

Skalenspezifische hyperspektrale Fernerkundung mit dem Airborne Imaging Spectrometer for Application (AISA-EAGLE/HAWK 400-2500nm)

ANGELA LAUSCH¹ & MARION PAUSE²

Hyperspektraldaten stellen für die Forschung eine sehr bedeutsame Auswertegrundlage dar, da sie aufgrund ihrer geometrischen als auch spektralen Eigenschaften eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsgebiete (z.B. Gewässerzustandserfassung, Vegetationsklassifizierungen, Charakterisierung physikalisch-biochemischer Vegetationsparameter, Strukturierung und Zusammensetzung des Bodens, Erfassung von großflächigen Bodenkontaminationen) eröffnen. Es besteht somit ein sehr hoher Bedarf an Hyperspektralinformationen. Der Einsatz von kommerziellen Hyperspektraldaten ist jedoch mit einer Vielzahl von Problemen verbunden. So sind Forschungen hinsichtlich unterschiedlichen räumlich/hierarchischer als auch zeitlichen Skalen mit Hyperspektraldaten nur sehr schwer möglich, andererseits existieren keine Untersuchungen zu kausalen Zusammenhängen zwischen abbildenden Hyperspektralsignalen und interessierenden Zielgrößen. Am HELMHOLTZ Zentrum für Umweltforschung UFZ Leipzig wurde eine skalenspezifische hyperspektrale Fernerkundung auf Grundlage der Sensoren AISA-EAGLE (400-970nm) und AISA-HAWK (970-2500nm) etabliert. In drei unterschiedlichen Skalen (Laborversuch 1m², Hebebühne 100m², sowie auf Flugzeugmesskampagne 10km²) werden intensive Untersuchungen zum raum/zeitlichen Verhalten von physikalisch/chemisch und biologischen Zustandsgrößen in der Vegetation/Boden/Wasser und dem Hyperspektralsignal durchgeführt.

1 Einleitung

Das HELMHOLTZ Zentrum für Umweltforschung UFZ Leipzig ist eine Großforschungseinrichtung mit dem Schwerpunkt der Umweltforschung. Um eine umfassende Prozessforschung in Landschaften und Ökosystemen zu garantieren, wurden eigens hierfür Instrumente zur Durchführung einer eigenen skalenspezifischen hyperspektralen Fernerkundung zur Verfügung gestellt. Grundlage der Hyperspektralfernerkundung stellen die beiden Sensoren AISA-EAGLE (400-970nm) und AISA-HAWK (970-2500nm) dar - Airborne Imaging Spectrometer for Applications (AISA, MÄKISARA 1993). Beide geometrisch als auch spektral hochauflösenden Sensoren werden auf einem UFZ eigenen Ultraleichtflugzeug eingesetzt. Durch einen speziellen Spiegelaufsatz ist auch ein Einsatz der abbildenden Hyperspektralsensoren auch auf einer Hebebühne sowie im Speziallabor möglich.

Die ständige Verfügbarkeit der Sensoren garantiert insbesondere für die Vegetationsanalyse Datenaufzeichnungen zu relevanten Entwicklungszeitpunkten, sowie die Bereitstellung von Zeitreihen.

- 1) Angela Lausch, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Computational Landscape Ecology, Permoser Str. 15, D-04318 Leipzig, Germany, E-Mail: angela.lausch@ufz.de
- 2) Marion Pause, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Computational Landscape Ecology, Permoser Str. 15, D-04318 Leipzig, Germany, E-Mail: marion.pause@ufz.de

Der Einsatz der Sensoren im Labor ermöglicht darüber hinaus problemspezifische Analysen von Hyperspektraldaten in Abhängigkeit kontrollierter Pflanzenstress verursachender Faktoren. Ergänzend zu Flugkampagnen kann die Hebebühne als Aufnahmeplattform zusätzlich in das „Ground Truthing“ integriert werden, um räumlich sehr hochauflösende spektrale Informationen über die Sub-Pixel Heterogenität der Flugzeugdaten zu erhalten. Weiterhin eignet sich die Hebebühne für mobile Einsätze über kontrollierten Freilandversuchen, u.a. auch ergänzend zu Laborversuchen.

2 Problemstellung

Hyperspektraldaten stellen für die Forschung ein sehr bedeutsame Auswertegrundlage dar, da sie aufgrund ihrer geometrischen als auch spektralen Eigenschaften eine Vielzahl unterschiedlichster Anwendungsgebiete (z.B. Gewässerzustandserfassung, Vegetationsklassifizierungen, physikalisch-biochemische Vegetationsparameter, Strukturierung und Zusammensetzung des Bodens, Erfassung von großflächigen Bodenkontaminationen) eröffnen. Es besteht somit einerseits ein sehr hoher Bedarf an Hyperspektralinformationen, andererseits ist der Einsatz von kommerziellen Hyperspektraldaten mit einer Vielzahl von Problemen verbunden.

- 1.) Forschungen hinsichtlich unterschiedlichen räumlich/hierarchischer als auch zeitlichen Skalen mit Hyperspektraldaten sind nur sehr schwer möglich
- 2.) Untersuchungen kausaler Zusammenhänge zwischen Hyperspektralsignalen und interessierender Größen fehlen
- 3.) Die thematische Ausrichtung hyperspektraler Fernerkundungsanalysen wird Mangels geeigneter Daten (z.B. Aufnahmezeitpunkt) nicht selten vorhandenen Daten „angepasst“.

Folgende Ursachen liegen diesen Problemen zugrunde:

- Es besteht ein sehr hoher zeitlicher, finanzieller und personeller Aufwand für die Planung und Durchführung einer Flugmesskampagne (z.B. HYMAP / Befliegung = 15 TEuro).
- Die zeitliche Planung der Flugmesskampagne erfolgt aufgrund hoher Bedarfsanfragen oft bereits viele Monate bis sogar Jahre. Hierdurch werden zeitliche „Befliegungsfenster“ festgelegt, die nicht selten eine hohe Diskrepanz zu einerseits optimalen Strahlungswetter als auch den zeitlichen Erfordernissen des Forschungszieles (Phänologiestadien) führen.
- Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher (geometrischer und spektraler Auflösungen auf die Entstehung von Mischsignalen) räumlicher Skalen auf das Spektralverhalten (Mischsignal) ist sehr oft nicht möglich, da Flugmesskampagnen aufgrund von zeitlichen und finanziellen Engpässen oft nur in einer jeweils vorher definierten Flughöhe durchgeführt werden.
- Durch die hohen zeitlichen und finanziellen Engpässe werden hyperspektrale Flugmesskampagnen nur in einer geringen zeitlichen Frequenz von ca. 3 Befliegungen pro Jahr durchgeführt. Konkrete Aussagen zu wirklich existierenden kausalen Zusammenhängen zwischen Spektralsignalen und physikalisch- biochemischen Parametern von Vegetation, Boden und Wasser sind mit einer großen Unsicherheit verbunden. Es lassen sich aus zur wenigen zeitlichen Datensätzen keine Aussagen zum Monitoring ableiten.

Aufgrund des breiten Einsatzspektrums von Hyperspektraldaten in der Umweltforschung wird am UFZ eine skalenspezifische hyperspektrale Fernerkundung zur Untersuchung unterschiedlicher raum-zeitlicher Prozessgrößen in Strukturen und Landschaften aufgebaut. Grundlage dieser Forschungen stellen die beiden Hyperspektralsensoren AISA-EAGLE (400-970nm) sowie AISA-HAWK (970-2500nm) dar (vgl. Tabelle 1, Abbildung1, MÄKISARA, K 1993).

Skalen der Hyperspektralfernerkundung am UFZ:

- **Skala 1) Speziallaborversuche – Airborne Imaging Spectrometer for Application (AISA-EAGLE/HAWK – 400-2500nm) + Spiegelscanner**
Level 1: 1x1 m Versuchspartzellen, Vegetationsdecke
- **Skala 2) Hebebühne - Airborne Imaging Spectrometer for Application (AISA-EAGLE/HAWK – 400-2500nm)+ Spiegelscanner**
Level 2: 20x20 m Versuchspartzellen, Vegetationsdecke
- **Skala 3) Ultraleichtflugzeug - Airborne Imaging Spectrometer for Application (AISA-EAGLE/HAWK 400-2500nm)**
Level 3: Swath = 500m, geometrische Bodenauflösung 1m, Vegetation, Boden, Fließ- und Stillgewässer, Landnutzungssysteme, Ökosysteme

2.1 Sensoreigenschaften - AISA-EAGLE/HAWK

Der Tabelle 1 sind die Sensoreigenschaften der Hyperspektralsensoren des UFZ zu entnehmen. Anhand des jeweils geplanten Forschungsgegenstandes werden im Vorfeld jeder Maßkampagne (lokale Scanneranwendungen sowie Flugmesskampagnen) die hierfür spektralen als auch geometrischen erforderlichen Sensoreigenschaften bestimmt. In Abhängigkeit von der Gebietsgröße sowie den atmosphärischen Bedingungen (Thermik, Sichtverhältnisse, Strahlungsbedingungen, Wolkenbildung) werden für eine Befliegungskampagne die zu befliegenden Streifenbreiten (Swath) und jeweilige Flughöhe bestimmt.

Tabelle 1: Eigenschaften der Hyperspektralsensoren des UFZ

Sensor head	AISA-EAGLE VNIR				AISA-HAWK II SWIR
Sensorgewicht	11 kg				18 kg
Abmasse (Länge/Breite/Höhe)	380/220/55mm				220/275/470mm
Spektralbereich	400-970nm				970-2500nm
Spektrale Auflösung	2,9nm				8,5nm
Räumliche Auflösung bis zu	1024				320
Kameratyp	CCD Kamera				MCT Kamera
Spektrales Binning	1x	2x	4x	8x	
Spektralbänder	488	244	122	60	254
Spektrales Sampling / Band	1,25 nm	2,3 nm	4,6 nm	9,2 nm	
Bildrate	30	40	60	85	
Focal length	23 mm	18,5 mm	9 mm		22,5mm

FOV	29,9 degree	36,7 degree	62,1 degree	24,0 degree
Streifenbreite	0,53x altitude	0,66x altitude	1,20x altitude	0,43 x altitude
Bodenauflösung In 1000m Flughöhe	0,52 m	0,65 m	1,2 m	1,34
Zusatzteile zum System				
GPS/INS	RT3100			RT3100
Spiegelscanner	Spiegelscanner für lokale Anwendungen			Spiegelscanner für lokale Anwendungen
FODIS-Antenne	Fiber Optic Down welling Irradiance Sensor			Fiber Optic Down welling Irradiance Sensor

AISA (Airborne Imaging Spectrometer for Application)

Die Abbildung 1 zeigt die Einordnung der beiden AISA-Sensoren des UFZ gegenüber den bisher verfügbaren flugzeuggetragenen Hyperspektralsensoren und deren Sensoreigenschaften.

	AVIS-3	AVIRIS (Airborne Visible, InfraRed Imaging Spectrometer)	HyMap (Hyperspectral Mapping)	CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager)		DAIS 7915 (Digital Airborne Imaging Spectrometer)	ROSI (Reflective Optics System Imaging Spectrometer)	AISA EAGLE	AISA HAWK
				CASI-2	CASI-3				
Flugzeug-träger	Ultraleichtflugzeug (Trike), Cessna	NASA ER-2 Jet (Flughöhe ca. 20km) oder Twin Otter turboprop (Flughöhe ca. 4km)	unterschiedliche Flugzeugträger	Unterschiedliche Flugzeugträger		Dornier 228 (DLR Oberpfaffenhöfen)	ab 1995 auf der DLR Falcon Jet (Flughöhe max. 10km) oder Dornier 228 (Flughöhe max. 5km)	Ultraleichtflugzeug (Trike), Cessna, weitere Flugzeugträger möglich	Cessna, weitere Flugzeugträger möglich
Geometrische Bodenaufklärung	2 – 10m (abhängig von der Flughöhe) 1000m = 2,5m Auflösung	4 oder 20m (abhängig von der Flughöhe) 4km (Twin Otter) = 4m, 20km (ER-2) = 20m	3 – 10m	0,5 – 10m		3 – 20m (abhängig von der Flughöhe)	5 – 20m (abhängig von der Flughöhe) 10km = 5,6m	0,5 - 4m (abhängig von der Flughöhe) 1000m = 0,52m Auflösung	0,5 - 4m (abhängig von der Flughöhe) 1000m = 0,97m Auflösung
IFOV / FOV	1.1mrad/ 58°	1mrad/ 30°	1-3 mrad/ 30 – 65°	k.A. / 37,8° across-track, 0.077° along-track	k.A. / 40,5°	3.3 mrad / +26° auf Dornier 228, max. +39° (abhängig vom Flugzeugträger)	0.56 mrad/ 16°	0.036 mrad/ 36,7°	0.075 mrad/ 24,0°
Spektrale Auflösung	400-1020nm (VIS/NIR), 2005 Erweiterung um MIR bis 1700nm (UFZ-VP)	400-2500nm	400 – 2500nm u./o. 3 – 5 µm u./o. 8 – 12 µm	545nm „spectral range“ über 400 – 1000nm	650nm „spectral range“ über 400 – 1050nm	430 – 1050 nm 1500 – 1800 nm 2000 – 2500 nm 3,0 – 5,0 µm 8,7 – 12,3 µm	430 – 850 nm (imaging mode)	400 – 970 nm	970 – 2500 nm
Anzahl der Kanäle	128	224	158 gesamt 126 (0,4 - 2,5) 32 (8 - 12 µm, TIR)	288 gesamt programmierbar je nach Anwendung		79 gesamt 32 (VIS/NIR), 8 (SWIR I), 32 (SWIR II), 1 (MIR), 6 (TIR)	32 (imaging mode) 84 (spectral mode)	488	254
Bildtiefe	14 bit	12 bit	k.A.	12 bit	14 bit	15 bit	12 bit	12 bit	14 bit
Verfügbar seit	1998 (AVIS-1), seit 2001 kommerziell verfügbar	1994	1996	1989	2002	1995-	1992/1993	~2000	~2007/2008
Schwadbreite/ Länge	k.A.	11 km auf ER-2 (20km Höhe), 2km auf Twin Otter (4km Höhe), Streifenlänge ~10km	k.A.	512m bei 1m Auflösung (512 Pixel), vgl. Tab.	1480m bei 1m Auflösung (1490 Pixel), vgl. Tab.	vgl. FOV	~2.8 km bei 10 km Flughöhe, 500 Pixels across-track imaging mode; 167 Pixel across-track spectral mode	~500m bei 1000m Flughöhe	+480m bei 1000m Flughöhe
Aufnahme-winkel	along-track, bis zu 7° verschiedene Winkel	nadir-viewing, Across-track (whiskbroom)	across-track	along-track (pushbroom, CCD)		k.A.	along-track (pushbroom, CCD); Tilt capacity +/-20°	along-track CCD	along-track MCT
SNR (Signal Rausch Verhältnis)	k.A.	k.A.	>500:1	420:1	480:1	>150 (VNIR) > 80 (SWIR/MWIR/TIR)	k.A.	350:1 / 500:1	800:1
Hersteller/ Operator	Ground Truth Centre Oberbayern http://www.gtc.o.de/	NASA / Jet Propulsion Lab (JPL) http://aviris.jpl.nasa.gov/cgi/flight/cgi	Integrated Seelectronics Pty. Ltd. (ISPL, Australia), HyVista Corp.	ITRES Research Limited (http://www.itres.com)		Geophysical Environmental Research (Ger) corp., Germany/ DLR	MBB (DSS), GKSS, DLR Institute of Optoelectronics	Spectral Imaging LTD (SPECIM) http://www.specim.fi/	Spectral Imaging LTD (SPECIM) http://www.specim.fi/
Quelle	http://www.gtc.o.de/ , http://141.84.50.12/frameSet.htm (LMU Institut für Geographie)	http://aviris.jpl.nasa.gov/cgi/flight/cgi	www.hyvista.com , http://www.intspec.com , www.gfc.potsdam.de	http://www.itres.com/docs/casi2.html		http://www.itres.com/docs/casi3.html	http://www.op.dlr.de/dais/dais.htm (Stand 2003); Kramer, H.J. (1996)		

Abbildung 1: Vergleich von flugzeuggetragenen Hyperspektralsensoren

2.2 Skalenspezifische hyperspektrale Fernerkundung

2.2.1 Skala 1 – Speziallaborversuch

Speziallaborversuche – AISA- EAGLE/HAWK – 400-2500nm,

Level 1: 1x1 m Versuchspartellen, Vegetationsdecke

Laboruntersuchungen bieten die einmalige Möglichkeit, systematische Untersuchungen von kausalen Zusammenhängen zwischen abbildenden Hyperspektralinformationen und einer Vielzahl von physikalisch/chemisch und biochemischen Parametern der zu untersuchenden Zielgrößen durchzuführen. Es kann hierbei die spektrale Response von beispielsweise Vegetation unter differenzierten Szenaren (Trockenstress, CO₂ Schwermetallbelastung, Wirkung von Pflanzenschutzmitteln u.a.) in einem hohen zeitlichen Aufnahmeturnus (2x wöchentlich) untersucht werden. Somit bieten sich umfangreiche Möglichkeiten zum Monitoring von einerseits parallel gemessenen physikalisch/chemischen Pflanzen- und Bodenparametern (LAI, Chlorophyllanteil a/b, Photosyntheseaktivität, Biomasse, C/N-Verhältnis der Pflanze, Bodenfeuchte Matrixpotenzial des Bodens) und den abbildenden hochauflösenden Hyperspektralinformationen. Ein entscheidender Vorteil von Laborversuchen ist weiterhin, dass die durchgeführten Messungen immer unter den gleichen Randbedingungen wie Lichtquelle (Halogenlampen mit 4x2000W, Einstrahlungswinkel, Sensorhöhe) durchgeführt werden. Für die Hyperspektralmessungen wurde eigens hierfür eine ca. 3x3x3m große Dunkelkammer aus lichtundurchlässigem Stoff konstruiert. Somit ist gewährleistet, dass während der gesamten Versuchsreihe keine störenden Faktoren wie unterschiedliche Strahlungseinflüsse, Einstrahlungswinkel, Aufnahmehöhe einwirken, die eine klare Differenzierung des Spektralsignals und damit Untersuchung von Ursache-Wirkprozessen in der Hyperspektralfernerkundung unmöglich machen. In der Abbildung 2 ist der Versuchsaufbau im Speziallabor sowie Beispiele von Hyperspektraldaten aus vorliegenden Messuntersuchungen von Sommergerste bei unterschiedlichen Trockenstressszenarien dargestellt.

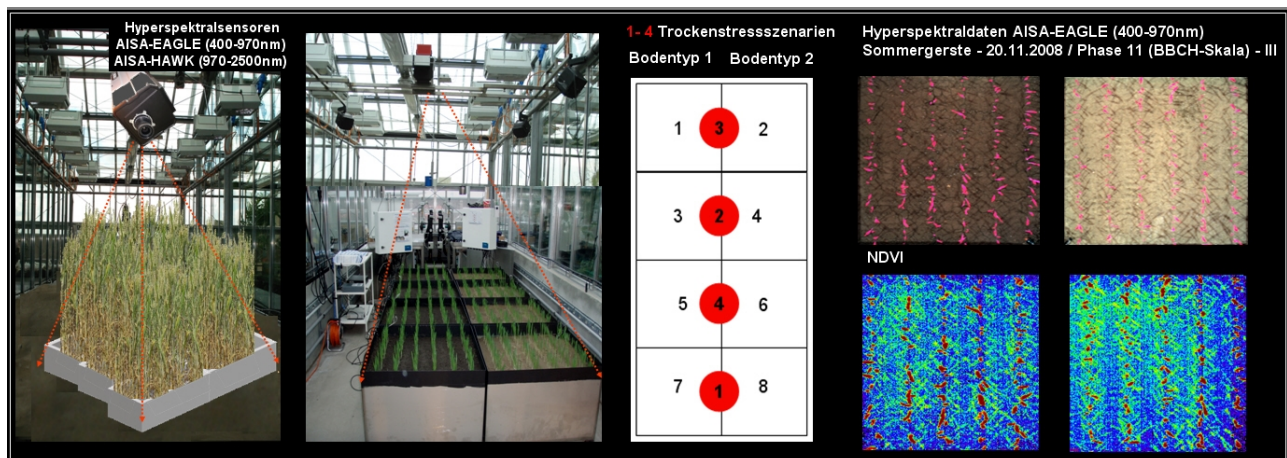


Abbildung 2: Einsatz des Hyperspektralsensors AISA-EAGLE im Speziallabor des UFZ-Bad Lauchstädt zur Untersuchung kausaler Zusammenhänge zwischen physikalischen und chemisch/biochemischen Parametern und dem Hyperspektralsignal bei Sommergerste für unterschiedlichen Trockenstressszenarien

2.2.2 Skala 2

Hebebühne - AISA- EAGLE/HAWK – 400-2500nm

Level 2: 20x20 m Versuchspartzen, Vegetationsdecke

Mit einer Hebebühne können Versuchspartzen mit einer Flächenausdehnung von ca. 20x20m untersucht werden. Bei diesen Versuchen werden beide Hyperspektralsensoren (AISA-EAGLE/HAWK), an der Hebebühne montiert. Ziel dieser Untersuchungen ist die Erfassung kausaler Zusammenhänge zwischen abbildenden Spektralsignalen und den gemessenen Zielgröße unter in vitro Bedingungen. Erste Versuchsreihen sind ab 2009 an 24 wägbaren Lysimetern in Brandis vorgesehen. Neben den auch im Laborversuch gemessenen Pflanzenparametern (vgl. Skala 1) werden nun auch umfangreiche Parametern in den Lysimetern (Bodentemperatur, Bewirtschaftungsparameter, Sickerwasser, Bodenwasser) sowie Klimameßdaten (Klimastation) gemessen.

2.2.3 Skala 3

Ultraleichtflugzeug - AISA- EAGLE/HAWK 400-2500nm

Level 3: Swath = 500m, geometrische Bodenauflösung 1m, Vegetation, Boden, Fließ- und Stillgewässer, Landnutzungssysteme, Ökosysteme

Für die Durchführung innovativer praxisrelevanter Studien mit flugzeuggetragenen hochauflösenden Hyperspektraldaten wird am Umweltforschungszentrum ein Ultraleichtflugzeug (Trike, D-MUFZ) eingesetzt. Mit dem Trike als Sensorplattform werden Hyperspektraldaten hoher räumlicher als auch zeitlicher Auflösung unter in vitro Landschaftsbedingungen aufgenommen (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 5). In Abbildung 3 ist der Einbau des Hyperspektralsensors AISA-EAGLE mit der GPS/INS Einheit (RT3100) am Ultraleichtflugzeug sowie das UL selbst im Einsatz zu sehen. Bei der Nutzung eines Trikes als Sensorplattform müssen unterschiedliche Vor- und Nachteile abgewogen werden müssen.

Vorteile der Nutzung eines Ultraleichtflugzeug (Trike):

- Zeitliche Flexibilität (hohe Wiederholrate der Aufnahmen)
- Unabhängigkeit in Projektplanung, Durchführung der Flugzeugkampagnen
- Piloten, Operator sind Mitarbeiter der Forschungseinrichtung
- Geringe Haltungs- Instandsetzungs- und Wartungskosten für ein Trike
- Konstruktion des Trikes ermöglicht vielfältige Einsatzgebiete im Ausland (Verpackung von Flugzeug)

Nachteile der Nutzung eines Ultraleichtflugzeug (Trike):

- Höherer Einfluss der Thermik auf die Flugzeugstabilität
- Schwierigere Handhabung für den Operator auf dem Flugzeug
- Räumliche Ausdehnung der Aufnahmegebiete begrenzt (bis ~10 km²)



Abbildung 3: Eingebauter Hyperspektralsensor AISA-EAGLE (400-970nm) sowie GPS/INS im Ultraleichtflugzeug (Trike) des UFZ

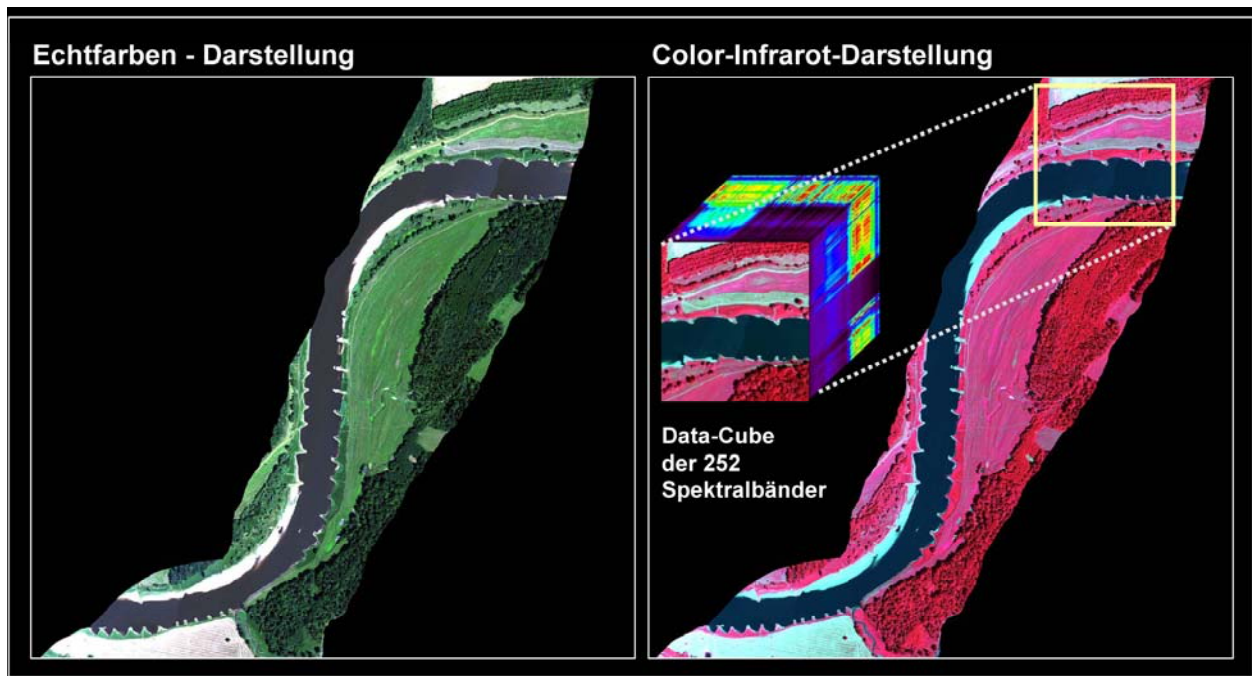


Abbildung 4: „Schleusenheger Wiesen“ bei Dessau, Aufnahme mit Hyperspektralsensor AISA-EAGLE, 400-970nm, 1m Bodenauflösung, 252 Spektralbänder, Aufnahmedatum 03.07.2008 mit dem UL des UFZ, Dr. Angela Lausch

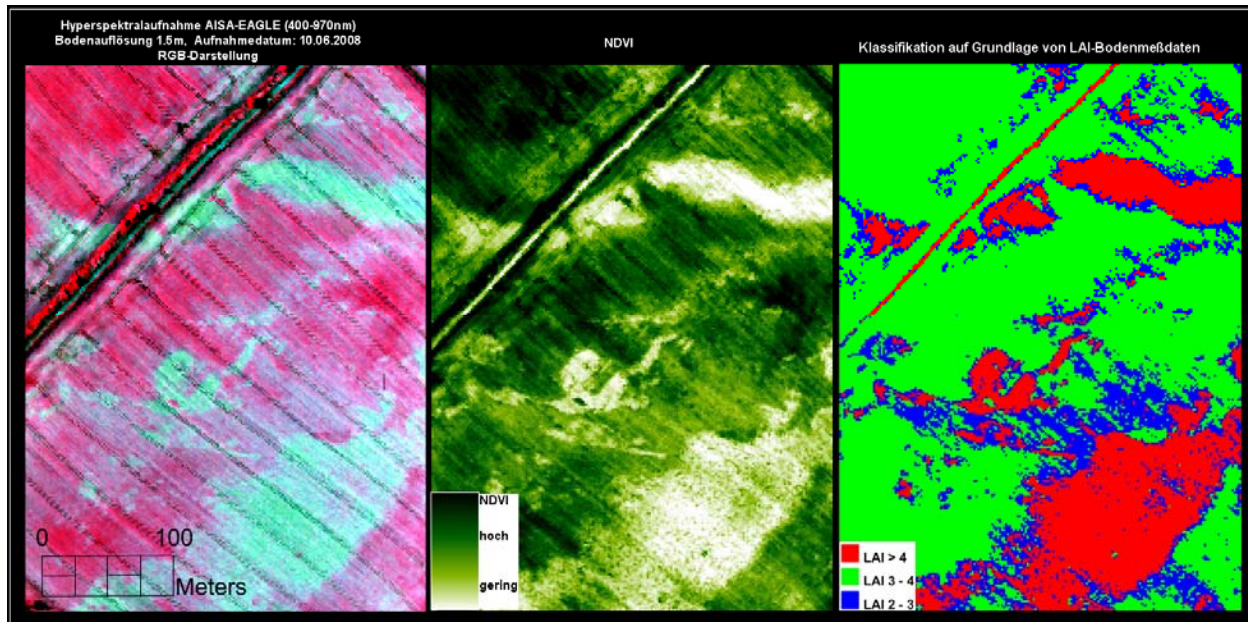


Abbildung 5: Hyperspektralaufnahme AISA-EAGLE (400-970 nm), Bodenauflösung 1,5m, Wintergerste, Aufnahmedatum 10.06.2008, RGB-Darstellung, NDVI Berechnung, Klassifikationsergebnis (Spectral Angle Mapper) auf Grundlage von LAI-Bodenmessdaten

3 Zusammenfassung

Mit der Entscheidung zum Aufbau einer forschungseigenen Hyperspektralfernerkundung wurde ein entscheidender Schritt in der Hyperspektralforschung getan. Durch den Kauf der beiden Sensoren AISA-EAGLE und AISA-HAWK sowie das Ultraleichtflugzeug als Sensorplattform wird eine enorme Flexibilität in der Anwendung, Planung, Durchführung und Auswertung von eigens gewonnener Hyperspektralinformationen erreicht. Die am UFZ aufgebauten 3 Skalen der hyperspektralen Fernerkundung bieten für die Zukunft ein planbares Forschungsinstrument, mit dessen Hilfe einerseits kausale Zusammenhänge zwischen Objektzuständen und Spektroskopie sowie andererseits eine raum-zeitliche Quantifizierung und Monitoring von Vegetation/Boden/Wasser sowie deren Zustände in der Landschaft möglich sind.

4 Literaturverzeichnis

MÄKISARA, K., M. MEINANDER, M. RANTASUO, J. OKKONEN, M. AIKIO, K. SIPOLA, P. PYLKKÖ AND B. BRAAM, 1993: Airborne Imaging Spectrometer for Applications (AISA), Digest of IGARSS'93, 2, 479– 481 (Tokyo, Japan), 1993.