhalb jedes 0.25m^2 großen Plots statt. Als Reflexionsstandard wurde Spectralon[®] verwendet. Die Reflexionsmessungen erfolgten in der Principle Plane, in einem Abstand von ca. 50cm zur Bestandesoberfläche.

2.3. Bilddaten

Zeitgleich zur Geländekampagne fand am 10. Mai 2011 eine Befliegung des Untersuchungsgebietes mit dem flugzeuggetragenen Hyperspektralsensor AISA-DUAL (Specim, Spectral Imaging Ltd.) statt. Die Aufzeichnung der Bilddaten erfolgte in 367 Spektralkanälen mit einer geometrischen Auflösung von 3m. Die radiometrische Korrektur der Daten wurde zunächst mit der Software CaliGeo durchgeführt. Anschließend erfolgte eine zusätzliche Korrektur der Daten mit Hilfe des Programms ROME (Reduction Of Miscalibration Effects), um Streifen in den Bilddaten zu beseitigen, die sich nach der radiometrischen Korrektur zeigten [7]. Dadurch konnten die fehlerhaften Bildpixel, die sich in Form von Streifen entlang der Flugrichtung durch die Bilddaten ziehen, verringert, aber nicht komplett beseitigt werden. Der nächste Prozessierungsschritt bestand in der Atmosphärenkorrektur der Daten. Dazu wurde die Software FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of spectral Hyper cubes) verwendet, die in der Software ENVI (Exelis Visual Information Solutions) implementiert ist. Während der Befliegung wurden zusätzlich helle und dunkle Referenzflächen am Boden mit einem ASD FieldSpec Pro (Analytical Spectral Devices Inc.) spektral gemessen. Mit Hilfe der Reflexionsspektren der Referenzflächen wurde eine Empirical-Line-Korrektur der Bilddaten durchgeführt, um die Reflexionswerte der Bilddaten noch besser an die spektralen Geländemessungen anzupassen [8]. Abschließend erfolgte die geometrische Korrektur der Daten, wozu erneut die Software CaliGeo verwendet wurde.

2.4. Spektrale Anpassung der Daten

Die verwendeten Daten besitzen unterschiedliche spektrale Auflösungen und müssen für die Weiterverarbeitung konvertiert werden. Zusätzlich haben die Wasserdampfbanden der Atmosphäre einen störenden Einfluss sowohl auf die Feldspektren, als auch auf die Bilddaten. Da die spektrale Auflösung des HSI (420-2450nm) hinsichtlich der Eignung zur Vorhersage von Vegetationsparametern getestet werden soll, wurden alle Daten in diese Auflösung umgerechnet. Zum jetzigen Zeitpunkt sind noch keine detaillierten Angaben über die Lage und Bandbreiten der einzelnen Spektralkanäle der zukünftigen HSI-Sensoren vorhanden. Bekannt ist lediglich, dass das erste Spektrometer 94 Kanäle im Spektralbereich 420-1000nm und das zweite 134 Kanäle im Spektralbereich von 900 – 2450nm erhalten soll [6]. Daraus ergeben sich Bandbreiten von ca. 6nm für das erste Spektrometer und ca.10nm für das zweite. Mit diesen Angaben wurde gerechnet. Tabelle 1 zeigt die Eigenschaften der einzelnen Daten in einer Übersicht.

Tabelle 1. Übersicht der verwendeten und simulieren Datensätze.

Sensor	Kanäle (original)	Kanäle (angepasst)	Spektralbereich (original)	Spektralbereich (angepasst)
ASD FieldSpec	2151	1815	350 – 2500 nm	420 – 2447 nm
AISA-DUAL	367	315	400 – 2497 nm	417 – 2447 nm
HSI-EnMAP	228	222	420 – 2446 nm	

Alle Daten wurden spektral mit der Software ENVI resampled. Die FieldSpec Daten wurden zunächst auf den Spektralbereich des HSI reduziert. Aus diesen Daten wurde ein weiterer Datensatz erstellt, der auf die spektrale Auflösung des HSI resampled wurde. Die AISA-DUAL Daten wurden spektral auf die HSI Auflösung umgerechnet und anschließend erfolgte ein geometrisches Resampling der Daten von 3m auf 30m. Zur weiteren Bearbeitung lagen 4 Datensätze vor: FieldSpec Daten im Spektralbereich des HSI und 1 nm Auflösung, FieldSpec Daten mit spektraler HSI Auflösung, AISA-DUAL Bilddaten mit spektraler HSI Auflösung und geometrischer Auflösung von 3m, sowie ein AISA-DUAL Bilddatensatz mit spektraler und räumlicher Auflösung des HSI.

3. Methodik

3.1. Partial Least-Squares Regression

Mit Hilfe der 37 punktuellen LAI-Messungen im Gelände und den zugehörigen umgerechneten Spektren wurden PLSR Modelle zur Schätzung des LAI entwickelt. Es erfolgte dabei eine Begrenzung der latenten Variablen auf den maximalen Wert von 10. Die Kreuzvalidierung (cross-validation, cv) der Ergebnisse der PLSR wurde anhand der „leave-one-out“-Methode vorgenommen. Als Maße für die Schätzgenauigkeit wurden das Bestimmtheitsmaß (r^2_{cv}), der Quadratwurzelfehler ($RMSE_{cv}$) und das Verhältnis des Standardfehlers der Vorhersage zur Standardabweichung (RPD) herangezogen [10].

4. Ergebnisse

Der Spannweite des im Gelände erhobenen LAI ist aufgrund des saisonalen Zeitpunkts noch relativ gering und liegt zwischen 0,5 und 3,32 m^2m^{-2} (vgl. Tab. 2). Außerdem weist der Mittelwert von 1,53 darauf hin, dass Flächen mit niedrigen LAI-Werten überwiegen. Die gemessenen LAI-Werte sind normalverteilt.

Tabelle 2. Deskriptive Statistik der im Gelände gemessenen LAI Werte [m^2m^{-2}].

	n	Min	Max	Mean	SD
Winterweizen	37	0.50	3.32	1.53	0.68

Zur Schätzung des LAI aus den angepassten Feldspektren wurde jeweils ein Regressionsmodell für den hochauflösenden Datensatz mit 1815 Spektralkanälen, und für den simulierten HSI Datensatz mit 222 Spektralkanälen erstellt. Die Ergebnisse der einzelnen PLS-Regressionen (Tab. 3) zeigen, dass sowohl die hochaufgelösten Daten, als auch die simulierten HSI Daten den LAI mit hoher Genauigkeit schätzen konnten. Der RPD liegt bei beiden Regressionsmodellen weit über dem Wert 2, was als Indikator für die hohe Robustheit der Regressionsmodelle gedeutet werden kann [10].

Tabelle 3. Ergebnisse der PLSR des LAI für Feldspektren und den simulierten HSI Sensor.

Datensatz		r^2_{ev}	RMSE _{ev}	RPD
ASD	(1815 Kanäle)	0.963	0.129	5.23
HSI-EnMAP	(222 Kanäle)	0.920	0.186	3.64

Das PLSR Modell für die simulierten HSI Spektraldaten wurde auf die aus AISA-DUAL simulierten HSI Bilddaten mit unterschiedlicher geometrischer Auflösung übertragen. Zur Validierung wurden die 37 Feldmessungen des LAI den vorhergesagten LAI Werten aus den simulierten Bilddaten gegenübergestellt. Die Validierung

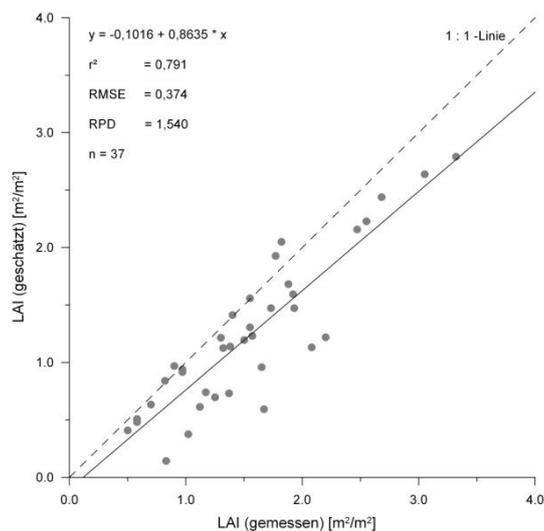


Abbildung 3. Scatterplot der PLSR-Schätzung (kreuzvalidiert) für den LAI aus HSI-EnMAP-Daten

der bildbasierten LAI-Schätzungen erfolgte mittels „best-out-of-nine-approach“. Da der mittlere Fehler der Georeferenzierung in den AISA-Bilddaten bei ca. einem Pixel lag, wurde das zur GPS-Position korrespondierende Pixel bestimmt und die acht angrenzenden Pixel für die Validierung mit berücksichtigt. Innerhalb dieser 3x3-Matrix wurde der am besten zur Geländemessung passende LAI-Wert als geschätzter LAI-Wert berücksichtigt. Das Ergebnis der Kreuzvalidierung für die simulierten HSI-Daten mit 3m-Auflösung ist in Abbildung 3 dargestellt. Das PLSR-Modell liefert ein r^2 von 0,79 bei einem RMSE von 0,37 für die AISA-DUAL Daten in der spektralen Auflösung des HSI-Sensors.

Der verwendete Validierungsansatz tendiert zu einer Überschätzung der Prognosequalität des PLSR-Modells. Allerdings liefert eine direkte pixel-basierte Validierung deutlich weniger belastbare Ergebnisse, da hierbei die beprobten Plots auf Grund der Lagefehler oft nicht in der Validierung repräsentiert sind.

Analog wurde eine Modellierung der LAI-Werte für die auf 30m resampelten Bilddaten (räumliche Auflösung des HSI-Sensors) durchgeführt (Abb. 4).



Abbildung 4. LAI aus spektral und geometrisch simulierten HSI Bilddaten.

Eine Validierung der geschätzten LAI-Werte wurde in diesem Fall auf das jeweils mit der GPS-Position korrespondierende Pixel durchgeführt, da ein Pixel in diesem Fall 10x10 Originalpixel umfasst und so der Lagefehler der Georeferenzierung im Pixel bereits berücksichtigt wurde. Das Ergebnis der Validierung auf diesem Aggregationsniveau ist nicht zufriedenstellend ($r^2=0,268$; $RMSE=0,595$; $RPD=1,14$). Die Ursache für die unzureichenden Ergebnisse der LAI-Schätzung liegt in der Mittelwertbildung innerhalb der 30m-EnMAP-Pixel. Dadurch werden die räumliche Unterschiede des LAI geglättet, sodass eine sinnvolle Validierung von 30 x 30 m-Pixeln mit Referenzen von 0,25 m² nicht möglich ist (Tab. 4).

Tabelle 4. Ergebnisse der PLSR des LAI für simulierte HSI-EnMAP Daten.

Datensatz		r^2	RMSE	RPD
HSI-EnMAP	(3 m)	0,791	0,374	1,54
HSI-EnMAP	(30 m)	0,268	0,595	1,14

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass sich der LAI mit hoher Genauigkeit aus Feldspektren und simulierten HSI Spektren vorhersagen lässt. Damit ist grundsätzlich zu erwarten, dass

die Bilddaten des für 2015 geplanten hyperspektralen EnMAP Satelliten eine genaue Vorhersage des LAI in regionalem Maßstab ermöglichen werden. Die Übertragung der PLS-Modelle auf simulierte HSI Bilddaten zeigte dagegen eine geringe Güte ($r^2=0.268$). Zwar können Hyperspektral-Befliegungen, wie in diesem Fall mit dem Sensor AISA-DUAL, Grundlagendaten für Sensor-Simulationen liefern, allerdings muss die Beprobungsstrategie im Gelände an die räumliche Auflösung des HSI-Sensors mit 900m^2 großen Pixeln angepasst werden, damit eine angemessene Validierung der Daten erfolgen kann. Grundsätzlich verdeutlichen die Ergebnisse aber das große Potenzial hyperspektraler Fernerkundungsdaten gegenüber herkömmlichen multispektralen Verfahren zur räumlichen Erfassung des LAI [5]. Damit ist zu erwarten, dass zukünftig wichtige Eingangsgrößen für ökologische Modelle auf Basis von Hyperspektraldaten regional bereit gestellt werden können. Der LAI stellt beispielsweise eine zentrale Größe für Wachstumsmodelle dar. Somit werden mit der künftigen Verfügbarkeit hyperspektraler Satellitendaten bessere Ertragsprognosen auf regionalem Maßstab möglich werden.

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 und 50EE1015) finanziert. Darüber hinaus danken wir Daniel Doktor (Helmholtz Zentrum für Umweltforschung Leipzig) und Patrick Hostert (Humboldt Universität zu Berlin) für die Bereitstellung ihrer Messinstrumente.

Literatur

- [1] B. Duchemin, R. Hadriab, S. Errakib, G. Bouleta, P. Maisongrandea, A. Chehbounia, R. Escadafal, J. Ezzaharb, J.C.B. Hoedjesa, M.H. Kharroud, S. Khabbab, B. Mougenota, A. Olioso, J.C. Rodriguez, V. Simonneauxa, Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices, *Agric. Water Manage.*, 79, 1-27, 2006.
- [2] E. Boegh, H. Soegaard, N. Broge, C.B. Hasager, N.O. Jensen, K. Schelde, A. Thomsen, Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture, *Remote Sensing of Environment*, 81 (2-3), 179-193, 2002.
- [3] G. A. Carter, Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress, *International Journal of Remote Sensing*, 15 (3), 697-703, 1994.
- [4] C.S.T. Daughtry, K.P. Gallo, S.N. Goward, S.D. Prince, W.D. Kustas, Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies, *Remote Sensing of Environment*, 39 (141-152), 141-152, 1992.
- [5] K. Lee, W.B. Cohen, R.E. Kennedy, T.K. Maierperger, S.T. Gower, Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes, *Remote Sensing of Environment*, 91 (3-4), 508-520, 2004.
- [6] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, EnMAP Hyperspectral Imager (HSI), [Online, <http://www.enmap.org/sensors>, Jan. 2012.
- [7] C. Rogaß, D. Spengler, M. Bochow, K. Segl, A. Lausch, D. Doktor, S. Roessner, R. Behling, H.U. Wetzler, H. Kaufmann, Reduction of Radiometric Miscalibration-Application to Pushbroom Sensors, *Sensors*, 11, 6370-6395, 2011.
- [8] G. M. Smith, E.J. Milton, The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 20 (13), 2653-2662, 1999.
- [9] D.F. Malley, P.D. Martin, E. Ben-Dor, Application in analysis of soils. Near-infrared spectroscopy in agriculture, *Agronomy*, 44, 729-783, 2004.
- [10] B.W. Dunn, H.G. Beecher, G.D. Batten, S. Ciavarella, The potential of near-infrared reflectance spectroscopy for soil analysis-A case study from the Riverine Plain of south-eastern Australia, *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 42 (5), 607-614, 2002.