

*****06/02		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>26805</b>	Referat	<b>34</b>	Fördersumme	<b>444.436,- €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Entwicklung eines preiswerten und flexiblen fernerkundungs-  basierten Systems zur Entscheidungsunterstützung für die  umweltgerechte Landnutzung</b> (ADLER: Autonom fliegende Drohnen für die umweltgerechte Landbewirtschaftung)			
<b>Stichworte</b>		Landwirtschaft, Pflanzenproduktion, Fernerkundung, Teilflächenbewirtschaftung			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>3 Jahre</b>	<b>15.12.2009</b>	<b>14.12.2012</b>	<b>3</b>		
<b>Bewilligungs- empfänger</b>		Humboldt-Universität zu Berlin vertreten durch die:  Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät  Fachgebiet für Tierhaltungssysteme und Verfahrenstechnik Philippstraße 13 10115 Berlin  Homepage: <a href="http://www.agricopter.de">http://www.agricopter.de</a>		Tel 030/2093-6402  Fax 030/2093-8751  Projektleitung Prof. Dr. Ruprecht Herbst Bearbeiter	
<b>Kooperations- partner</b>		a) Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik, Fachgebiet für Kognitive Robotik Rudower Chaussee 25, 12489 Berlin  b) Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam  c) Rucon Engineering Umgehungsstraße 78 b, 99441 Mellingen / b. Weimar			
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>					

# Abschlussbericht

**Autoren: R. Herbst, V. Hafner, F. Bachmann, J. Ruppe, M. Milbradt, R. Gebbers**

## Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	4
2	Anlass und Zielsetzung .....	5
2.1	Umweltrelevanz und Precision Farming.....	5
2.2	Fernerkundung und Precision Farming.....	6
2.3	Zielsetzung ADLER .....	7
3	Methoden und Ergebnisse.....	8
3.1	Technik Agricopter.....	8
3.1.1	Arbeitsschritte, Methoden und Ergebnisse 2010.....	8
3.1.1.1	Basisplattform.....	8
3.1.1.2	Erweiterungen .....	9
3.1.2	Arbeitsschritte, Methoden und Ergebnisse 2011.....	10
3.1.2.1	Kameras.....	10
3.1.2.2	Bordrechner.....	12
3.1.2.3	Zusatzsensoren .....	12
3.1.3	Arbeitsschritte, Methoden und Ergebnisse 2012.....	13
3.1.3.1	Photogrammetrie .....	14
3.1.3.2	Kameras.....	16
3.1.3.3	Zusatzsensoren .....	17
3.1.3.4	Bordrechner.....	17
3.1.3.5	Kopter.....	18
3.1.3.6	Vignettierungskorrektur.....	19
3.1.4	Zusammenfassung Ergebnisse .....	21
3.2	Bilddauswertungen und Feldversuche .....	22
3.2.1	Untersuchungen zur Beleuchtung.....	23
3.2.2	Untersuchungsgebiet und Methodik Feldversuche 2010 bis 2012 .....	24
3.2.3	Ergebnisse 2010.....	26
3.2.4	Ergebnisse 2011.....	29
3.2.5	Ergebnisse 2012.....	35
3.2.6	Schlussfolgerungen und Algorithmus.....	39
3.3	Methodik zur Bereitstellung des Stickstoffdüngungsplans.....	40
3.3.1	Methode Bestimmung des Stickstoffbedarfs .....	40
3.3.2	GIS-Modul zur Verarbeitung und Auswertung der photogrammetrischen Daten (Luftbilder) und Erstellung der Streukarte .....	40
4	Diskussion und Zielerreichung .....	42
4.1	AP 1: Fernerkundungssystem .....	42
4.2	AP 2: Modelle und Algorithmenentwicklung für die Entscheidungsfindung.....	42
4.3	AP 3: Web-basiertes System für Daten- und Workflow-Management .....	43
5	Öffentlichkeitsarbeit.....	43
6	Danksagung .....	44
7	Literaturverzeichnis .....	44
8	Anhang.....	45
8.1	Öffentlichkeitsarbeit .....	45
8.2	Versuchsanordnungen auf dem Gelände des Bundessortenamts Marquardt.....	47

## Abbildungsverzeichnis

Abb.1: Der Agricopter.....	8
Abb.2: Agricopter Prototyp Stand 2010 basierend auf dem Oktokopter der Firma HiSystems GmbH mit fixer Digitalkamera.....	10
Abb.3: Kennlinien des für die NIR-Kamera eingesetzten Sensors ohne Filter und des Tageslichtsperrfilters.....	11
Abb.4: Beispiele geometrisch korrigierte Bilder RGB(links)- und NIR(rechts), Stand 2010. Aufnahmen vom Oktokopter ( HiSystems GmbH) mit fixer Digitalkamerachse . (Versuchsfläche ATB, Marquardt).....	11
Abb. 5: Im Projekt entwickelte Kameraaufhängung zum Ausgleich der Schiefelage des Kopters mit integrierten Winkelsensoren.....	12
Abb. 6: Zeitlicher Verlauf des X-Beschleunigungswerts (Rohdaten) während eines Fluges mit unterschiedlichen Akku-Positionen links und rechts.....	13
Abb.7: Beispielaufnahme eines Bore sight-Calibration-Flugs mit eingemessenen Referenzpunkten .....	13
Abb. 8: Bildschirmfoto aus Agisoft PhotoScan. Zu sehen ist eine aus Luftbildern rekonstruierte Fläche (Praxisfeld Thüringen Görsbach) und die rekonstruierten Kamerapositionen und Ausrichtungen (blaue Quadrate oben).....	14
Abb. 9: Lagegenauigkeit der Messpunkte (Vektoren in der linken Darstellung 2-fach überhöht dargestellt), rechte Grafik stellt die Zunahme des Fehler vom Bildmittelpunkt dar .....	15
Abb.10: Bodenkontrollmessung des generierten Orthofotos mit den Kontrollpunkten (rot), den entsprechenden RTK-GPS-Messpunkten (gelb) und den vektoriellen Abweichungen (blau) skaliert um den Faktor 10. Die aufgenommene Fläche ist ca. 550x550 m groß. .16	
Abb.11: Monochrom-Kamera 2012 mit demontierter Objektivhalterung und Neutralfilter ....	17
Abb.12: Komplettes Kamerasystem 2012 mit (unten) beiden Kameras in schwenkbarer Kameraaufhängung ohne Winkelsensoren; (rechts) GPS-Empfänger in Einfassung, die während des Fluges an der Spitze des Kopters montiert ist; (oben) Bordrechner und Adapterplatine mit Verbindung zu den Kameras und dem GPS-Empfänger.....	18
Abb.13: Agricopter 2012 mit konstruiertem Kamerasystem .....	19
Abb. 14: Beispielaufnahme aus der Vignettierungsmessreihe. Das Zielobjekt ist die Fläche innerhalb des schwarzen Kreises. ....	20
Abb. 15: Vignettierungsmessreihen und berechnete Modellkurven. Messpunkte und Kurven wurden normalisiert. ....	20
Abb. 16: Beispielaufnahmen in NIR (links) und VIS (rechts), jeweils im Original (oben) und mit Vignettierungskorrektur (unten).....	21
Abb. 17: NDVI-Karte, die mithilfe des beschriebenen Systems generiert wurde. Die Karte deckt eine Fläche von ca. 550x550 m ab und wurde in drei direkt aufeinander folgenden Flügen aufgenommen (siehe Abbildung 9 für die entsprechenden RGB-Daten). ....	22
Abb. 18: Links: Spektrale Reflektion von Winterweizen in Abhängigkeit von der N-Düngung zu Schossbeginn (BBCH 32). Rechts: Zeitlicher Verlauf des NDVI. (Versuchsstandort Marquardt, N0: keinen N-Düngung, N1: niedrige N-Düngung, N2: mittlere N-Düngung, N3: hohe N-Düngung).....	23
Abb. 19: Beziehung zwischen NDVI bei Bewölkung und Sonne zu zwei Terminen (21.05 und 19.06) .....	24
Abb. 20: Beispiel für die die Approximation des Blattflächenindex (aBFI) durch RGB-Aufnahmen am Boden und Bildverarbeitung. Dargestellt sind Bestände mit minimalen, medianen und maximalen aBFI zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt. Die Aufnahmezeitpunkte entsprechen Wachstumsstadien, zu denen üblicherweise die zweite und dritte N-Düngung erfolgt.....	27
Abb. 21: Box-Whisker Plot des GreenNDVI nach N-Düngungsstufen gegen (Minimum, Quartil, Median, Mittelwert, oberes Quartil, Maximum).....	30
Abb. 22: Regression GreenNDVI gegen Trockenmasse in t/ha .....	32
Abb. 23: Regression GreenNDVI gegen N% über beide Schnitzeitpunkte.....	32

Abb. 24: Regression GreenNDVI gegen Trockenmasse in t/ha, getrennt nach Schnittzeitpunkten .....	33
Abb. 25: Regression GreenNDVI gegen N%, getrennt nach Schnittzeitpunkten .....	34
Abb. 26: Box-Whisker Plot des GreenNDVI gegen die N-Düngungsstufen (Minimum, Quartil, Median, Mittelwert, oberes Quartil, Maximum) .....	36
Abb. 27: Regression GreenNDVI gegen Trockenmasse zu den drei Schnittzeitpunkten.....	37
(BBCH 40, 60, 71) .....	37
Abb. 28: Regression GreenNDVI gegen Stickstoffkonzentration über alle drei Schnittzeitpunkte .....	38
Abb. 29: Entscheidungsunterstützungssystem ADLER für die variable Applikation von N-Düngern in Winterweizen.....	39
Abb. 30: GIS-Modul ADLER, Düngungsberechnung. Rasterzellen mit extremen Werten sind grün (hoch) und rot (niedrig) markiert .....	41

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Datengewinnung 2010-2012.....	26
Tab. 2: Korrelationsmatrix Spektraldaten und aBFI .....	28
Tab. 3: Korrelationsmatrix Spektraldaten, Biomasse und aBFI.....	29
Tab. 4: Varianzanalyse GreenNDVI gegen Sorte und N-Düngung .....	30
Tab. 5: Signifikante Unterschiede des NDVI in den Düngungsgruppen (Methode: 95.0 Prozent LSD).....	31
Tab. 6: Korrelationen zwischen GreenNDVI und Stickstoffgehalt (aktuell und kritisch).....	33
Tab. 7: Korrelationen zwischen GreenNDVI und Stickstoffgehalt (aktuell und kritisch).....	34
Tab. 8: Korrelationsmatrix zwischen modellierten und tatsächlichen Daten auf den Praxisflächen (*.1 Modellschätzungen).....	35
Tab. 9: Varianzanalyse GreenNDVI gegen N-Düngung und Beregnung.....	36
Tab. 10: Signifikante Unterschiede des NDVI in den Düngungsgruppen (Methode: 95.0 Prozent LSD nach Fischer).....	37
Tab. 11: Korrelationen zwischen GreenNDVI und Stickstoffgehalt (aktuell und kritisch).....	38

## 1 Zusammenfassung

Das ADLER-Projekt hat Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Anwendung von UAS (Unmanned Aircraft System) in der Landwirtschaft durchgeführt. Über die 3-jährige Projektlaufzeit wurde ein Prototyp eines UAS für die umweltgerechte Landbewirtschaftung entwickelt und in Feldversuchen getestet. Parallel hierzu wurden Algorithmen und ein DSS (Decision Support System) für die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung als ein Anwendungsfall implementiert.

Im ersten Projektjahr 2010 wurden die Flugeigenschaften der UAS-Basisplattform (Oktokopter der Firma Hi-Systems GmbH, Agricopter als Synonym für das UAS in ADLER) in vielen Feldversuchen bei unterschiedlichen Wetterbedingungen getestet und optimiert und bei diesen Testflügen Bilder aus unterschiedlichen Höhen aufgenommen. Die hierbei gesammelten Erfahrungen haben gezeigt, dass die Flugeigenschaften sowie die autonome Wegstreckenbefliegung auch unter stärkeren Windbedingungen ausgesprochen erfolgreich verliefen. Aufbauend auf diesen Erfahrungen wurde der Oktokopter als fliegende Plattform für die nächsten Projektjahre ausgebaut und weiterentwickelt. Neben den Arbeiten an dem Agricopter und der Auswahl der Kameras wurden 2010 umfangreiche Feldversuche auf den Versuchsbetrieben in Brandenburg und Thüringen angelegt und ausgewertet. Hierbei wurden mit einem Handspektrometer gemessene Felddaten sowie Informationen aus der Flugzeugfernerkundung im Hinblick auf Blattflächenindex und Biomasse ausgewertet. Ein erster, robuster und praxistauglicher Algorithmus für die ortsspezifische Stickstoffdüngung konnte schon im ersten Jahr entwickelt werden.

Im Projektjahr 2011 hat sich das ADLER Projekt im Zuge der Weiterentwicklung der Technik am Agricopter intensiv mit der Entscheidung für die zukünftig zu nutzenden digitalen Kameras auseinandergesetzt. Auf dem Kopter wurden zwei Industriekameras installiert, die das Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich rot, grün und blau (400-680 nm) sowie im nahen Infrarot (680-900 nm) erfassen. Für diese Kameras wurde eine Pan-Tilt-Vorrichtung konstruiert, die Nadir-Aufnahmen während des Fluges gewährleistet. Ergänzend wurde die notwendige Bordelektronik zur Ansteuerung der Kameras und ein GPS-Empfänger integriert. Weiterhin hat das Projekt auf dem Gebiet der Photogrammetrie für die Erstellung von georeferenzierten Orthofotos geforscht. Insbesondere die Verzeichnungskorrektur für die Kameraobjektive sowie die notwendigen zusätzlichen Sensorinformationen und Genauigkeiten standen im Fokus der Untersuchungen, da diese entscheidenden Einfluss auf die geometrische Genauigkeit der Orthofotos haben. Neben den Arbeiten am Agricopter wurden 2011 umfangreiche Feldversuche in Brandenburg und Thüringen angelegt und ausgewertet. Auf dem Gelände des Bundessortenamts in Marquardt bei Potsdam wurden neben den Praxisflächen auf den Versuchsbetrieben Blockanlagen mit Stickstoffsteigerungsversuchen vom ADLER-Projekt mitbetreut, um die von uns entwickelten Algorithmen zu testen. Hierbei haben wir als einen möglichen Ansatz die optische Schätzung des Nitrogen Nutrition Index (NNI) untersucht. Der NNI dient zur quantitativen Abschätzung des Stickstoffbedarfs von Winterweizen. Nach unseren eigenen Untersuchungen korreliert der NNI mit dem Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI), den wir aus Bilddaten unseres dualen Kamerasystems ableiten können. Die GIS-gestützte Einbindung der Algorithmen in ein Entscheidungssystem für die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung wurde weiterentwickelt, sodass eine zeitnahe Applikation der Dünger gewährleistet werden kann. Die hierfür notwendigen und umfangreichen Programmierarbeiten wurden größtenteils 2011 im GIS-Modul ADLER realisiert.

Im Forschungsjahr 2012 wurden weiterhin im Detail an Hard- und Softwarelösungen für den Agricopter geforscht. So wurde aufgrund unbefriedigender Ergebnisse im Bereich der Photogrammetrie eine neue Software zur Erstellung der georeferenzierten Orthofotos eingesetzt (PhotoScan von Agisoft). Die geometrische Genauigkeit der Orthofotos wurde mithilfe eines Feldversuchs untersucht. Zusätzlich wurden verschiedene Arbeiten an der Hardware in Richtung Produktreife durchgeführt. So wurden neue robustere Kameras, ein neuer Bordrechner sowie ein neues GPS integriert und die Software für die Luftbilderstellung fertig gestellt. Zusätzlich wurden Arbeiten zur Vignettierungskorrektur der Luftbilder durchgeführt. Neben den Arbeiten auf dem Gebiet der Technologieentwicklung und Bildverarbeitung wurden die umfangreichen Feldversuche aus den Jahren 2010 und 2011 weitergeführt. Hierbei wurde aber aus logistischen Gründen die Praxisversuche auf einer Fläche in der Nähe von Potsdam Bornim realisiert. Auf den Flächen des Bundessortenamts in Marquardt wurden die Parzellenversuche aus 2011 entsprechend in 2012 weitergeführt und vielfältige Daten erhoben für die Auswertung der UAS-Bilder. Der in 2011 gewählte Ansatz des NNI als Grundlage für die Abschätzung des Stickstoffbedarfs der Pflanze stand auch in diesem Forschungsjahr im Fokus der Untersuchung. Die Algorithmen und Ergebnisse aus den Versuchsjahren 2010 bis 2012 dienten auch 2012 dazu, die GIS Software ADLER zu verbessern und notwendige Implementierungen zu realisieren.

## **2 Anlass und Zielsetzung**

### **2.1 Umweltrelevanz und Precision Farming**

Precision Agriculture ermöglicht es, bei Bewirtschaftungsmaßnahmen die kleinräumige Standort- und Bestandesheterogenität innerhalb von Schlägen durch moderne Informations- und Regelungstechnik besser zu berücksichtigen. Die neuen Technologien ermöglichen eine gezielte und bedarfsgerechte Anpassung von Maßnahmen und Strategien an die Standort- und Bestandesunterschiede. Hierbei wird mit Hilfe von Positionierungssystemen, Sensoren und Aktoren ein Informations- und Managementkreis aufgebaut, der bei ortsbezogener Ertragsdatenerfassung beginnt und über Bodenbearbeitung, Aussaat, Düngung und

Pflanzenschutz die Umsetzung der Strategie einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung ermöglicht. Inzwischen gibt es in der Literatur vielfältige Untersuchungen aus großen Verbundprojekten zu den Umwelt- und Naturschutzaspekten von Präzisionslandwirtschaft (pre agro, FAM-Projekt, IKB Dürmast). In Bezug auf die Erreichung von Umweltqualitätszielen und Nachhaltigkeit durch die Nutzung von Precision Agriculture kann z. B. die Effizienz der Stickstoffverwertung verbessert werden. Untersuchungen haben ergeben, dass bei teilflächenspezifischer N-Düngung die  $N_{\min}$ -Gehalte im Boden nach der Ernte geringer waren als bei einheitlicher Düngung. Ähnliche Ergebnisse wurden auch für die Simulation regionaler Stoffbilanzen erzielt. Hierbei konnte eine deutliche Verbesserung der N-Bilanz festgestellt werden.

Effizienzreserven zur Sicherung von Nachhaltigkeitszielen bestehen bei bedarfsgerechten, an den Standort und die Bestandesheterogenität angepassten Maßnahmen. Voraussetzung hierfür ist ein exaktes Wissen über Speicherung und Dynamik von Stoffen die auch für abiotische (Boden, Wasser, Luft) und biotische (Flora, Fauna) Schutzgüter relevant sind. Darauf aufbauend können Produktionsfaktoren (Dünger, Energie, Saatgut) so eingesetzt werden, dass unerwünschte Ein- und Austräge aus Agroökosystemen verringert werden können.

Die kleinräumige Heterogenität von Böden und Pflanzenbeständen ist vielen Landwirten bekannt. Bislang wurden von den meisten von ihnen jedoch lokale Über- und Unterversorgungen akzeptiert, da der Aufwand für Precision Agriculture als zu hoch angesehen wurde. Die Erfassung der agronomisch relevanten räumlichen und zeitlichen Heterogenitäten innerhalb von Schlägen ist für Precision Farming von entscheidender Bedeutung, weshalb vorab eine zielgenaue, auf die Anwendung ausgerichtete Probenahmeplanung zu erarbeiten ist. Geostatistische Untersuchungen zeigen, dass aufgrund der kleinräumigen Heterogenität die mit konventionellen Verfahren erzielbare bzw. bezahlbare Probenahmedichte vielfach nicht ausreicht, hinreichend genaue Aussagen über die Flächen zu liefern. Es müssen daher Methoden zur hochauflösenden und effizienten Erhebung von Flächendaten entwickelt werden, die mit geeigneten Entscheidungssystemen verarbeitet werden können.

## **2.2 Fernerkundung und Precision Farming**

Bildgebende Fernerkundungssysteme werden heute im Agrarsektor vielfältig eingesetzt. Besonders bewährt haben sie sich bei der großräumigen Datenerfassung (Länder bis Regionen). So setzten Behörden Fernerkundungsdaten zur Überwachung des GAP-Abkommens oder bei der Umwelt- und Naturschutzplanung ein (Bodenschutzgesetz, Naturschutzgesetz, EU-Öko-Verordnung, EU-Wasserrichtlinie, Vogelschutzrichtlinie, FFH-Richtlinie). Bei der kleinräumigen Datenerfassung im landwirtschaftlichen Unternehmen, d.h. auf Betriebsebene, hat sich die Fernerkundung jedoch noch nicht umfassend durchsetzen können, obwohl hierfür mit den Technologien des Precision Farming gute Rahmenbedingungen gegeben sind und in den letzten Jahren intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten geleistet wurden.

Die Potenziale von Fernerkundungsbildern zur Erfassung von räumlichen Variationen auf Schlägen und die Ableitung von ortsspezifischen Bewirtschaftungsmaßnahmen sind durch viele wissenschaftliche Studien belegt. Als pflanzenbaulich relevante Parameter wurden unter anderem der Tongehalt im Oberboden, die Biomasseverteilung, die Chlorophyllkonzentration, Wasserstress und Schädlingsbefall erkannt. Daher gibt es seit langem das Bestreben, Daten der Satelliten- und Flugzeugfernerkundung als Instrument der ortsspezifischen Pflanzenproduktion in der Praxis zu etablieren. Neuere Satellitensysteme wie z.B. Spot, Quick Bird, Rapid Eye versprechen eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung der Bilder mit für die Landwirtschaft attraktiven Spektralbereichen. Satellitenfernerkundung hat jedoch auch eine Reihe von Nachteilen: der hohe Investitionsbedarf für Satelliten, Sensoren und Bodenstationen führt dazu, dass erst bei der Abnahme großer Datenmengen akzeptable Hektar-Preise angeboten werden können. Die Transformation der Satellitenbilder in pflanzenbaulich verwertbare Informationen erfordert einen zeitnahen Abgleich mit

Erhebungen am Boden (ground truthing). Dies muss im Unterschied zu großräumigen Auswertungen für Zwecke des Precision Farmings kleinräumig, d.h. oftmals auch schlagweise erfolgen. Ein noch gravierenderes Problem sind Störungen durch Wolken. Da die Aufnahmepositionen und -zeiten bei Satelliten weitgehend festgelegt sind, kann auf Bewölkung nicht flexibel reagiert werden. Oftmals fehlen daher über längere Zeiträume geeignete Aufnahmen. Als Entscheidungsgrundlage für die meist zeitkritischen Maßnahmen in der Landwirtschaft ist dies nicht akzeptabel. Die flugzeuggestützte Fernerkundung ist im Vergleich zur Satellitenfernerkundung flexibler. Auch sind die Investitionskosten gegenüber Satelliten wesentlich geringer, so dass von einigen Dienstleistern „Low-Cost-Befliegungen“ für die Landwirtschaft angeboten werden. Dennoch bestehen auch hier die Probleme der Bewölkung und der immer noch hohen Kosten, so dass auch flugzeuggestützte Systeme nicht routinemäßig zur Datenerhebung und operativen Entscheidungsfindung für die ortsspezifische Bewirtschaftung eingesetzt werden.

Die rasante Entwicklung in den letzten Jahren auf dem Gebiet der unbemannt autonom fliegenden Systeme (UAS) führt dazu, dass solche Flugplattformen mehr und mehr in den Fokus von Forschern geraten. Auch gibt es schon Dienstleister, die für spezifische Fragestellungen Drohnensysteme anbieten. Trotz vielfältiger Gruppen, die an solchen Systemen arbeiten, gibt es aber bisher noch kein praxistaugliches System, das von Dienstleistern für die Landwirtschaft angeboten wird. An dieser Stelle nimmt das ADLER-Projekt eine Vorreiterrolle ein.

### **2.3 Zielsetzung ADLER**

Ziel des Projektes ist, ein integrales, praxistaugliches System aus Datengewinnung, Datenverarbeitung und Bewertungsalgorithmen zu entwickeln. Das System **ADLER** soll zuverlässig, flexibel und einfach zu handhaben sein, um bei zeitkritischen Aufgaben, wie z.B. der Stickstoffdüngung durch Berater vor Ort zeitnahe Managementempfehlungen zu geben. Das Entscheidungsunterstützungssystem besteht aus folgenden Komponenten:

- Low-cost Fernerkundungssystem (Agricopter, Prototyp Abbildung 1)
  - Unbemannter, weitgehend autonom navigierender Quadrocopter zur einfachen und kostengünstigen Erzeugung von multitemporalen und multispektralen Luftbildern des Bodens und Bestandes
- Bildverarbeitung
  - Automatisierte Bilddatenverarbeitung welche auf die spezifischen Gegebenheiten des Fernerkundungssystems und die Anforderungen der Entscheidungsunterstützung zugeschnitten ist
- Modelle und Algorithmen zur Entscheidungsunterstützung
  - Modell auf Basis robuster Methoden
  - Algorithmen zur Ableitung bodenbürtiger Ertragspotenziale, des Ernährungszustandes der Pflanzen und der teilflächenspezifischen Applikationsmengen anhand von Fernerkundungsbildern und weiteren ggf. verfügbaren Daten.
- Web-basiertes Daten- und Workflow-Management
  - Verwaltung von Daten aus unterschiedlichen Quellen (Landwirt, Dienstleister, Verwaltung)
  - Schneller und standardisierter Datenaustausch
  - Erzeugung von Applikationskarten.



Abb.1: Der Agricopter

### **3 Methoden und Ergebnisse**

Nachfolgend werden die Methoden und Ergebnisse für das Entscheidungsunterstützungssystem ADLER beschrieben.

#### **3.1 Technik Agricopter**

##### **3.1.1 Arbeitsschritte, Methoden und Ergebnisse 2010**

Im Projektjahr 2010 wurden Arbeiten zur Basisplattform des Agricopters durchgeführt und zusätzliche Erweiterungen an der Basisplattform vorgenommen.

###### **3.1.1.1 Basisplattform**

Im Projektjahr 2010 wurden zunächst verschiedene Anbieter von Multikopter-Systemen evaluiert und kontaktiert. Da das System möglichst kostengünstig realisiert werden sollte, fiel die Wahl auf die Mikrokopter-Systeme der Firma HiSystems. Diese Systeme sind preiswert, da sie als Bausatz angeboten werden. Zusätzlich besaß der Lehrstuhl Kognitive Robotik schon seit längerer Zeit Erfahrungen mit diesen Systemen. Als Optimum was Größe, Flugdauer und Traglast angeht, wurde das Oktokopter-System der Firma HiSystems als Basisplattform für das Projekt ADLER ausgewählt (siehe Abbildung 2).

Der Oktokopter besitzt wesentliche Grundfunktionen wie die automatische Stabilisierung des Kopters in der Luft sowie dessen Steuerung mithilfe von Funkfernsteuerung oder GPS. Die dafür notwendigen Sensortechnologien bestehen aus einer IMU (Inertial Measurement Unit) mit Beschleunigungssensoren und Gyroskopen, einem barometrischen Drucksensor sowie ein Kompassmodul und GPS-Empfänger.

Im Projektjahr 2010 wurden zahlreiche Tests auf Praxistauglichkeit für den angestrebten Einsatz im Agrarsektor durchgeführt. Zusätzlich wurde der Erweiterungsbedarf des vorhandenen Systems spezifiziert und mit entsprechenden Entwicklungsarbeiten begonnen.

Hierfür wurde zunächst das System Oktokopter von Mikrokopter aufgebaut und ersten Testflügen ohne Kamerasystem unterzogen. Ab dem Frühjahr begann dann eine Serie von Testflügen mit einem vorläufigem Kamerasystem unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Fragestellungen.

Bei den ersten Testflügen stand vor allem die Frage der angestrebten Flughöhe im Mittelpunkt. Als Kompromiss zwischen Öffnungswinkel der Kamera, Flugzeit sowie angestrebter Flächenabdeckung bildete sich dann ein Bereich zwischen 100 und 140 Metern als wünschenswerte Flughöhe heraus. Um diese Flughöhen zu realisieren, mussten im Weiteren technische Herausforderungen gelöst werden.

Zunächst musste sichergestellt sein, dass auch in dieser Höhe und großen Entfernungen noch ein Kontakt zur Drohne hergestellt werden kann. Dies betrifft die Fernbedienung, so dass auch bei einem autonomen Flug der Operator weiterhin im Notfall eingreifen kann. Dazu wurden verschiedene Fernsteuerungssysteme und Antennenlösungen getestet. Weiterhin wurde das Problem der robusten Verbindung zu einem Feldrechner über ein Funksystem mit einer Richtantenne gelöst. Der Feldrechner dient dabei zur Anzeige von relevanten Flugdaten wie aktueller Position und Akkustatus.

Darüber hinaus entpuppten sich diese Flughöhen als besondere Herausforderung für den autonomen Flug unter Hilfe von GPS. Für die GPS Navigation wurde das vorhandene Mikrokoptersystem unter verschiedenen Bedingungen getestet. Die in der gewünschten Flughöhe besonders starken Winde führten dazu, dass das wegstreckenprogrammierte Fliegen nicht mehr zuverlässig funktionierte. Dabei driftete der Kopter entweder vollständig vom Kurs ab oder schaffte es nicht, seinen nächsten Wegpunkt zu erreichen. Hierfür wurden in weiteren Testflügen die einstellbaren Parameter des Systems so optimiert, dass ein relativ robuster Flug auch unter windigen Bedingungen in der gewünschten Flughöhe möglich war.

### **3.1.1.2 Erweiterungen**

Parallel zu den Testflügen mit der Basisplattform wurden weitere technische Erweiterungen vorgenommen.

Hierzu wurde zunächst eine Entscheidung bezüglich eines zusätzlichen Bordrechners getroffen, der die Ansteuerung der Kameras, die Bildverarbeitung, zusätzliche Sensorverarbeitung und Navigationsaufgaben übernehmen sollte. Es wurde ein kleiner Einplatinenrechner (BeagleBoard) ausgewählt, auf dem ein Embedded Linux zum Einsatz kam. Dieser Rechner muss u. A. mit der bereits vorhandenen Elektronik Sensordaten und Kommandodaten austauschen. Die hierzu notwendige Elektronik und Software wurde im ersten Projektjahr konzipiert und zu großen Teilen fertig gestellt.

Weitere Entwicklungen betrafen die Verbesserung der On-board-Sensoren. Im ersten Projektjahr wurde gemeinsam mit der Firma LISA Geo-Software GmbH die Anforderungen der Photogrammetrie an die Luftbildaufnahmen erarbeitet. Dabei müssen insbesondere die Parameter der äußeren Orientierung (Position und Lage der Kamera) möglichst genau für jede Luftbildaufnahme zur Verfügung stehen. Hierzu wurden erste Algorithmen zur Fusion der vorhandenen Sensorinformationen implementiert und ein zusätzliches GPS-Modul (Navilock NL-551EUSB, u-blox5) in den Kopter integriert. Diese Erweiterungen zielten darauf, die Genauigkeit der Positions- und Lageinformationen des Kopters zu erhöhen. Die Lageinformationen des Kopters müssen aber nicht identisch sein mit der Lage der Kamera, da die Kamera über eine schwenkbare Kameraaufhängung mit dem Kopter verbunden ist. Diese Pan-Tilt-Einheit ermöglicht möglichst lotrechte Aufnahmen der Kamera unabhängig von der Lage des Kopters. Um zusätzliche hochgenaue Informationen über die Ausrichtung dieser Kameraaufhängung zu bekommen, wurde gemeinsam mit der Firma BerlinVR eine neue Kameraaufhängung mit integrierten Winkelsensoren entworfen, die im Frühjahr 2011 fertig gestellt wurde.

Die letzte Erweiterung des Systems bezieht sich auf die Kamera. Bei den Flügen im ersten Projektjahr wurde noch nicht das endgültige Kamerasystem verwendet sondern eine handelsübliche Digitalkamera (Canon IXUS 100 IS). Diese ließ sich durch das CHDK (Canon Hack Developer Kit) mit frei programmierbaren Skripten ansteuern. Dies war für die Aufnahmen unerlässlich, da so nicht nur ein frei programmierbarer Intervallmodus möglich war, sondern auch wichtige Größen wie Verschlusszeit, ISO-Empfindlichkeit und Fokus manuell und über die Flugdauer konstant eingestellt werden konnten. Diese Parameter wurden auf den Einsatz der Luftbilder über einem Feld optimiert, so dass auch die von der Drohne ausgehenden Vibrationen keinen Einfluss mehr auf die Bilder hatten. Die Erfahrungen mit dieser Kamera dienen als Grundlage für die Spezifizierung des endgültigen Kamerasystem für den Agricopter. Nach Recherchen bei einschlägigen Anbietern wurde eine Entscheidung für die Produkte der Firma IDS-Imaging getroffen, die kleine USB-Board-Kameras für die notwendigen Wellenbereiche anbietet. Die Firma stellte notwendige Treiber für das Embedded-Linux-System des Bordrechners zur Verfügung, so dass die Kameras wie gewünscht über den BeagleBoard Rechner angesteuert werden können.



Abb.2: Agricopter Prototyp Stand 2010 basierend auf dem Oktokopter der Firma HiSystems GmbH mit fixer Digitalkamera.

### 3.1.2 Arbeitsschritte, Methoden und Ergebnisse 2011

Im Projektjahr 2011 wurde der Agricopter mit zusätzlicher Technik ausgerüstet. Dazu zählt das Kamerasystem, ein zusätzlicher Bordrechner, eine Inertial Measurement Unit (IMU) und das GPS System.

#### 3.1.2.1 Kameras

Das Kamerasystem des Agricopters sollte sowohl Aufnahmen im sichtbaren (VIS) Spektralbereich des Lichts als auch im nah-infraroten (NIR) Bereich ermöglichen. Als praxisrelevantes Band im Nah-Infrarot wurden die Wellenlängen zwischen 700-900 nm gewählt. Die Kameras sollten die Bilder selbstständig aufnehmen und speichern. Um die Bilder georeferenzieren zu können, sollten die Bilddaten mit IMU/GPS-Daten synchronisiert werden. Um dies möglichst einfach zu halten, sollten sowohl Kameras als auch IMU/GPS-Sensoren von ein und demselben Bordrechner angesteuert werden. Wichtig ist dabei, den genauen Zeitpunkt der Belichtung bestimmen zu können. Daher musste ein Kamerasystem gewählt werden, das über einen elektronischen Trigger verfügt. Nach ausführlicher Recherche wurde ein Kamerasystem bestehend aus zwei Kameras des Typs UI-1226LE (IDS Imaging) gewählt. Diese Kamera wird sowohl als RGB als auch als Monochromkamera angeboten. Die Monochromvariante lässt sich dabei ohne IR-Filter und mit einem Tageslichtsperrfilter betreiben, um den gewünschten Wellenbereich zu erhalten. Abbildung 3 zeigt die spektralen Kennlinien des Kamerasensors ohne Filter (Aptina MT9V032) und des in Kombination verwendeten Tageslichtsperrfilters (IDS Imaging).

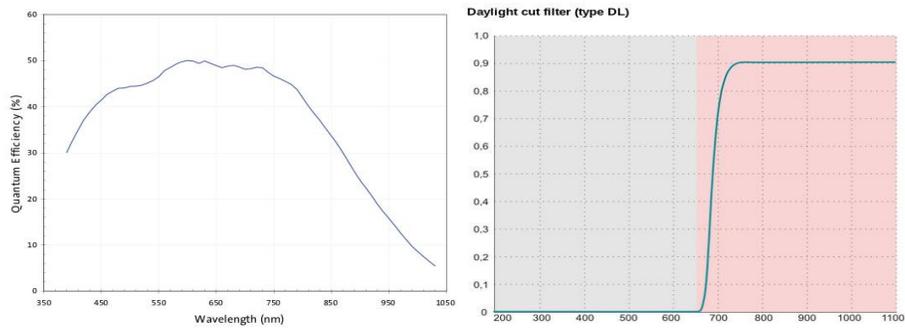


Abb.3: Kennlinien des für die NIR-Kamera eingesetzten Sensors ohne Filter und des Tageslichtsperrfilters.

Beide Kameras werden vom Bordrechner über einen elektronischen Trigger ausgelöst und die Daten per USB übertragen. Für beide Kameras wurde ein 2.8 mm S-Mount-Objektiv ausgewählt, aus dem sich ein horizontaler Öffnungswinkel von 78° ergab. Dies entsprach bei 100 m Flughöhe einer horizontalen Aufnahmebreite von ca. 160 m.

Bei der Wahl der Sensoren wurde auf eine hohe Pixelgröße von 6  $\mu\text{m}$  geachtet. Diese ermöglichte kurze Verschlusszeiten, was hinsichtlich der hohen Winkelgeschwindigkeiten des Kopters wichtig ist, um Bewegungsunschärfen in den Bildern zu vermeiden. Ebenso wichtig ist hierfür der Einsatz einer Kamera mit sog. Global Shutter, der ein simultanes Auslesen der Pixel erlaubt. Experimente mit einer Rolling-Shutter-Kamera (zeilenweises Auslesen) ergaben stark verzeichnete Luftbilder infolge der Kopter-Bewegung.

Die Kameras wurden mithilfe der Camera Calibration Toolbox für Matlab geometrisch kalibriert. Dies ermöglichte eine geometrische Korrektur (Entzerrung) der Aufnahmen. Zwei entzerrte Beispielbilder einer Befliegung der Testfläche ATB sind in Abbildung 4 zu sehen.



Abb.4: Beispiele geometrisch korrigierte Bilder RGB(links)- und NIR(rechts), Stand 2010. Aufnahmen vom Oktokopter ( HiSystems GmbH) mit fixer Digitalkamerachse . (Versuchsfläche ATB, Marquardt).

Um Nadir-Aufnahmen unabhängig von der aktuellen Lage des Kopters machen zu können, wurde gemeinsam mit der Firma BerlinVR eine Kameraaufhängung entworfen, die einerseits, über die Bordsensorik angesteuert, die Lage des Kopters ausgleichen kann und andererseits, über Winkelsensoren in den Achsen, zusätzliche Informationen über die Ausrichtung der Kamera liefert (Abbildung 5).

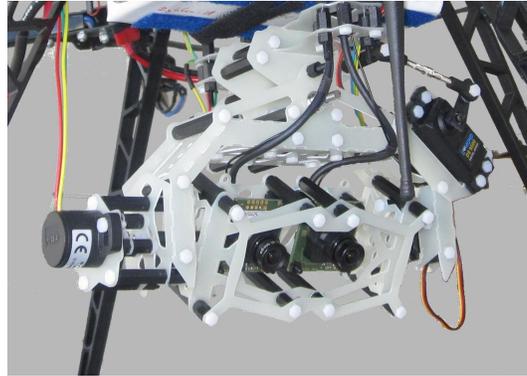


Abb. 5: Im Projekt entwickelte Kameraaufhängung zum Ausgleich der Schiefelage des Kopters mit integrierten Winkelsensoren

### 3.1.2.2 Bordrechner

Zusätzlich zur ohnehin vorhandenen Elektronik des Oktokopters wurde das System um einen zusätzlichen Bordrechner erweitert. Das BeagleBoard ist ein kommerziell erhältlicher und langzeitverfügbarer Single Board Computer mit einem ARM-basierten OMAP3530 Prozessor, getaktet mit 720 MHz. Auf diesem Rechner läuft Ängström, eine Embedded-Linux-Distribution, über die die Sensoren angesprochen werden. Im Projektjahr 2011 wurde die hierfür notwendige Software und Elektronik zur Ansteuerung der Kameras, der IMU und des GPS fertig gestellt.

### 3.1.2.3 Zusatzsensoren

Die Inertial Measurement Unit (IMU) dient zusammen mit dem GPS der Bestimmung der sechs Unbekannten der äußeren Orientierung des Kopters und der Kamera (3 Lagekoordinaten + 3 Winkel). Zusätzlich wurde zur Stützung der relativ ungenauen Höhenschätzung des GPS ein Barometer eingesetzt und zur Stützung der Himmelsrichtung (der sogenannte Yaw-Wert der Orientierung) ein Magnetkompass (Magnetometer). Der Bordrechner fragt all diese Sensordaten ab und fusioniert diese in einem speziell dafür entwickelten Kalmanfilter. Der Kalmanfilter kann adaptiv die stets auftretenden Fehler der Sensoren korrigieren um so zu einer verbesserten Schätzung der äußeren Orientierung zu gelangen. Wichtig für die Einstellung dieses Filters war eine Abschätzung der Fehlergrößen der Sensoren. Diese ließen sich nicht aus den Datenblättern gewinnen. Da die Motoren des Kopters diesen unter ständige Vibrationen setzen, konnten Aussagen über Sensorfehler für unseren Fall nur aus Flugdaten gewonnen werden. Daher wurde eine ganze Reihe von Testflügen unternommen, um diese Größen zu bestimmen. Zusätzlich wurden verschiedene Aufbauten des Kopters getestet, um die Vibrationen möglichst von den Sensoren fernzuhalten, da die Vibrationen nicht nur eine zufällige Streuung (Rauschen) erzeugen, sondern die Sensorwerte auch systematisch (Bias) verfälschen können. Abbildung 6 zeigt bspw. zwei Zeitreihen des X-Beschleunigungswerts im Flug, bei denen unterschiedliche Positionen des Akkus (großes Gewicht) getestet wurden. Die rechte Reihe (Akku nah am Sensor) zeigt ein deutlich geringeres Rauschen.

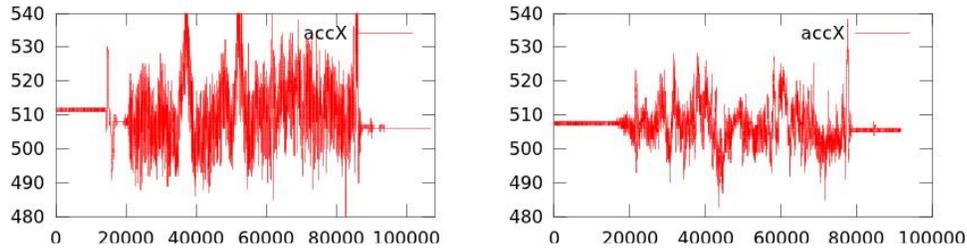


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf des X-Beschleunigungswerts (Rohdaten) während eines Fluges mit unterschiedlichen Akku-Positionen links und rechts.

Zusätzlich mussten einige Messflüge zur sogenannten Bore-sight Calibration durchgeführt werden. Hierbei wird die unvermeidbare Schiefelage der IMU gegenüber den Kamerasensoren ausgemessen, um diese bei der späteren Georeferenzierung der Bilder auszugleichen. Hierzu wurde die gemessene äußere Orientierung der IMU mit einer photogrammetrischen Lösung mit eingemessenen, signalisierten Punkten (Referenzpunkten) verglichen, um die Abweichungen zu bestimmen (Abbildung 7).



Abb.7: Beispielaufnahme eines Bore-sight-Calibration-Flugs mit eingemessenen Referenzpunkten

In Ergänzung wurde ein Kalibrierungsverfahren entworfen, das invariant gegenüber einer Z-Rotation der Passpunkte ist (und somit ohne Yaw-Wert auskommt). Dies ermöglichte eine Indoor-Bore-sight-Calibration, bei der Passpunkte auf einer Platte montiert sind, die über eine hochgenaue Wasserwaage exakt waagrecht ausgerichtet wird. Dies ermöglichte eine schnelle und unkomplizierte Kalibrierung, die für die geforderte Genauigkeit ausreichend war (ca.  $0.1^\circ$ ). Die errechnete Bore-sight-Abweichung ergab pro Achse eine Abweichung von ca.  $0.2-0.8^\circ$ . Dies entspricht bei einer Höhe von 100 m etwa einer Abweichung auf dem Boden von 0.5-3 m, sollte also nicht vernachlässigt werden.

Insgesamt konnte durch die dargestellten Maßnahmen die Genauigkeit mit der vorhandenen IMU in Roll und Pitch auf ca.  $2^\circ$  gesteigert werden, im Yaw auf  $2-4^\circ$ . Da dies noch nicht der gewünschten Genauigkeit entsprach, wurde mit der Integration einer weiteren IMU (Analog Devices, Typ Adis16407) begonnen, die resistenter gegenüber Vibrationen sein soll und zudem vom Werk aus temperaturkalibriert ist. Erste Tests mit dieser IMU waren für das Frühjahr 2012 vorgesehen.

### 3.1.3 Arbeitsschritte, Methoden und Ergebnisse 2012

Im Projektjahr 2012 wurden Arbeiten an der Photogrammetrie, dem Kamerasystem und dem Kopter durchgeführt. Zusätzlich wurde ein Verfahren zur Vignettierungskorrektur der

Luftbilder adaptiert und eine Methode zur Berechnung der oberen Grenze der Kamerabelichtungszeit entwickelt.

### 3.1.3.1 Photogrammetrie

Die größten Neuerungen und Veränderungen des Systems ergaben sich aus Entwicklungen im Bereich der Photogrammetrie. In den vorausgegangenen Projektjahren wurden alle Anstrengungen in Richtung direkter Georeferenzierung der Luftbilder auf Basis der GPS- und IMU-Daten unternommen. Größte Herausforderung war dabei die hohe benötigte Genauigkeit in der Lageinformation der Kamera zu erreichen. Da dieser Weg sich zunehmend als großes Hindernis erwies, wurde zu Beginn des Projektjahres 2012 eine erneute Recherche zum Thema Photogrammetrie und Georeferenzierung durchgeführt. Insbesondere die Arbeit von (Neitzel und Klonowski, 2011) erwies sich dabei als besonders hilfreich. Die Arbeit untersucht eine Reihe neuer, sogenannten Multi-View-Stereo-Programmen, die für die georeferenzierte Orthofotoerstellung auch ohne Lageinformationen der Kamera sehr gute Ergebnisse liefern können, da die Lageinformationen aus den sich überlappenden Bildern selbst berechnet wird. Zudem kommen diese Programme auch ohne Höhenmodell des Geländes aus, da die dreidimensionale Struktur der aufgenommenen Fläche aus den Bildern berechnet wird. Daraufhin testeten wir folgende Programme auf ihre Tauglichkeit für das Projekt: Bundler+PMVS2, Pix4D UAV Cloud und Agisoft PhotoScan Professional. Aufgrund der überraschend guten Ergebnisse, der einfachen Benutzbarkeit und eines günstigen Preises (ca. 500 € in der Universitätslizenz), wurde das Programm Agisoft PhotoScan Professional für den weiteren Einsatz im Projekt ausgewählt. Im Anschluss wurden viele Orthofotos aus den im vergangenen Projektjahr gesammelten Luftbildern erstellt, um mit dem Programm und den Optionen vertraut zu werden. Abbildung 8 zeigt ein aus dieser Projektphase typisches Bildschirmfoto aus der Arbeit mit PhotoScan.

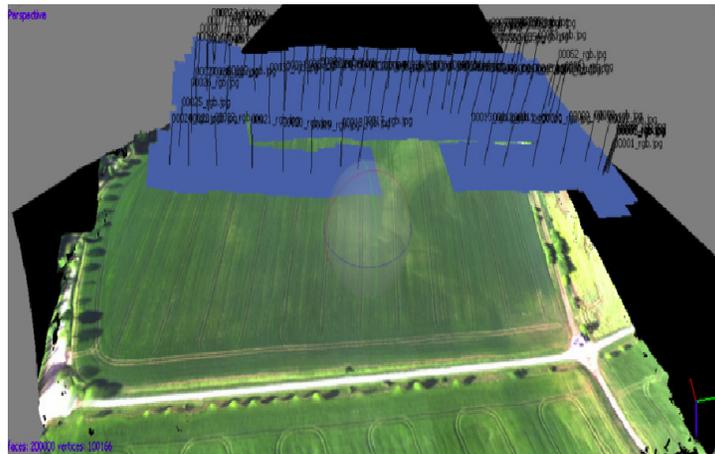


Abb. 8: Bildschirmfoto aus Agisoft PhotoScan. Zu sehen ist eine aus Luftbildern rekonstruierte Fläche (Praxisfeld Thüringen Görzbach) und die rekonstruierten Kamerapositionen und Ausrichtungen (blaue Quadrate oben)

Für die Generierung der Orthofotos mit PhotoScan empfiehlt Agisoft eine Überlappung der Luftbilder von 80 % in Flugrichtung und 60 % zwischen den Flugstreifen. Um Schwankungen der Kameraausrichtung um den Nadir zu berücksichtigen, wählten wir eine Überdeckung von 70 % zwischen den Flugstreifen, was einem Streifenabstand von 50 m entsprach. Der aus unserem Kamerasystem technisch bedingte maximale zeitliche Abstand von etwa 3 s zwischen zwei direkt aufeinander folgenden Aufnahmen ergab zusammen mit der geforderten Längsüberlappung von 80 % eine maximal erlaubte Fluggeschwindigkeit von 9 m/s, die vom UAV nicht überschritten wurde.

Der Software wurden die Rohbilder mit den entsprechenden GPS-Daten übergeben. Die VIS- und NIR-Orthofotos wurden getrennt berechnet.

Die generierten Orthofotos machten einen visuell stimmigen Eindruck. Zur Prüfung der geometrischen Genauigkeit wurde 2012 eine Bodenkontrollmessung mittels RTK-GPS auf dem Praxisfeld Otten durchgeführt. Dazu wurden Punkte eingemessen, die möglichst eindeutig auch dem georeferenzierten Orthofoto zu erkennen waren. Das von uns auf dem Kopter genutzte GPS mit Egnos Korrektursignal hat nach allgemeiner Erfahrung eine Genauigkeit von ca. 2-3 m. Der nachfolgenden Abbildung 9 ist aber zu entnehmen, dass der Fehler mit zunehmender Entfernung vom Bildmittelpunkt steigt und im Randbereich teilweise sehr hohe absolute Abweichung zu finden sind, im Einzelfall bis 12 m. Die Ursachen hierfür sind der Algorithmus zur Orthobilderstellung und die Abnahme der Überlappungen zu den Randbereichen des Bildes. Die größten Fehler treten daher in den Randbereichen des Orthobildes auf, wo kaum noch Überlappungen zwischen den Einzelbilder vorhanden sind. Es ist also zu empfehlen, das Untersuchungsgebiet über dessen Grenzen hinaus abzufliegen und entsprechend viele Aufnahmen zu machen.

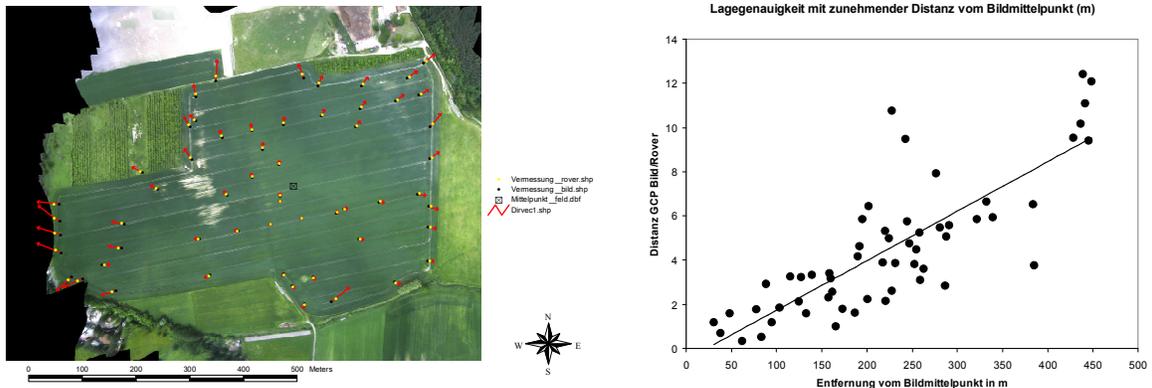


Abb. 9: Lagegenauigkeit der Messpunkte (Vektoren in der linken Darstellung 2-fach überhöht dargestellt), rechte Grafik stellt die Zunahme des Fehler vom Bildmittelpunkt dar

Eine bessere Abschätzung der möglichen Genauigkeit liefert Abbildung 10. Hier wurde nur der Bereich mit guter Überlappung als Grundlage gewählt und extreme Ausreißer entfernt. Auf dieser Basis ergab sich eine mittlere absolute Abweichung von 3.2 m und eine maximale absolute Abweichung von 6.1 m. Dies entsprach den Erwartungen mit dem verwendeten GPS Empfänger.

Wie in Abbildung 10 zu erkennen ist, entsprachen die Fehler im Wesentlichen einer Rotation und Skalierung des gesamten Orthofotos. Daher wurde die Messung mit den gleichen zugrunde liegenden Daten wiederholt. Allerdings wurde das Orthofoto mit drei zusätzlichen Bodenkontrollpunkten vom Rand der aufgenommenen Fläche neu berechnet.

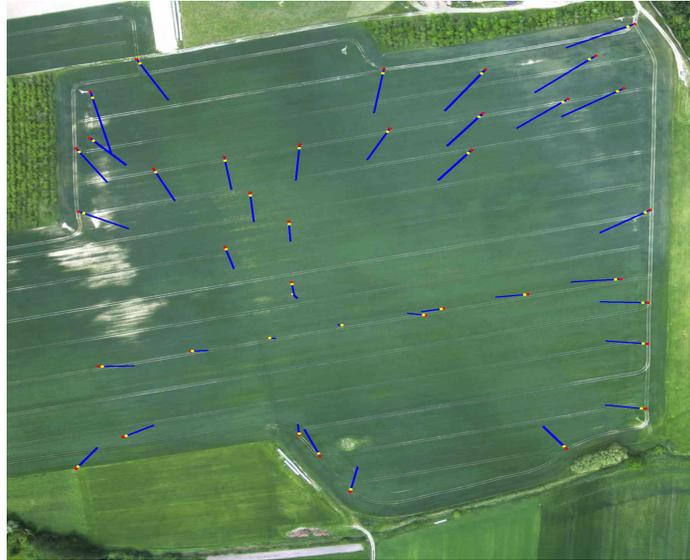


Abb.10: Bodenkontrollmessung des generierten Orthofotos mit den Kontrollpunkten (rot), den entsprechenden RTK-GPS-Messpunkten (gelb) und den vektoriellen Abweichungen (blau) skaliert um den Faktor 10. Die aufgenommene Fläche ist ca. 550x550 m groß.

Daraus ergab sich eine mittlere absolute Abweichung von nur noch 0.3 m und eine maximale Abweichung von 1.3 m. Die relativ hohe maximale Abweichung ist vermutlich auf Schwierigkeiten bei der Zuordnung von realen Objekten und Orthofoto zurückzuführen, d.h. die tatsächliche Genauigkeit liegt noch höher. Für die Praxis kann so mit relativ geringem Aufwand eine sehr hohe geometrische Genauigkeit in den Orthofotos erreicht werden.

### 3.1.3.2 Kameras

Zu Beginn des Projektjahres 2012 wurden zunächst die Kameras aus dem vorhergehenden Projektjahr (UI-1226LE) durch einen anderen Typ (UI-1241LE) des gleichen Herstellers (IDS-Imaging) ersetzt. Der Hintergrund waren Probleme mit der Belichtungszeit im Hochsommer 2011. Da insbesondere die NIR-Kamera extrem lichtempfindlich war, mussten bei intensivem Sonnenlicht die Belichtungszeiten unter 0.1 ms gebracht werden. Dies war bei den Kameras allerdings nur auf Kosten einer Erhöhung der sog. Pixel-clock möglich (siehe Handbuch IDS-Imaging). Diese ist aber an die Übertragungsrate der Bilddaten über USB gekoppelt. Die Erhöhung dieser Übertragungsrate führte aber in Ausnahmefällen zu Übertragungsfehlern und somit zu Verlusten einzelner Aufnahmen, was sich insbesondere in der Orthofotoerstellung negativ auswirkte. Daher wurde der Kamerateyp gewechselt. Dieser ermöglichte niedrigere Belichtungszeiten ohne Erhöhung der Pixel-clock mit dem zusätzlichen Bonus einer erhöhten Pixelzahl (1280x1024).

Für die neuen Kameras wurden kompakte S-Mount-Objektive mit einem Gewicht von jeweils 19 g eingesetzt, die für Aufnahmen im Nahinfrarot geeignet sind (BL-04018MP118 von VD-Optics, ~ 150 € pro Objektiv). Die Objektive haben eine Brennweite von 4 mm, was bei der verwendeten Kamera einem Öffnungswinkel von 81° horizontal und 68° vertikal entspricht. Bei unserer üblichen Flughöhe von 100 m ergab sich daraus eine aufgenommene Fläche von 170x136 m pro Bild. Wie im Abschnitt zur Photogrammetrie bereits geschildert, verwendeten wir eine Querüberlappung von ca. 70°, woraus dann insgesamt ein Flugstreifenabstand von 50 m resultierte.

Die neuen Kameras arbeiten wie die Vorgängerkameras mit einer hohen Pixelgröße (5.3 µm) und einem Global Shutter aus den in Abschnitt 3.1.2.1 bereits genannten Gründen. Ebenso wurde der IR-Filter der Monochromkamera wieder durch einen Tageslichtsperrfilter ersetzt.

Ein erneutes Problem mit den neuen Kameras ergab sich wiederum im Hochsommer (Juni 2012). Unter sehr sonnigen Verhältnissen ergaben sich Belichtungszeiten unter 0.05 ms. Auch wenn dies nach technischen Angaben mit der Kamera möglich ist und auch der Pixel-clock nicht erhöht werden musste, so werden bei so kurzen Belichtungszeiten im Global-Shutter-Modus bei diesem Kameratyp die unteren Kamerazeilen deutlich dunkler als die oberen (siehe technische Angaben zur Kamera von IDS-Imaging). Da dies für unser System eine Fehlerquelle darstellt, wurde ein Neutralfilterglas in die Kamera eingesetzt, der die Lichtempfindlichkeit der Kamera um den Faktor zehn senkt. Dieser Filter (SCHOTT NG4 2 mm) wurde preiswert (~40 €) von der Firma ITOS bereits zurechtgeschnitten geliefert (siehe Abbildung 11). Solch ein Filter kann auch eine preiswerte und einfache Lösung sein, um die Spektralbänder noch genauer anzupassen.

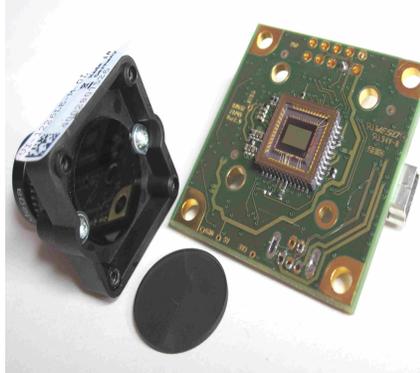


Abb.11: Monochrom-Kamera 2012 mit demontierter Objektivhalterung und Neutralfilter

### 3.1.3.3 Zusatzsensoren

Aufgrund der beschriebenen Verbesserungen im Bereich der photogrammetrischen Software erwies sich die IMU des Systems als nicht notwendig für die Erstellung der georeferenzierten Orthofotos. Daher wurden die Systemkomponenten zu Beginn des Projektjahres 2012 reduziert, so dass ausschließlich das GPS als Zusatzsensor zur Kamera eingesetzt wurde. Der bereits softwareseitig integrierte Empfänger wurde durch einen kompatiblen neueren Typ (Navilock NL-651EUSB, u-box 6, Gewicht 14g, ~ 40€) ersetzt. Für diesen Empfänger wurde eine kleine Einfassung entworfen, so dass dieser am Elektronikurm parallel zum vorhandenen Empfänger montiert werden kann (siehe Abbildung 12).

Die Winkelsensoren der Kameraaufhängung wurden ebenfalls entfernt, da auch sie der Bestimmung der Lage der Kamera dienen sollten. Durch die Entfernung konnte zusätzliches Gewicht eingespart werden.

### 3.1.3.4 Bordrechner

Im Projektjahr 2012 wurden auch Optimierungen an der On-board-Steuerung. Dazu wurde zunächst der Bordrechner (BeagleBoard) durch einen neueren Typ (BeagleBoard xM, Gewicht ca. 37g, ~ 160€) ersetzt. Vorteil der neuen Version war vor allem ein integrierter USB-Hub, so dass ein entsprechendes externes Modul entfallen konnte. Die Kameras und der GPS-Empfänger wurden nun direkt über diesen USB-Hub angeschlossen. Zusätzlich waren die Kameras über ein Triggerkabel, synchronen Auslösung verbunden. Die Kameras wurden über eine Softwareschnittstelle von IDS Imaging angesprochen, die auf Nachfrage für das BeagleBoard und Embedded-Linux erhältlich war. Der GPS-Empfänger kommunizierte über das UBX-Protokoll von u-blox.

Zusätzlich wurde eine Adapterplatine fertig gestellt, die die Stromversorgung des BeagleBoards und eine Pegelwandelung der Kamera-Trigger vornimmt.

An den genannten USB-Hub des Bordrechners wurde zusätzlich ein USB-WLAN-Adapter angeschlossen. Über diesen kann der Benutzer des Systems im Ad-hoc-Modus und einer Secure Shell (SSH) sich mit dem Rechner verbinden und die Flugsoftware initialisieren und starten.

Mit der Entwicklung der Flugsoftware wurde im Projektjahr 2011 begonnen und mit kleinen Veränderungen im Jahr 2012 abgeschlossen. Die Software übernimmt während des Fluges folgende Aufgaben: Nach Erreichen einer benutzerdefinierten Höhe, wird eine Belichtungsautomatik für die Kameras gestartet. Ist diese abgeschlossen, wird die Belichtungszeit über die Dauer des Fluges konstant gehalten. Wird im Anschluss an die Fixierung der Belichtungszeit eine benutzerdefinierte Flughöhe erreicht, erfolgt die Aufnahme der Luftbilder mit maximal möglicher Frequenz (ca. eine RGB-NIR-Aufnahme alle zwei Sekunden). Jedes Foto wird dabei direkt mit entsprechenden GPS-Daten versehen. Die Bildaufnahme wird gestoppt, sobald die Flughöhe verlassen wird. Nach der Landung können die Flugdaten über WLAN oder direkt von der SD-Karte auf den Rechner transferiert werden, der die Orthofotos generiert. Dabei wird direkt das von PhotoScan erwartete Format generiert, so dass direkt nach der Landung die Erstellung der Orthofotos gestartet werden kann.

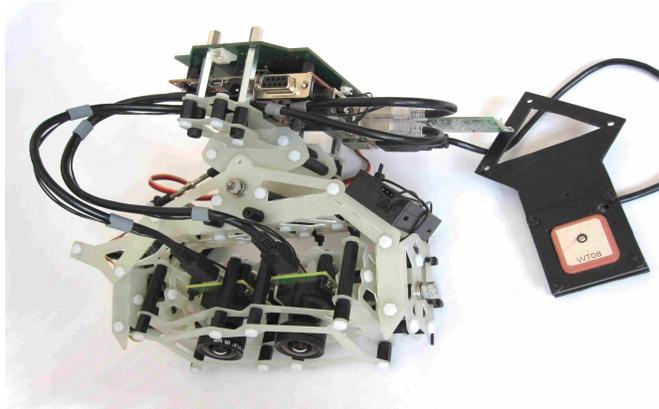


Abb.12: Komplettes Kamerasystem 2012 mit (unten) beiden Kameras in schwenkbarer Kameraaufhängung ohne Winkelsensoren; (rechts) GPS-Empfänger in Einfassung, die während des Fluges an der Spitze des Kopters montiert ist; (oben) Bordrechner und Adapterplatine mit Verbindung zu den Kameras und dem GPS-Empfänger.

### 3.1.3.5 Kopter

Die Trägerplattform selbst wurde während des Projektjahres 2011 nicht mehr verändert. Im Projektjahr 2012 wurde aufgrund neuer Marktentwicklungen ein neues Fernsteuerungssystem eingesetzt (Hott von Graupner). Dieses System arbeitet im 2.4GHz-Bereich und arbeitet zuverlässig bis zu einer Entfernung von 4 Kilometern. Großer Vorteil für unser System war ein sog. Diversity-Empfänger. Dabei werden zwei Antennen für den Empfang verwendet, so dass es keine toten Empfangsbereiche mehr gibt. Bei der vorherigen Verwendung von nur einer Antenne kam es in seltenen Fällen zum Empfangsausfall, worauf der Kopter seinen autonomen Wegpunktflug abbrach und zum Ausgangspunkt zurückkehrte. Dies kam im Jahr 2012 mit dem neuen System nicht mehr vor. Zusätzlich verfügt das neue System über einen Rückkanal, so dass Statusdaten wie Batteriekapazität oder Entfernung nicht mehr über einen getrennten Rechner, sondern direkt an der Fernbedienung ablesbar waren. Dies war für den Praxiseinsatz ein großer Vorteil.



Abb.13: Agricopter 2012 mit konstruiertem Kamerasystem

### 3.1.3.6 Vignettierungskorrektur

Im Projektjahr 2012 wurde ein einfaches Verfahren zur Vignettierungskorrektur der Luftbilder des Agricopters entwickelt. Vignettierung bezeichnet den Effekt, dass die Helligkeit eines Kamerabildes ausgehend vom Bildhauptpunkt radial abnimmt. Ursache dafür ist insbesondere der längere Weg des Lichts an den Rändern des Objektivs im Vergleich zur Mitte (Goldman und Hung Chen, 2005). Um die Verfälschungen der spektralen Daten insgesamt und untereinander näher zu untersuchen, wurde eine Messung der Vignettierung durchgeführt. Traditionell wird die Vignettierung mit Hilfe einer Ulbricht-Kugel anhand einer einzigen Aufnahme bestimmt. Die entsprechende Messung durch professionelle Dienstleister ist jedoch teuer.

Im Projekt wurde daher ein Verfahren von Debevec et al., 2004 adaptiert. Dabei wird ein spezielles Objekt von einer festen Position aus mehrfach unter Rotation der Kamera und konstanten Beleuchtungsverhältnissen aufgenommen. Dadurch wandert das Objekt über einen großen Bildbereich und die entsprechenden Helligkeitswerte des Objektes können als Messkurve der Vignettierung interpretiert werden. Mittels der Messkurve können dann die Parameter eines gewünschten Vignettierungsmodells bestimmt werden.

Als Zielobjekt wurde die innere Fläche eines auf DIN A3 Papier gedruckten Kreises benutzt. Abbildung 14 zeigt eine Beispielaufnahme aus der Messreihe für die RGB-Kamera, die in einer normalen Büroumgebung durchgeführt wurde. Für jeden Messpunkt wurde das Zielobjekt manuell markiert und über die Pixelwerte der Fläche gemittelt. Wichtig ist, dass die Belichtungszeit während der Messreihe konstant gehalten wird und so eingestellt ist, dass in der Zielfläche keine komplett schwarzen oder weißen Pixel vorkommen



Abb. 14: Beispielaufnahme aus der Vignettierungsmessreihe. Das Zielobjekt ist die Fläche innerhalb des schwarzen Kreises.

Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse unserer Messreihe für alle Kanäle. Ähnlich zu (Debevec et al., 2004) wurde als Vignettierungsmodell ein gerades Polynom vierten Grades  $a_0 + a_2r^2 + a_4r^4$  verwendet, wobei  $r$  der Abstand zum Bildhauptpunkt ist. Nach der Ausgleichsrechnung wurde das Modell mit  $a_0$  normiert, so dass sich am Bildhauptpunkt ein Vignettierungsfaktor von 1 ergibt.

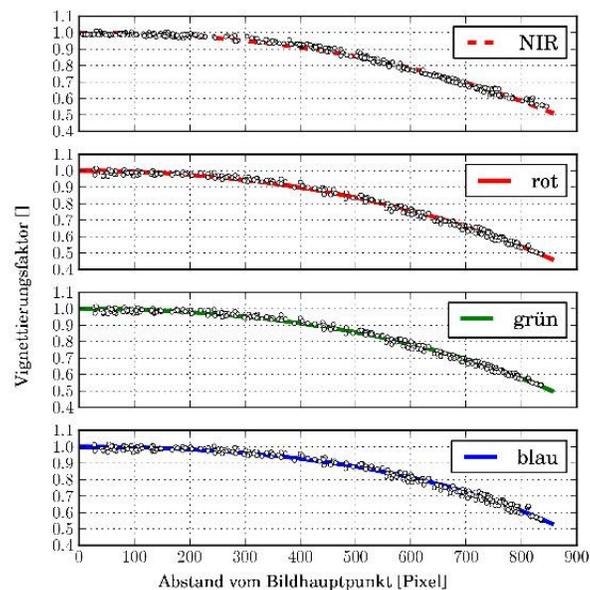


Abb. 15: Vignettierungsmessreihen und berechnete Modellkurven. Messpunkte und Kurven wurden normalisiert.

Mithilfe der Modelle lässt sich für jeden Pixel eines Luftbildes die Vignettierung korrigieren, indem durch den entsprechenden Vignettierungsfaktor geteilt wird (siehe Abbildung 16).

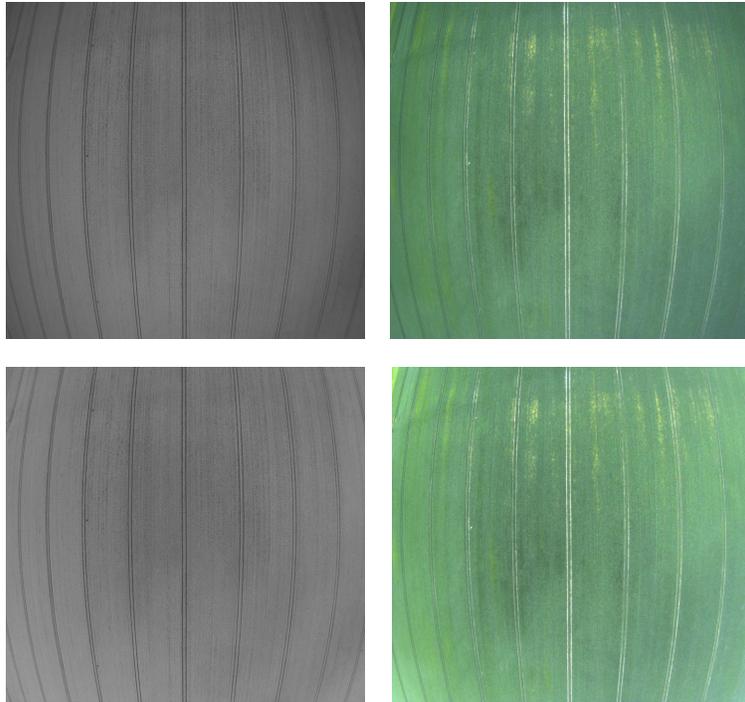


Abb. 16: Beispielaufnahmen in NIR (links) und VIS (rechts), jeweils im Original (oben) und mit Vignettierungskorrektur (unten).

### 3.1.4 Zusammenfassung Ergebnisse

Insgesamt wurde im Projekt auf der Technikseite des Agricopters ein System entworfen, mit dem zuverlässig die gewünschten VIS+NIR Orthofotos erstellt werden können. Das Gesamtsystem bestehend aus Kopter, Kamerasystem und Photogrammetriesoftware kostete lediglich rund 3000 €. Im Projektjahr 2012 wurde mit dem beschriebenen System zuverlässig eine ganze Reihe von Orthofotos erstellt.

Dabei wurde das System Oktokopter von HiSystems auf die Einsatzhöhe im Projekt angepasst. Zusätzlich stellte sich die Verwendung eines guten Fernsteuerungssystems mit Rückkanal als sehr hilfreich heraus. Die Verwendung des Fernsteuerungssystems ist rechtlich vorgeschrieben, um ein Eingreifen des Piloten im Notfall zu ermöglichen. Der autonome GPS-gestützte Wegpunktflug funktionierte in den Projektjahren 2011 und 2012 sehr zufriedenstellend.

Schwerpunkt der Entwicklungen lag auf dem multispektralen Kamerasystem. Dieses wurde so entworfen, dass es unabhängig vom verwendeten UAV ist. D.h. das System kann auch problemlos auf einer anderen Trägerplattform eingesetzt werden. Das Kamerasystem wurde auf zuverlässigen Einsatz hin optimiert und bestätigte dies im gesamten Projektjahr 2012. Das System wurde preiswert (Gesamtkosten ca. 1000€) und leichtgewichtig (Gesamtgewicht ca. 500g inklusive Kameraaufhängung) konstruiert. Das System ist einfach zu benutzen und stellt die generierten VIS+NIR Kamerabilder und GPS-Daten in einem Format zur Verfügung, das direkt nach dem Flug von der Photogrammetriesoftware verwendet werden kann.

Auf Seiten der Bilddatenverarbeitung wurde ein Verfahren zur Vignettierungskorrektur entworfen, das ohne technische Spezialausrüstung durchgeführt werden kann. Zusätzlich wurden diverse Photogrammetrie-Softwarepakete evaluiert und das Programm PhotoScan Professional ausgewählt. Dieses Programm erstellte zuverlässig die gewünschten Orthofotos aus den generierten Flugdaten und ist zusätzlich sehr einfach zu bedienen. Die

geometrische Genauigkeit des Gesamtsystems wurde untersucht und liegt mit 3.2 m mittlerer Abweichung für die Stickstoffdüngung in einem vertretbaren Rahmen. Es wurde gezeigt, dass sich die Genauigkeit mit drei Bodenkontrollpunkten noch deutlich steigern lässt.

Zusammenfassend konnten wir mit dem beschriebenen System während der gesamten Düngeperiode zuverlässig Orthofotos in VIS+NIR generieren. Auch wenn die Flugdauer des verwendeten Systems beschränkt ist, so konnte doch eine Fläche von ca. 10 ha pro Flug abgedeckt werden. Abbildung 17 zeigt eine NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)-Karte, die mithilfe des beschriebenen Systems generiert wurde.

Teile der hier dargestellten Ergebnisse sind auch in Bachmann et al., 2013-1 und 2013-2 veröffentlicht.

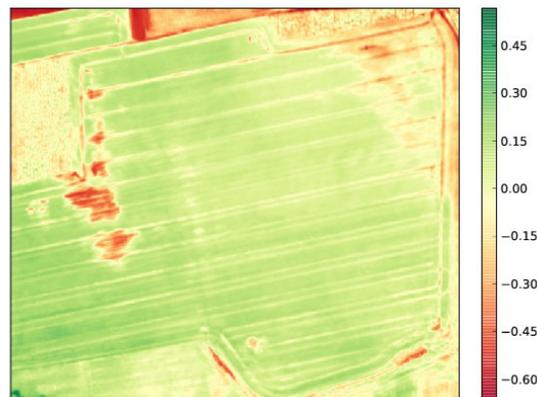


Abb.17: NDVI-Karte, die mithilfe des beschriebenen Systems generiert wurde. Die Karte deckt eine Fläche von ca. 550x550 m ab und wurde in drei direkt aufeinander folgenden Flügen aufgenommen (siehe Abbildung 9 für die entsprechenden RGB-Daten).

### **3.2 Bildauswertungen und Feldversuche**

Als ein Anwendungsfall für die Nutzung von Luftbildern aus UAS wurde für das ADLER Projekt die ortsspezifische Stickstoffdüngung in Winterweizen getestet. Die N-Düngung ist eng gekoppelt an die Entwicklungsstadien von Weizen sodass für die Praxis eine zeitnahe Datenerfassung und Erstellung von Applikationskarten notwendig ist. Um landwirtschaftlich relevante Informationen über die Stickstoffversorgung der Pflanze zu erhalten sind zumindest zwei Kameras notwendig: eine „normale“ Kamera, die den sichtbaren Wellenlängenbereich von 400 bis 700 nm abdeckt (sogenannte RGB-Kameras) sowie eine Nahinfrarot-Kamera. Die Nahinfrarot-Kamera erfasst elektromagnetische Strahlung in einem Wellenlängenbereich von 700 bis etwa 2500 nm der für uns Menschen nicht sichtbar ist. Zusammen können diese Bereiche des Strahlungsspektrums viele wertvolle Informationen über Böden und Pflanzen liefern. Die organische Substanz im Oberboden lässt sich durch Strahlung im sichtbaren bis in das nahe Infrarot (400 bis 900 nm) identifizieren. Der Bedeckungsgrad und die Grünintensität von Pflanzenbeständen ist mit dem sichtbaren Wellenlängenbereichen gut zu erfassen, während z. B. Biomasse sehr gut im Infrarot bestimmt werden kann. Aus dem Verhältnis von Informationen im NIR und RGB lassen sich Vegetationsindizes ableiten, die den Versorgungsgrad der Pflanze mit Stickstoff approximieren. Am bekanntesten ist der NDVI. Eine umfassende Zusammenfassung zu diesem Thema kann Heege et al. 2008 entnommen werden. Zur Charakterisierung des Wasserhaushalts von Pflanzen und damit zur Beurteilung von Stress und Bewässerungsbedarf ist ebenfalls die Absorption der Nahinfrarot-Strahlung von Bedeutung.

In der nachfolgenden Abbildung 18 links sind typische Reflektionskurven von Winterweizen abgebildet (Marquardt, 04.05.2011).

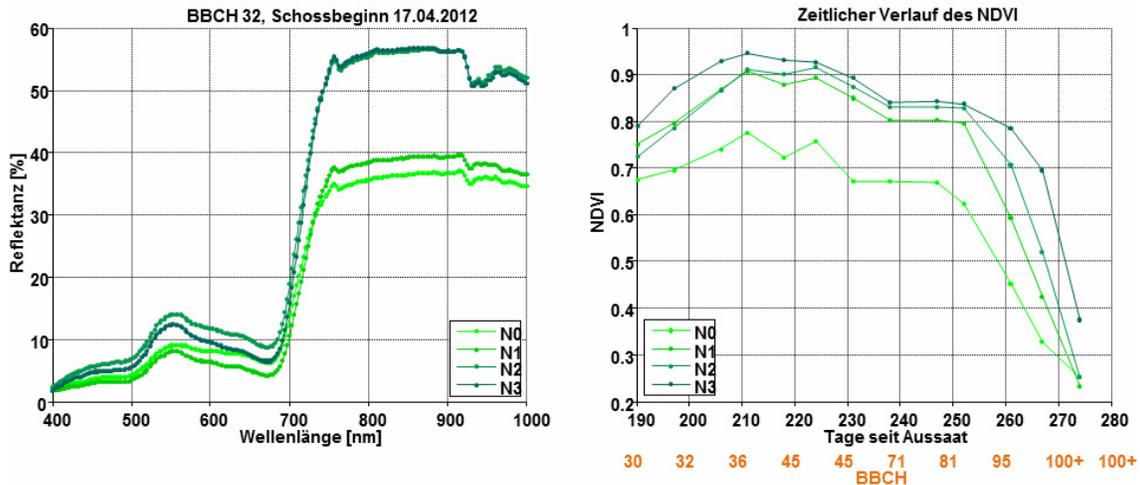


Abb. 18: Links: Spektrale Reflektion von Winterweizen in Abhängigkeit von der N-Düngung zu Schossbeginn (BBCH 32). Rechts: Zeitlicher Verlauf des NDVI. (Versuchsstandort Marquardt, N0: keinen N-Düngung, N1: niedrige N-Düngung, N2: mittlere N-Düngung, N3: hohe N-Düngung)

Die Reflektion ist der Anteil des Lichtes, der vom Messobjekt im Vergleich zu einer perfekt reflektierenden (weißen) Oberfläche zurückgestrahlt wird. Die Kurven mit geringer Reflektion im sichtbaren und NIR Bereich sind die Versuchspartzellen mit keiner (N0) bzw. niedriger (N1) N-Düngung. Die mittlere (N2) und hohe (N3) N-Düngung differenziert mehr im sichtbaren Wellenlängenbereich als im NIR. Wie das Beispiel zeigt, ist die Interpretation vollständiger Spektren nicht ganz einfach. Glücklicherweise genügt es oft, wenn nur wenige Wellenlängenbereiche in Form von Indizes zur Analyse herangezogen werden. Der klassische, schmalbandige NDVI benötigt nur die Reflektionswerte von zwei Wellenlängen:

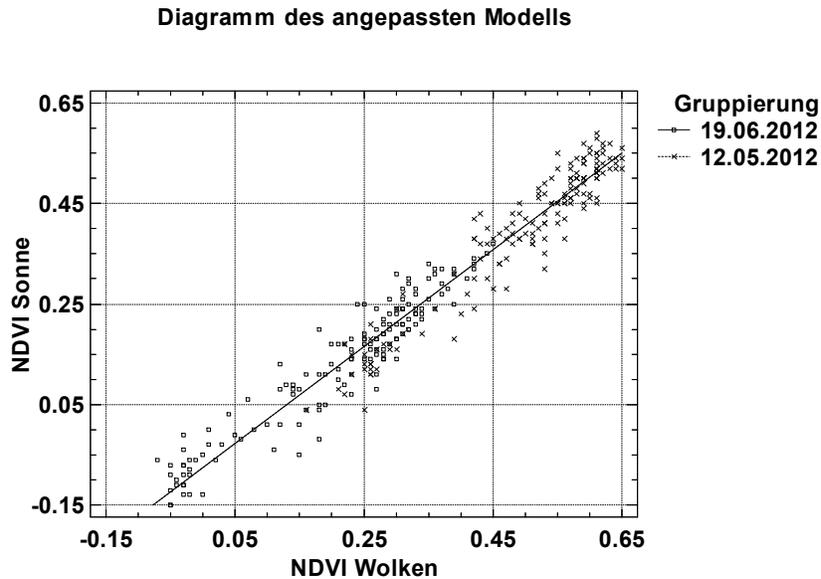
$$NDVI = (R760-R680)/(R760+R680)$$

Abbildung 18 rechts zeigt den zeitlichen Verlauf des NDVI, berechnet aus Spektrometermessungen. Die Rangfolge in der Kurvenschar gibt die Düngungsstufen wieder wobei allerdings die Differenzen in Anhängigkeit vom Wachstumsstadium unterschiedlich groß ausfallen. Besonders bei allgemein starker Entwicklung der Blattfläche zeigt der NDVI einen „Sättigungseffekt“, sodass in diesen Fällen der NDVI weniger gut geeignet ist. Es wurden daher zahlreiche andere Indizes entwickelt die jedoch oftmals ebenfalls Schwächen aufweisen. In den Zeitreihen des NDVI von 2012 (Abbildung 18, rechts) sind vorübergehende Depressionen erkennbar (Tag 218 und Tag 238 seit Aussaat). Sie sind auf Trockenperioden zurückzuführen, auf die die Pflanzen mit dem Einrollen ihrer Blätter reagiert haben.

### 3.2.1 Untersuchungen zur Beleuchtung

Die Praxis erfordert eine zeitnahe Datenerfassung und Auswertung von Daten für die teilflächenspezifische N-Düngung. Um generelle Algorithmen zu den Beziehungen von Stickstoffversorgung und Vegetationsindizes zu erhalten ist es notwendig, den Einfluss der Lichtintensität auf das Reflektionsverhalten der Pflanzen zu kennen. Die im nachfolgenden dargestellte Vorgehensweise ist nur eine erste Analyse die aber zumindest einen Eindruck verschafft über die Beziehung von Vegetationsindizes bei Sonne bzw. leichten Schleierwolken. Im Versuchsjahr 2012 wurden zu zwei Terminen (21.05 und 19.06) Bildflüge am gleichen Tag einmal mit Sonne und einmal mit Schleierwolken über der Versuchsfläche von Marquardt durchgeführt. Auf dem Versuchsfeld wurden 166 Beobachtungspunkte

randomisiert über die Blöcke verteilt und für jeden Punkt der NDVI bei Sonne und Bewölkung errechnet. Die Ergebnisse einer einfachen Regression sind in der nachfolgenden Abbildung 19 dargestellt.



Modell:  $NDVI_{Sonne} = -0.075861 + 0.962992 \cdot NDVI_{Wolken}$ ,  $R^2 = 95.0499$  Prozent, Standardfehler der Schätzung = 0.0427771

Abb. 19: Beziehung zwischen NDVI bei Bewölkung und Sonne zu zwei Terminen (21.05 und 19.06)

Insgesamt sind die NDVI-Werte bei Bewölkung höher als bei Sonne d. h. die Differenz zwischen NIR und RGB ist größer bei Bewölkung als bei Sonne. Es erscheint aber so als ob sich die unterschiedliche Einstrahlungsintensität im NIR und RGB im Verhältnis gleich verändert und für praktische Anwendungen somit nur geringen Einfluss auf den NDVI hat. Schwieriger sind nach unseren Erfahrungen stark wechselnde Beleuchtungsverhältnisse da bei fester Blende und Integrationszeit Über- bzw. Unterbelichtungen auftreten können. Auch führen starke Beleuchtungsunterschiede während des Flugs zu unterschiedlichen Ausleuchtungen der einzelnen Bilder.

### 3.2.2 Untersuchungsgebiet und Methodik Feldversuche 2010 bis 2012

Im Forschungsjahr 2010 haben wurden erste Versuche auf Praxisfeldern in Brandenburg (Betrieb Thiemeyer) angelegt. Da sich zu diesem Zeitpunkt der Agricopter noch im Aufbau befand wurden zeitnah zur Beprobung Bilddaten mit Flugzeugfernerkundung erfasst (Tabelle #). An insgesamt 45 Monitoringpunkten wurde zu zwei Zeitpunkten ein Pflanzen- und Bodenmonitoring durchgeführt. Hierbei haben wir im März an den Punkten jeweils Spektrometermessungen realisiert mit entsprechender Wiederholung und zu Beginn eine Methodik entwickelt, wie aus Bilddaten mit einer digitalen Kamera ein pflanzenphysiologischer Parameter abgeschätzt werden kann, ähnlich wie der Blattflächenindex. Die Methodik wurde zum zweiten Schnittzeitpunkt getestet und in Matlab umgesetzt. Zusätzlich wurden zum zweiten Termin Biomasseschnitte durchgeführt.

Im Jahr 2011 wurden auf 2 Versuchsfeldern mit Winterweizen auf dem Praxisbetrieb Thiemeyer sowie auf Blockversuchen am Bundessortenamt, Außenstelle Marquardt, zu zwei Zeitpunkten (Ende April und Ende Mai 2011) an insgesamt 69 Untersuchungspunkten ein umfangreiches Pflanzenmonitoring durchgeführt (Versuchsdesign s. Anhang 7.2). In Marquardt wurde auf einer Fläche von ca. 1500 m<sup>2</sup> ein einfaktorieller Stickstoffsteigerungsversuch (0 Düngung, 100 kg N/ha, 160 kg N/ha sowie 220 Kg N/ha) –

im folgenden ATB genannt - im Rahmen des Projekts ADLER mit betreut sowie ein zweifaktorieller Feldversuch mit Stickstoffsteigerungsvarianten wie vorher beschrieben und 2 unterschiedlichen Wachstumssorten (erectophil und planophil) – im folgenden ATB1 benannt. Diese beinhalteten jeweils zwei Wiederholungen (2 Blöcke) zu 4 Reihen à 3 homogenen Parzellen. Jede Parzelle wurde weiterhin in 6 Plots à 1,5\*1,5 m unterteilt. Auf den Praxisfeldern wurden einheitliche N-Mengen ausgebracht. Die Monitoringpunkte wurden so ausgewählt, dass die vielfältigen Standortfaktorkombinationen auf den Feldern erfasst wurden. Für die Auswahl der Monitoringpunkte wurde umfangreiches Geodaten herangezogen, u.a. Bodenkarten, Leitfähigkeitsmessungen, Ertragskarten, digitale Höhenmodelle. Der Blockversuch 2012 in der Versuchsstation war ähnlich aufgebaut wie im Jahr 2011, wobei die Variante mit den Sortenversuchen wegfiel. Dafür wurde Bewässerung als zweiter Versuchsfaktor aufgenommen. Weiterhin wurden die Praxisflächen auf dem Betrieb Thiemeyer aus logistischen Gründen durch eine Fläche in der Nähe von Potsdam Bornim ersetzt (nachfolgend Otten genannt).

An den Punkten wurden in den Versuchsjahren 2011 und 2012 jeweils mit entsprechenden Wiederholungen Spektralmessungen mit einem Tec 5 Handspektrometer (350 bis 1100 nm) durchgeführt. Weiterhin erfolgten Beerntungen um die feuchte und trockene Biomasse sowie den Stickstoffgehalt (nach Dumas) zu bestimmen. Diese Daten sind notwendig, um den NNI zu errechnen, der in der Literatur als quantitativer Index zur Bestimmung des N-Bedarfs der Pflanze in vielfältigen Feldversuchen getestet wurde (Mistele and Schmidhalter 2008; Justes et al. 1997) Das Konzept des NNI ermöglicht es die Stickstoffkonzentration zu bestimmen, bei welcher die oberirdische Trockenmasse gerade nicht mehr zunimmt trotz eines Gesamtanstiegs der N-Aufnahme der Feldfrucht (Justes et al., 1997). Basierend auf diesen Annahmen beschreibt das nachfolgende Modell die Abnahme des kritischen N-Gehalts bei zunehmender Biomasse in Weizen am besten:

$$N_c = 5,35 * W^{0,442}$$

mit  $N_c$  = kritischer N-Gehalt und  $W$  = Biomasse.

Der kritische N-Gehalt variiert von Pflanzenart zu Pflanzenart und ist abhängig vom jeweiligen Entwicklungsstadium der Pflanze. Das o.g. Modell wurde von Justes et al. 1997 für Winterweizen validiert und zwar für einen Trockenmassebereich  $W$  zwischen 1,55 t/ha und 12 t/ha sowie den Entwicklungsstadien BBCH 29 bis BBCH 65, also vom Ende der Bestockung bis Anfang der Blüte. Vom  $N_c$  -Wert zu unterscheiden ist der tatsächlich gemessene Stickstoffwert  $N_{act}$  in % der Bestandes-Trockenmasse.  $N_{act}$  wird durch Elementaranalyse aus den jeweiligen Trockenmasseproben bestimmt. Sind die beiden Werte  $N_c$  und  $N_{act}$  bekannt, lässt sich die Diskrepanz zwischen tatsächlichem und Rechenwert des kritischen Stickstoffgehalts ermitteln. Aus diesem Verhältnis lässt sich der NNI (Lemaire und Gastal, 2002) bilden:

$$NNI = \frac{N_{act}}{N_c}$$

Der Ansatz über die kritischen Stickstoffwerte stellt eine verbesserte Annäherung zur Einschätzung der N-Versorgung dar, da die Werte nicht mehr nur in das Verhältnis zur Bodenverfügbarkeit oder zu Wachstumsindikatoren gesetzt werden sondern beides berücksichtigt wird. Aus unterschiedlichen Literaturquellen ist bekannt, dass der NNI mit Vegetationsindizes korreliert, wie z. B. dem NDVI sowie dem REIP. Diese grundlegende Idee wird in dem Forschungsansatz 2011 und 2012 vom ADLER-Projekt aufgenommen, um aus den Bilddaten des Agricopters eine an den Bedarf des Bodens und der Pflanze angepasste, teilflächenspezifische Stickstoffdüngung zu realisieren. Hierbei ergibt sich das N-Defizit aus der Differenz der  $N_c * W$  ( $W$ =Biomasse) und  $N_{act} * W$ .

Für die Ableitung von Algorithmen für die ortsspezifische N-Düngung wurden die oben beschriebenen Feldversuche angelegt. Die nachfolgende Tabelle 1 enthält die erfassten

Daten, Entwicklungsstadien sowie Zeitpunkt der Probennahme, die bei der Auswertung der Versuchsdaten herangezogen wurden.

Tab. 1: Datengewinnung 2010-2012

Feld	Beprobung	2010		2011		2012		
		Erster Schnitt	Zweiter Schnitt	Erster Schnitt	Zweiter Schnitt	Erster Schnitt	Zweiter Schnitt	Dritter Schnitt
ATB	BBCH			32	71	40	60	71
	Datum			04.05	08.06	10.05	25.05	08.06
	Spektrometer			04.05	08.06	10.05	25.05	08.06
	Agricopter			06.05	01.06	05.05	21.05	07.06
Thie- meyer	BBCH	25	33-37	32	71			
	Datum	31.03	12.05	28.04	31.05			
	Spektrometer	31.03	12.05	28.04	31.05			
	Flugzeug	24.03	05.05					
Otten	BBCH					40	60	
	Datum					10.05	25.05	
	Spektrometer					10.05	25.05	
	Agricopter						21.05	

### 3.2.3 Ergebnisse 2010

Das erste Forschungsjahr ADLER war hauptsächlich der Methodenentwicklung gewidmet. Auch konnten erste Erfahrungen gesammelt werden bezüglich Beziehungen von Luftbildsignaturen aus der Flugzeugfernerkundung und Spektralmessungen am Boden. Hierfür wurden auf zwei Versuchflächen des Betriebs Thiemeyer 45 Messpunkte anhand von Leitfähigkeitsmessungen, Höhenmodell sowie Bohrstockkartierungen bestimmt. Diese Punkte sind so ausgewählt, dass Sie möglichst die Standortvielfalt widerspiegeln. An den Messpunkten wurde in 5\*5 m Abstand um den Messpunkt mit 8 Wiederholungen spektroskopisch an den Pflanzen gemessen sowie jeweils ein Foto aus ca. 1 m Höhe aufgenommen. Die spektralen Signaturen aus Flugzeugbefliegungen wurden als Mittelwert eines 5\*5 m Rasters für die Monitoringpunkte ermittelt. Da insbesondere die Blattfläche einen wichtigen Indikator für die Photosyntheseleistung von Pflanzen darstellt konzentrierte sich die Forschung im Jahr 2010 auf eine Methodenentwicklung für die Abschätzung eines dem Blattflächenindex ähnlichen morphologischen Parameters aus der Bildauswertung. Im Folgenden wird kurz auf den Algorithmus eingegangen. Diese Methodik wurde auch in den weiteren Forschungsjahren weiterverfolgt.

#### Entwicklung einer Methode zur Schnellbestimmung des approximierten Blattflächenindex (aBFI)

Die Blattfläche ist das wichtigste morphologische Merkmal von Getreide. Sie bestimmt in hohem Maße die potenzielle Assimilationsleistung. Der Blattflächenindex (BFI) ist das Verhältnis der Blattfläche (einseitig) zur Bodenfläche. Der BFI steigt im Laufe der Vegetationsentwicklung von 0 aus an und kann in der Hauptphase bei sehr gut versorgtem Weizen Werte über 5 erreichen (d.h., die Blattfläche ist fünfmal größer als die darunter befindliche Bodenfläche). Die exakte Messung der Blattfläche ist nur destruktive möglich. Dazu müssen die Pflanzen geerntet und im Labor Blatt für Blatt vermessen werden. Diese Prozedur ist sehr zeit- und arbeitsaufwändig. Für schnellere, nicht-destruktive Messungen im Freiland werden spezielle LAI-Meter angeboten (LAI, Englisch für leaf area index). Diese Systeme sind jedoch verhältnismäßig teuer (bis 12 000 EUR) und teilweise umständlich in der Handhabung. Als kostengünstige, schnelle und daher besonders praxistaugliche Alternative wurde im Projekt ein kamerabasiertes Verfahren zur Schätzung des BFI entwickelt. Hierzu genügt eine normale Digitalkamera mit der die Messpunkte aus ca. 1 m Höhe aufgenommen werden. Durch digitale Bildverarbeitung wird aus den Fotos die projizierte Blattfläche bestimmt und daraus ein approximierter Blattflächenindex (aBFI) abgeleitet. Hierbei werden zunächst die grünfarbigen Pixel im Bild identifiziert

(Segmentierung) (Abbildung 20). Aus der Anzahl der segmentierten Pixel und der Gesamtzahl der Pixel eines Bildes wird der aBFI berechnet:

$$aBFI = \text{Pixel}_{\text{segm}} / \text{Pixel}_{\text{ges.}}$$

Der aBFI kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Ähnlich wie beim NDVI tritt ein Sättigungseffekt bei sehr dichten Beständen auf. Diese können daher weniger gut differenziert werden (Abbildung 20, recht Spalte)

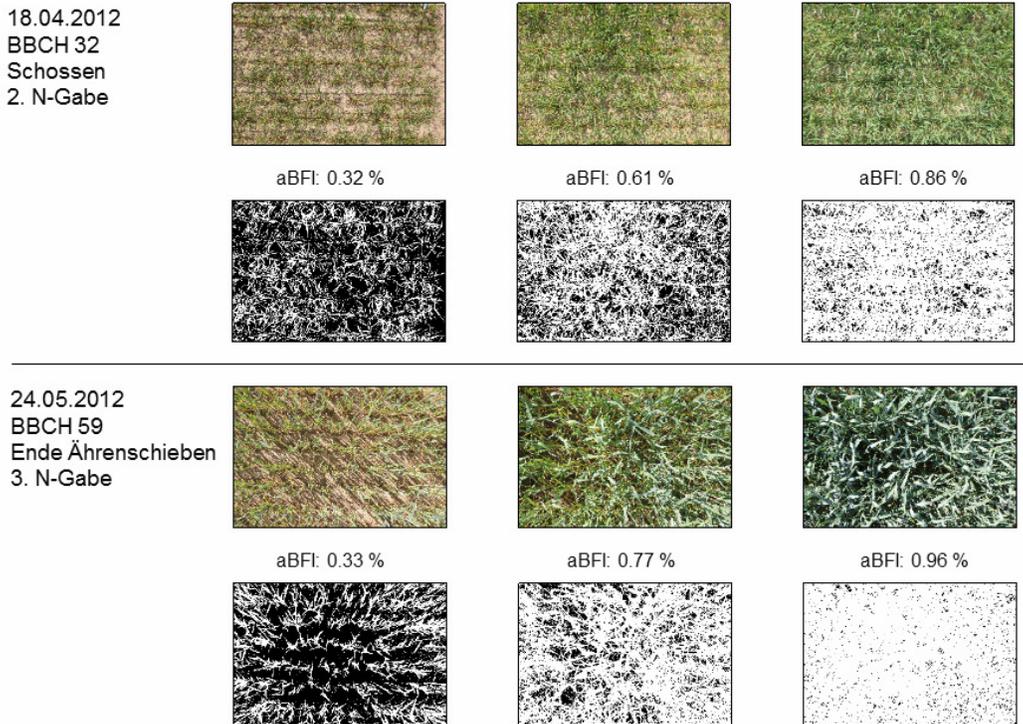


Abb. 20: Beispiel für die die Approximation des Blattflächenindex (aBFI) durch RGB-Aufnahmen am Boden und Bildverarbeitung. Dargestellt sind Bestände mit minimalen, medianen und maximalen aBFI zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt. Die Aufnahmezeitpunkte entsprechen Wachstumsstadien, zu denen üblicherweise die zweite und dritte N-Düngung erfolgt.

Die entwickelte Methode hat sich als robust und wenig anfällig gegen unterschiedliche Ausleuchtung, Lichtstreuung und Tiefenschärfe erwiesen. Die Algorithmen sind in Matlab programmiert. Weitere Informationen können Gebbers et al. 2013 entnommen werden.

### Auswertung 31.03.2010

Zeitgleich zur Beprobung durchgeführte Flugzeugbefliegungen wurden in Beziehung gesetzt zu Spektralmessungen am Boden sowie mit dem aBFI. Die Korrelationen sind in Tabelle 2 dargestellt. Ein p-Wert unter 0.05 bedeutet, dass der Korrelationskoeffizient statistisch signifikant von Null verschieden ist bei einem 95.0%-Konfidenzniveau. Die Korrelationen zwischen aBFI und den mit dem Spektrometer am Boden gemessenen Signaturen im roten, grünen und blauen Wellenlängenbereich (Berechnung Mittelwert in Anlehnung an LandSat) sind relativ gut. Die beste Beziehung ergibt sich zwischen aBFI und den spektralen Signaturen im roten Wellenlängenbereich mit  $r=0,8$ . Zwischen den spektralen Signaturen aus dem Luftbild und dem am Boden gemessenen Werten besteht nur eine sehr geringe Beziehung. Allerdings war der Flugzeitpunkt sehr früh und aufgrund des langen und kalten Winters sind die Bestände erst spät in die vegetative Phase eingetreten. Hierdurch sind die spektralen Signaturen auf dem Luftbild sehr stark durch das „Bodensignal“ beeinflusst.

## ADLER Abschlussbericht

Tab. 2: Korrelationsmatrix Spektraldaten und aBFI

	aBFI	blau_lb*	grün_lb	rot_Lb	VARI_lb	VARI***	log(blau_spec)**	log(grün_spec)	log(rot_spec)
aBFI		-0.493	-0.401	-0.436	0.084	0.66	-0.760	-0.731	-0.805
n'		45	45	45	45	45	45	45	45
p''		0.0006	0.000	0.000	0.580	0.000	0.000	0.000	0.000
blau_lb	-0.493		0.936	0.952	0.002	-0.804	0.39	0.345	0.610
n	45	45	45	45	45	45	45	45	45
p	0.000		0.000	0.000	0.988	0.000	0.007	0.019	0.000
grün_lb	-0.401	0.936		0.958	0.174	-0.748	0.327	0.279	0.538
n	45	45	45	45	45	45	45	45	45
p	0.006	0		0	0.251	0	0.028	0.063	0.0001
rot_lb	-0.436	0.9522	0.9589		-0.1108	-0.761	0.2916	0.2313	0.5125
n	45	45	45	45	45	45	45	45	45
p	0.002	0.000	0.000		0.468	0.000	0.052	0.126	0.000
VARI_lb	0.084	0.002	0.174	-0.111		-0.004	0.165	0.207	0.142
n	45	45	45	45	45	45	45	45	45
p	0.580	0.988	0.251	0.468		0.982	0.277	0.170	0.351
VARI	0.66	-0.804	-0.747	-0.761	-0.003		-0.581	-0.501	-0.809
n	45	45	45	45	45	45	45	45	45
p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.981		0.000	0.000	0.000
log(blau_spec)	-0.760	0.393	0.327	0.291	0.165	-0.582		0.981	0.939
n	45	45	45	45	45	45	45	45	45
p	0.000	0.007	0.028	0.052	0.277	0.000		0.000	0.000
log(grün_spec)	-0.731	0.345	0.279	0.231	0.207	-0.502	0.981		0.914
n	45	45	45	45	45	45	45	45	45
p	0.000	0.019	0.063	0.126	0.170	0.000	0.000		0.000
log(rot_spec)	-0.805	0.610	0.538	0.512	0.142	-0.81	0.939	0.914	
n	45	45	45	45	45	45	45	45	
p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.351	0.000	0.000	0.000	

\*blau\_lb=blaue Signatur Luftbild

\*\*blau\_spec=blaue Signatur Spektrometer

\*\*\*VARI=Vegetationsindex im sichtbaren Bereich (grün-rot)/(grün+rot-blau)

`n=Anzahl der Beobachtungen

``p=Signifikanzniveau von 0.05

### Auswertung 12.05.2010

Zum zweiten Termin wurde an den Monitoringpunkten in Ergänzung zum aBFI auch Biomasseschnitte durchgeführt. Hierbei wurden jeweils  $4 \times 0,25\text{m}^2$  beerntet, feucht gewogen und anschließend im Trockenschrank 24 Stunden bei  $70^\circ$  getrocknet und gewogen. Die Korrelationsmatrix ist nachfolgend in Tabelle 3 dargestellt. Ein p-Wert unter 0.05 bedeutet, dass der Korrelationskoeffizient statistisch signifikant von Null verschieden ist bei einem 95.0%-Konfidenzniveau. Der aBFI korreliert mit  $r=0,79$  gut mit den spektralen Signaturen des Spektrometers im roten Wellenlängenbereich sowie dem VARI\_Luftbild ( $r=0,73$ ). Die Biomasse zeigt keine signifikanten Beziehungen zu den spektralen Messdaten. Dies ist auch nicht unbedingt zu erwarten da Biomasse bessere Beziehungen zu Messungen im NIR-Bereich aufzeigt als im RGB. Die spektralen RGB-Luftbildsignaturen korrelieren mäßig mit den Spektrometermessungen wobei die RGB-Werte untereinander hoch korreliert sind.

## ADLER Abschlussbericht

Tab. 3: Korrelationsmatrix Spektraldaten, Biomasse und aBFI

	Biomasse g/m2 (FM)	Biomasse g/m2 (TM)	aBFI	blau_lb*	grün_lb	rot_lb	VARI_lb	VARI***	blau_spec**	grün_spec	rot_spec
Biomasse g/m2 (FM)		0.726	0.326	-0.202	-0.153	-0.021	-0.224	0.027	-0.384	-0.390	-0.297
n'		(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)
p''		<b>0.000</b>	<b>0.028</b>	0.182	0.313	0.887	0.138	0.860	<b>0.009</b>	<b>0.007</b>	<b>0.046</b>
Biomasse g/m2 (TM)	0.726		-0.189	0.105	0.153	0.042	0.197	-0.184	0.102	0.216	0.221
n	(45)		(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)
p	<b>0.000</b>		0.212	0.491	0.315	0.783	0.193	0.225	0.502	0.154	0.143
aBFI	0.326	-0.189		-0.613	-0.592	-0.214	-0.732	0.701	-0.602	-0.761	-0.799
n	(45)	(45)		(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)
p	<b>0.028</b>	0.212		<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	0.157	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
blau_lb	-0.202	0.105	-0.612		0.977	0.791	0.793	-0.630	0.525	0.578	0.662
n	(45)	(45)	(45)		(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)
p	0.182	0.491	<b>0.000</b>		<b>0.000</b>						
grün_lb	-0.153	0.153	-0.596	0.977		0.790	0.819	-0.596	0.528	0.584	0.659
n	(45)	(45)	(45)	(45)		(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)
p	0.313	0.315	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>		<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
rot_lb	-0.021	0.042	-0.214	0.791	0.790		0.299	-0.411	0.333	0.241	0.349
n	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)		(45)	(45)	(45)	(45)	(45)
p	0.887	0.783	0.157	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>		<b>0.045</b>	<b>0.005</b>	<b>0.025</b>	0.110	<b>0.018</b>
VARI_lb	-0.224	0.197	-0.732	0.793	0.819	0.299		-0.554	0.511	0.689	0.706
n	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)		(45)	(45)	(45)	(45)
p	0.138	0.193	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.045</b>		<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
VARI	0.027	-0.184	0.70	-0.630	-0.596	-0.411	-0.554		-0.582	-0.562	-0.784
n	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)		(45)	(45)	(45)
p	0.860	0.225	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.005</b>	<b>0.000</b>		<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
blau_spec	-0.384	0.102	-0.602	0.525	0.528	0.333	0.511	-0.582		0.933	0.920
n	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)		(45)	(45)
p	<b>0.009</b>	0.502	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.025</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>		<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
grün_spec	-0.390	0.216	-0.761	0.578	0.584	0.241	0.689	-0.562	0.933		0.948
n	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)		(45)
p	<b>0.007</b>	0.154	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	0.110	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>		<b>0.000</b>
rot_spec	-0.298	0.221	-0.799	0.662	0.659	0.349	0.706	-0.784	0.920	0.948	
n	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	(45)	
p	<b>0.046</b>	0.143	<b>0.00</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.018</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	

\*blau\_lb=blaue Signatur Luftbild

\*\*blau\_spec=blaue Signatur Spektrometer

\*\*\*VARI=Vegetationsindex im sichtbaren Bereich (grün-rot)/(grün+rot-blaue)

n=Anzahl der Beobachtungen

p=Signifikanzniveau von 0.05

Aus den Auswertungen für 2010 ergab sich die Notwendigkeit, neben den Praxisversuchen auch kontrollierte Blockversuche anzulegen um zu allgemeineren Aussagen zu gelangen und Algorithmen abzuleiten.

### 3.2.4 Ergebnisse 2011

Die nachfolgenden statistischen Auswertungen wurden mit StatGrafics Centurion, Version 16.1.11 durchgeführt (Firma StatPoint Technologies, Inc.). Die Daten wurden Ausreißer bereinigt und entsprechend so aufbereitet, dass die Voraussetzungen für die statistischen Analysen vorhanden waren.

Bei den Auswertungen der Felddaten 2011 und 2012 wurde sich auf folgende, klassische Vegetationsindizes aus der Literatur konzentriert, die sich aus dem genutzten Kamerasystemen des AgriCopters ableiten lassen:

NDVI (rot, grün, blau):  $(\text{NIR} - (\text{rot, blau, grün})) / (\text{NIR} + (\text{rot, grün, blau}))$

VARI:  $(\text{grün} - \text{rot}) / (\text{grün} + \text{rot} - \text{blau})$

Die Auswertung der Daten hat ergeben, dass der GreenNDVI im Mittel über beide Versuchsjahre und Schnittzeitpunkte auf allen Untersuchungsflächen die besten Beziehungen zu pflanzenphysiologischen Parametern aufzeigt. In den nachfolgend

dargestellten Ergebnissen für die Forschungsjahre 2011 und 2012 werden insofern nur Lösungsansätze auf Grundlage des GreenNDVI vorgestellt.

Ergänzende und tiefere Untersuchungen zu diesem Thema können Gebbers et al. 2013 entnommen werden.

Als quantitativer Index für die Ableitung von Algorithmen für die teilflächenspezifische N-Düngung aus Fernerkundungsdaten mit dem Agricopter wurde der NNI-Ansatz genutzt. Auf einer von den zwei Blockversuchsanlagen auf Marquardt wurden neben den Stickstoffsteigerungsversuchen auch 2 unterschiedliche Sorten angebaut. Mittels Varianzanalyse wurde getestet ob und welche der beiden Einflussfaktoren Düngung und Sorte den Vegetationsindex GreenNDVI beeinflussen (Tabelle 4).

Tab. 4: Varianzanalyse GreenNDVI gegen Sorte und N-Düngung

Ursache	Quadratsummen	FG	Mittl. Quadr.	F-Quotient	p-Wert
HAUPTEFFEKTE					
A:Sorte	0.005	1	0.005	0.49	0.491
B:N-Düngung	0.320	3	0.106	9.07	0.000
RESIDUEN	0.318	27	0.011		
TOTAL (KORR.)	0.644	31			

Die p-Werte zeigen an, ob die Faktoren statistisch signifikant sind. Da der p-Wert für die N-Düngung kleiner ist als 0.05, hat dieser Faktor einen statistisch signifikanten Effekt auf GreenNDVI bei einem 95.0%-Konfidenzniveau. Der Einfluss der Sorte auf den GreenNDVI ist für unseren Versuch statistisch nicht signifikant. Insofern werden die Versuchdaten von beiden Blockanlagen unabhängig von der Sorte gemeinsam ausgewertet.

Im nachfolgenden Box-Whisker-Plot (Abbildung 21) wird ein Diagramm dargestellt, das wichtige numerische Eigenschaften des GreenNDVI im Zusammenhang mit den N-Düngungsstrategien verbildlicht.

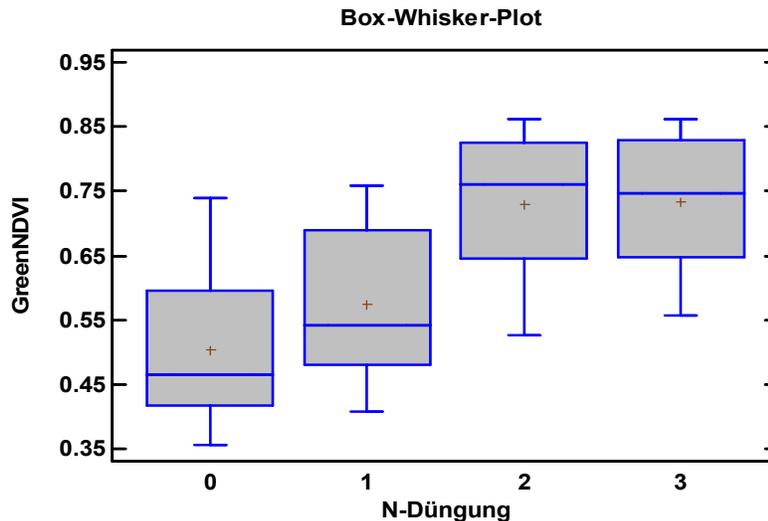


Abb. 21: Box-Whisker Plot des GreenNDVI nach N-Düngungsstufen gegen (Minimum, Quartil, Median, Mittelwert, oberes Quartil, Maximum)

Nachfolgende Tabelle 5 zeigt auf, in welchen Düngungsstufen sich der GreenNDVI signifikant von einander unterscheidet. Die untere Hälfte der Tabelle enthält die geschätzten paarweisen Differenzen zwischen den Stufenmittelwerten. Ein Stern wurde bei 4 Paaren platziert, was bedeutet, dass diese Paare statistisch signifikant verschieden sind bei einem

95.0%-Konfidenzniveau. Es wurden 2 homogene Gruppen identifiziert, dargestellt durch Spalten mit "X". Innerhalb jeder Spalte bilden die Stufen mit den "X" eine Gruppe von Mittelwerten, zwischen denen es keine statistisch signifikanten Unterschiede gibt. Die gegenwärtig angewandte Methode zur Unterscheidung zwischen den Stufenmittelwerten ist Fishers LSD-Verfahren. Bei dieser Methode gibt es ein Risiko von 5.0%, die Mittelwertpaare als signifikant verschieden einzuschätzen, wenn die tatsächliche Differenz gleich 0 ist.

Tab. 5: Signifikante Unterschiede des NDVI in den Düngungsgruppen (Methode: 95.0 Prozent LSD)

<i>N-Düngung</i>	<i>Anzahl</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Homogene Gruppen</i>
0	12	0.504	X
1	12	0.574	X
2	12	0.729	X
3	12	0.732	X

<i>Kontrast</i>	<i>Sig.</i>	<i>Differenz</i>	<i>+/- Grenzen</i>
0 - 1		-0.070	0.094
0 - 2	*	-0.225	0.094
0 - 3	*	-0.228	0.094
1 - 2	*	-0.155	0.094
1 - 3	*	-0.158	0.094
2 - 3		-0.002	0.094

\* bezeichnet einen statistisch signifikanten Unterschied.

### **Vegetationsindizes und Stickstoffdüngung**

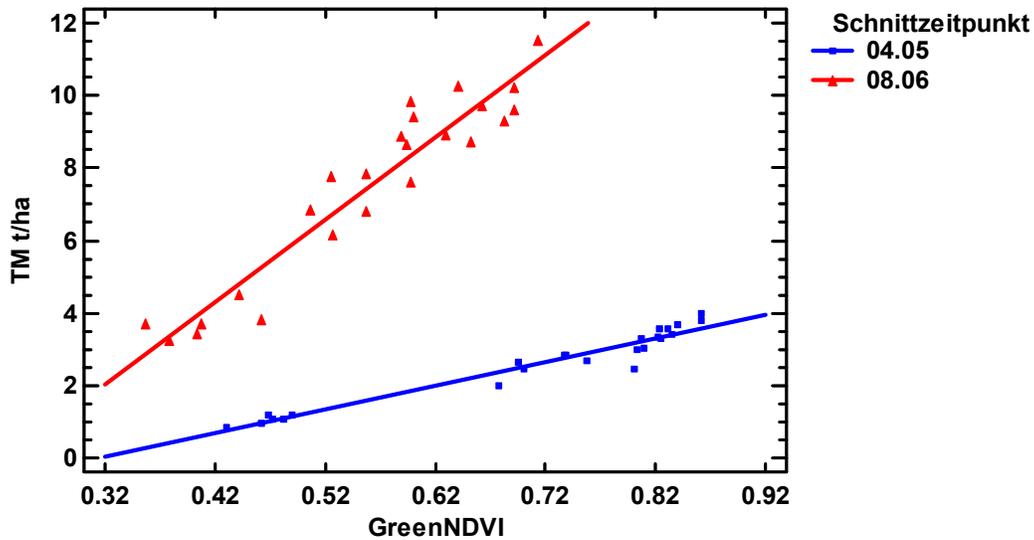
Im nachfolgenden werden Beziehungen zwischen dem GreenNDVI und pflanzenphysiologischen Parameter untersucht, die als Grundlage für die Berechnung des Stickstoffbedarfs nach dem NNI-Ansatz benötigt werden. Dieses sind, wie im Methodenteil beschrieben, die Trockenmasse und die N-Konzentration in %.

#### *Versuchsstandort Marquardt*

Nachfolgende Regressionsgerade (Abbildung 22) beschreibt die Beziehung zwischen Trockenmasse in t/ha und dem GreenNDVI für die zwei Schnittzeitpunkte am 04.05.2011 (BBCH 32) und 08.06.2011 (BBCH 71). Die Trockenmasse lässt sich zu beiden Schnittzeitpunkten mit einem hohen Bestimmtheitsmaß aus dem GreenNDVI schätzen. Allerdings unterschieden sich die Regressionsgeraden in Anstieg und Achsenschnittpunkt deutlich, d.h. die Schätzfunktion ist abhängig vom Zeitpunkt bzw. Wachstumsstadium. Für die praktische Anwendung bei der Düngungsbemessung ist es somit notwendig eine zeitnahe Kalibrierung vorzunehmen. Dazu muss mindestens an zwei Punkten die Biomasse durch Ernte und Wägung erfasst werden.

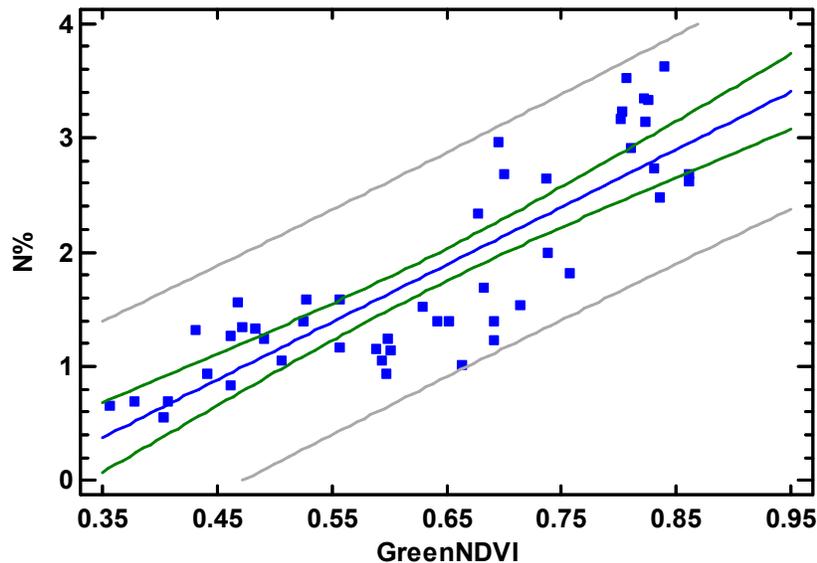
Neben der Schätzung der Biomasse ist auch die Abschätzung der N-Konzentration aus den Fernerkundungsbildern wünschenswert. Die Auswertung der Daten 2011 hat ergeben, dass sich für die Versuchsflächen auf Marquardt keine Verbesserung der Schätzung durch eine Betrachtung zu unterschiedlichen Schnittzeitpunkten ergibt. In der Abbildung 23 ist die Regression zwischen Stickstoffkonzentration und GreenNDVI zu beiden Schnittzeitpunkten dargestellt.

ADLER Abschlussbericht



<b>Schnittzeitpunkt = 04.05.2011</b> Korrelationskoeffizient = 0.984 R <sup>2</sup> = 96.854 Prozent Standardfehler der Schätzung = 0.187	<b>Schnittzeitpunkt=08.06.2011</b> Korrelationskoeffizient = 0.952 R <sup>2</sup> = 90.803 Prozent Standardfehler der Schätzung = 0.785
--	--

Abb. 22: Regression GreenNDVI gegen Trockenmasse in t/ha



Korrelationskoeffizient = 0.845  
 R<sup>2</sup> = 71.462 Prozent  
 Standardfehler der Schätzung = 0.482

Abb. 23: Regression GreenNDVI gegen N% über beide Schnittzeitpunkte

Das Bestimmtheitsmaß für die Schätzung beträgt 71 % mit einem mittleren Standardfehler der Schätzung von 0.48 %. Die Stickstoffkonzentrationen schwanken hierbei zwischen 0.5 % und 3.6 %.

Der aktuelle Gesamtstickstoffgehalt berechnet sich aus der gemessenen Biomasse\*N-Konzentration % und der kritische Gesamtstickstoffgehalt aus der empirischen Formel nach Justes et al. 1997. Für die Abschätzung des Düngedarfs ist somit zu testen, ob aus dem

GreenNDVI auch der aktuelle und kritische N-Gesamtgehalt direkt abgeschätzt werden kann. Die Tabelle 6 fasst die Beziehungen zwischen aktuellem Stickstoffgehalt sowie dem kritischen Gehalt und dem GreenNDVI zusammen.

Tab. 6: Korrelationen zwischen GreenNDVI und Stickstoffgehalt (aktuell und kritisch)

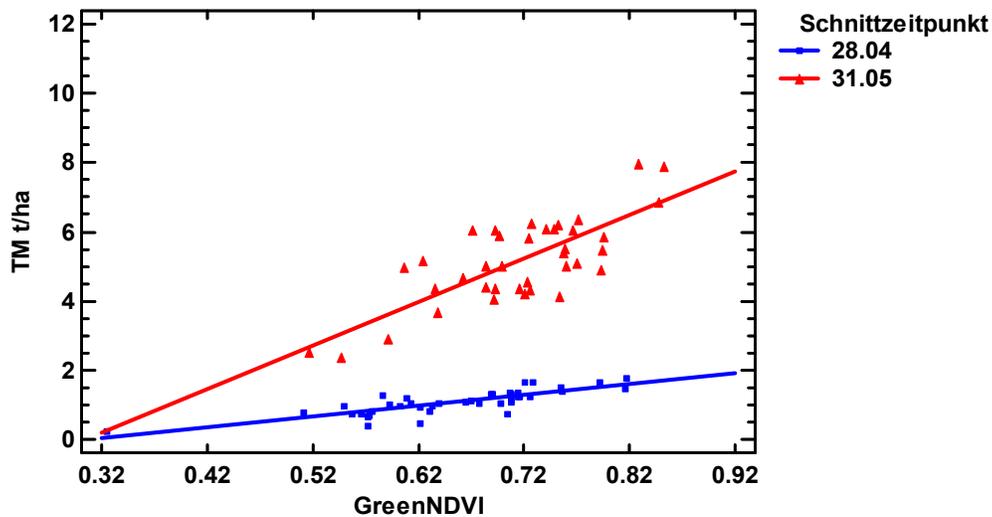
	Schnittzeitpunkt	Nkrit	Nact
GreenNDVI	04.05.2011	0.980	0.931
		(24)	(24)
		0.000	0.000
GreenNDVI	08.06.2011	0.846	0.918
		(24)	(24)
		0.000	0.000

Korrelation  
(Stichprobengröße)  
p-Wert

Die sehr guten Beziehungen zwischen den Gesamtstickstoffgehalten unterstützen die Hypothese, dass der GreenNDVI durchaus ein geeigneter Index ist für die quantitative Abschätzung der teilflächenspezifischen N-Düngemengen da sich aus der Differenz des kritischen Stickstoffgehalts abzüglich des aktuellen Gehalts der N-Düngebedarf errechnet.

*Versuchsstandort Betrieb Thiemeyer*

Die Daten auf dem Betrieb Thiemeyer werden für beide Flächen gemeinsam ausgewertet. Nachfolgende Regressionsgerade (Abbildung 24) beschreibt die Beziehung zwischen Trockenmasse in t/ha und dem GreenNDVI für die zwei Schnittzeitpunkte am 28.04.2011 (BBCH 32) und 31.05.2011 (BBCH 71).



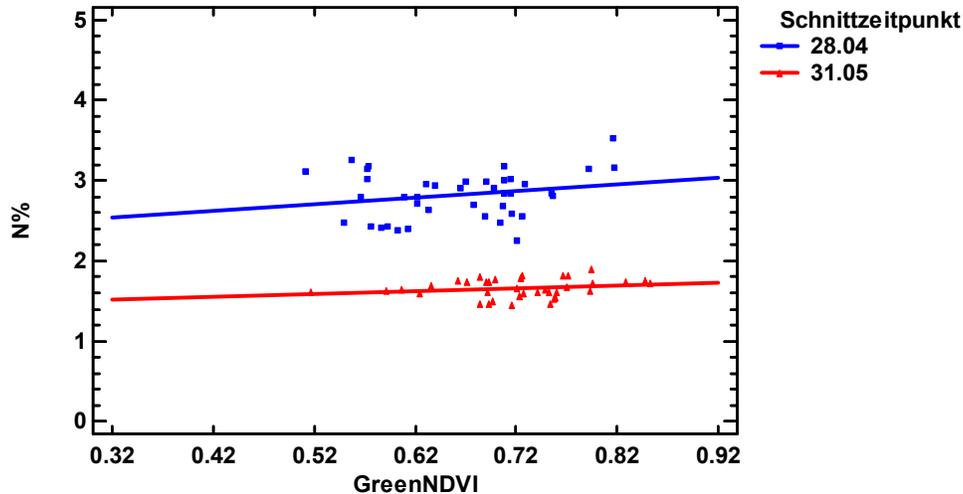
<p><b>Schnittzeitpunkt=28.04.2011</b>                      Korrelationskoeffizient = 0.882                      R<sup>2</sup> = 77.964 Prozent                      Standardfehler der Schätzung = 0.152</p>	<p><b>Schnittzeitpunkt=31.05.2011</b>                      Korrelationskoeffizient = 0.752                      R<sup>2</sup> = 56.644 Prozent                      Standardfehler der Schätzung = 0.843</p>
--	--

Abb. 24: Regression GreenNDVI gegen Trockenmasse in t/ha, getrennt nach Schnittzeitpunkten

Die Schätzung der Trockenmasse ist mit 77 % zum ersten Schnitt und 56 % zum zweiten Schnitt signifikant. Der Standardfehler der Schätzung beträgt zum ersten Schnitt 150 kg bei

einer Schwankungsbreite der Biomasse zwischen 0,24 und 1,7 t/ha und 840 kg zum zweiten Schnitt bei einer Schwankungsbreite zwischen 2,3 und 7,9 t/ha.

Weitaus schlechter ist sich allerdings die Schätzung des N-Gehalts auf den Praxisflächen (Abbildung 25).



<b>Schnittzeitpunkt=28.04.2011</b> Korrelationskoeffizient = 0.272 R <sup>2</sup> = 7.431 Prozent Standardfehler der Schätzung = 0.269	<b>Schnittzeitpunkt=31.05.2011</b> Korrelationskoeffizient = 0.213 R <sup>2</sup> = 4.577 Prozent Standardfehler der Schätzung = 0.113
---	---

Abb. 25: Regression GreenNDVI gegen N%, getrennt nach Schnittzeitpunkten

Im Gegensatz zu den Untersuchungen auf Marquardt sind die Beziehungen zwischen N-Gehalt und GreenNDVI getrennt nach Schnittzeitpunkten abgebildet.

Die Tabelle 7 fasst die Korrelationen zwischen dem kritischem und aktuellem Gesamtstickstoffgehalt zusammen.

Tab. 7: Korrelationen zwischen GreenNDVI und Stickstoffgehalt (aktuell und kritisch)

	Schnittzeitpunkt	Nkrit	Nact
GreenNDVI	28.04.2011	0.826	0.818
		(41)	(41)
		0.000	0.000
GreenNDVI	31.05.2011	0.759	0.730
		(39)	(39)
		0.000	0.000

Korrelation  
(Stichprobengröße)  
p-Wert

Trotz der schwachen Korrelation zwischen N-Gehalt und GreenNDVI zeigt sich, dass die aktuellen und kritischen Gesamtstickstoffgehalte mit hohen Bestimmtheitsmaßen abgeschätzt werden können.

### Übertragbarkeit des Modells

In diesem Abschnitt wird getestet, ob sich das auf Marquardt kalibrierte Regressionsmodell auf die Praxisflächen übertragen lässt. Hierbei wurde für die Abschätzung der Biomasse auf den Praxisflächen die Regressionsmodelle getrennt nach Schnittzeitpunkten und für den N-Gehalt das generelle Modell der Blockversuche genutzt. Die Entwicklungsstadien der

Weizenpflanzen waren zur Probennahme auf den Versuchsflächen und den Praxisflächen gleich. Die Korrelationen zwischen den erfassten Daten auf den Praxisflächen und den modellierten sind in der Tabelle 8 abgebildet.

Tab. 8: Korrelationsmatrix zwischen modellierten und tatsächlichen Daten auf den Praxisflächen (\*.1 Modellschätzungen)

	TM t/ha	N%	N-kritisch	N-aktuell
TM t/ha1	0.962	-0.880	0.971	0.923
	(80)	(80)	(80)	(80)
	0.000	0.000	0.000	0.000
N%1	0.549	-0.374	0.566	0.629
	(80)	(80)	(80)	(80)
	0.000	0.000	0.000	0.000
N-kritisch1	0.953	-0.899	0.971	0.917
	(80)	(80)	(80)	(80)
	0.000	0.000	0.000	0.000
N-aktuell1	0.951	-0.801	0.947	0.933
	(80)	(80)	(80)	(80)
	0.000	0.000	0.000	0.000

Korrelation  
(Stichprobengröße)  
p-Wert

Die Beziehungen zwischen den Modellwerten und den gemessenen/errechneten Werten auf den Praxisflächen sind bis auf die N-Gehalte sehr hoch. Aus den Versuchsergebnissen 2011 lässt sich ableiten, dass die N-Düngungsabschätzung relativ robust gegen Sortenunterschiede ist. Die Stickstoffdüngung und Stickstoffverfügbarkeit im Boden hat den größten Einfluss auf die für die N-Düngung wesentlichen pflanzenphysiologischen Parameter Biomasse und N-Gehalt. Eine Abschätzung der Biomasse sowie der N-Gehalte aus dem am Boden spektroskopisch gemessenen und abgeleiteten GreenNDVI ist möglich. Auch sind die auf Marquardt 2011 aufgestellten Regressionsmodelle auf die Praxisflächen übertragbar.

### 3.2.5 Ergebnisse 2012

#### *Versuchsstandort Marquardt*

In diesem Versuchsjahr wurden zu den Beprobungsterminen mit dem Agricopter Bilddaten aufgenommen. Die Flughöhe betrug ~90 m als ein guter Kompromiss von Auflösung und Flächenabdeckung. Die Aufbereitung der Bilder wird in Kapitel 3.1 beschrieben. Im Gegensatz zu 2011 steht bei der Auswertung der Daten das Potential für die N-Düngung aus den Bildern des Agricopters im Mittelpunkt. Wie schon 2011 hat sich auch im Jahr 2012 gezeigt, dass der GreenNDVI die besten Beziehungen zu den für den NNI-Ansatz genutzten, wichtigen pflanzenphysiologischen Parametern wie Biomasse und N-Gehalt aufzeigt.

Im Gegensatz zur Versuchsanlage 2011 wurden in diesem Jahr keine unterschiedlichen Sorten angebaut. Allerdings wurde die Blockanlage ergänzend zum Faktor N-Düngung durch den Faktor Bewässerung erweitert. In Ostdeutschland hat die Wasserversorgung neben der Stickstoffzufuhr eine besonders hohe Bedeutung da hier sandige Böden vorherrschen und Frühsommertrockenheit typisch sind. Mittels Varianzanalyse wurde getestet ob und welche der beiden Einflussfaktoren Düngung und Beregnung den Vegetationsindex GreenNDVI beeinflussen (Tabelle 9).

Tab. 9: Varianzanalyse GreenNDVI gegen N-Düngung und Beregnung

Ursache	Quadratsumme <i>n</i>	FG	Mittl. Quadr.	F-Quotient	p-Wert
HAUPTEFFEKTE					
A:Gruppierung_N-Düngung	0.652	3	0.217	48.89	0.000
B:Beregnung	0.000	1	0.000	0.000	0.951
RESIDUEN	0.191	43	0.004		
TOTAL (KORR.)	0.843	47			

Die p-Werte zeigen an, ob die Faktoren statistisch signifikant sind. Da der p-Wert für die N-Düngung kleiner ist als 0.05, hat dieser Faktor einen statistisch signifikanten Effekt auf GreenNDVI bei einem 95.0%-Konfidenzniveau. Der Einfluss der Beregnung auf den GreenNDVI ist für unseren Versuch statistisch nicht signifikant. Deshalb werden die Daten der Beregnungsvarianten zusammengefasst und gemeinsam ausgewertet.

Der nachfolgenden Box-Whisker-Plot (Abbildung 26) visualisiert den Einfluss der N-Düngung auf den GreenNDVI.

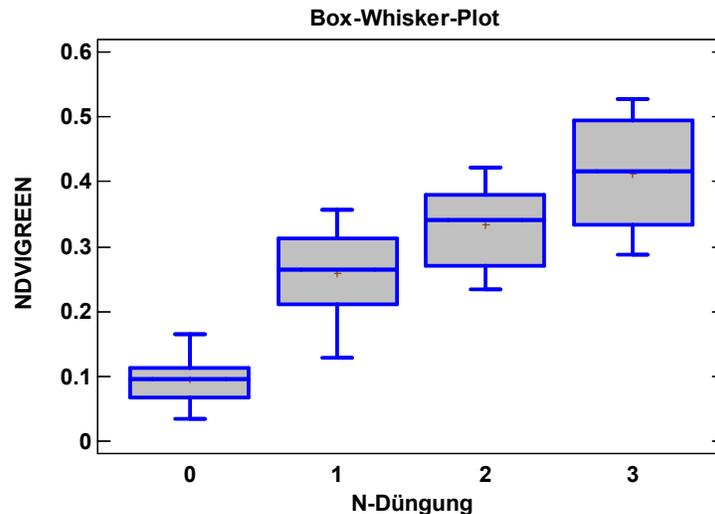


Abb. 26: Box-Whisker Plot des GreenNDVI gegen die N-Düngungsstufen (Minimum, Quartil, Median, Mittelwert, oberes Quartil, Maximum)

Die Tabelle 10 listet auf, zwischen welchen Düngungsgruppen sich der GreenNDVI signifikant unterscheidet. Die untere Hälfte enthält die geschätzten paarweisen Differenzen zwischen den Stufenmittelwerten. Ein Stern wurde bei allen Paaren platziert, was bedeutet, dass diese Paare auf dem 95.0%-Konfidenzniveau statistisch signifikant verschieden sind. Auch die obere Tabelle zeigt, dass der GreenNDVI zwischen den Düngungsstufen signifikant unterschiedlich ist.

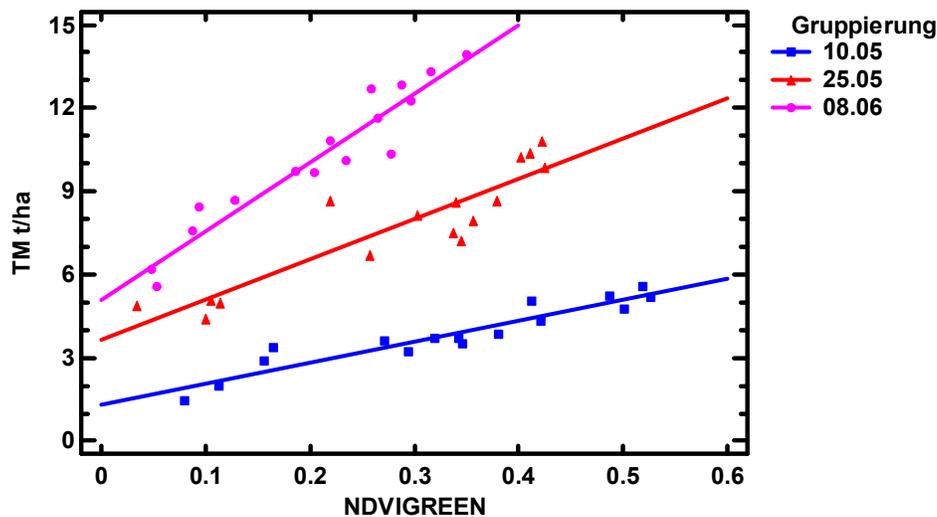
Tab. 10: Signifikante Unterschiede des NDVI in den Düngungsgruppen (Methode: 95.0 Prozent LSD nach Fischer)

Level	Anzahl	Mittelwert	Homogene Gruppen
0	12	0.096	X
1	12	0.259	X
2	12	0.332	X
3	12	0.411	X

Kontrast	Sig.	Differenz	+/- Grenzen
0 - 1	*	-0.162	0.054
0 - 2	*	-0.236	0.054
0 - 3	*	-0.315	0.054
1 - 2	*	-0.073	0.054
1 - 3	*	-0.152	0.054
2 - 3	*	-0.079	0.054

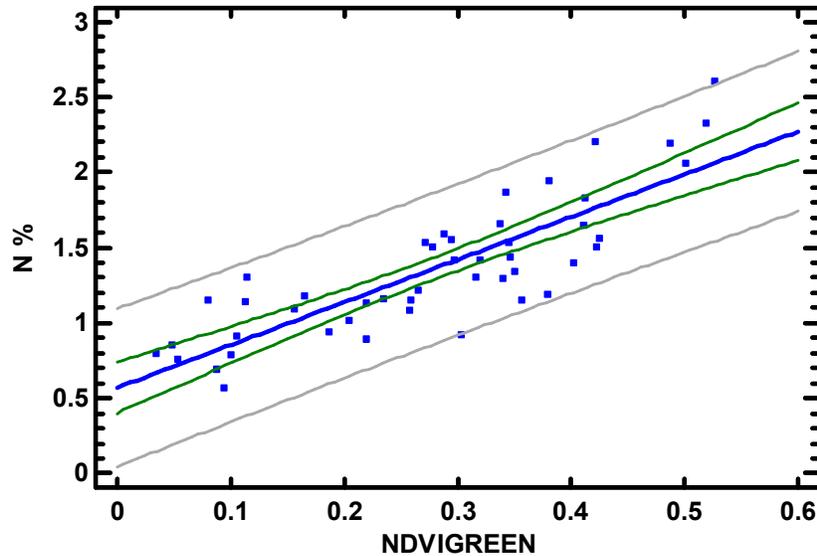
\* bezeichnet einen statistisch signifikanten Unterschied.

Im Gegensatz zu 2011 werden nachfolgend die Spektralinformationen aus den Bilder des Agriopters als Grundlage für die Ableitung von Vegetationsindizes genommen. Hierfür wurden für die Monitoringpunkte auf Marquardt der GreenNDVI aus den Bildinformationen berechnet und in Beziehung gesetzt zur Biomasse und N-Konzentration (Abbildung 27 und 28). Die Trockenmasse ließ sich zu allen drei Schnitzeitpunkten mit einem hohen Bestimmtheitsmaß aus dem GreenNDVI abschätzen. Allerdings unterschieden sich die Regressionsgeraden vom Anstieg und Achsenschnittpunkt deutlich. Auch 2012 zeigt sich, dass es für praktische Anwendungen notwendig ist, die Schätzfunktion über Messungen an mindestens zwei Punkten mit stark unterschiedlicher Biomasseentwicklung zeitnah zum Düngezeitpunkt zu kalibrieren.



Schnitzeitpunkt=10.05.2012	Schnitzeitpunkt=25.05.2012	Schnitzeitpunkt=08.06.2012
Korrelationskoeffizient = 0.943	Korrelationskoeffizient = 0.908	Korrelationskoeffizient = 0.958
R <sup>2</sup> = 89.052 Prozent	R <sup>2</sup> = 82.519 Prozent	R <sup>2</sup> = 91.964 Prozent
Standardfehler der Schätzung = 0.397	Standardfehler der Schätzung = 0.900	Standardfehler der Schätzung = 0.736

Abb. 27: Regression GreenNDVI gegen Trockenmasse zu den drei Schnitzeitpunkten (BBCH 40, 60, 71)



Korrelationskoeffizient = 0.840  
 R<sup>2</sup> = 70.714 Prozent  
 Standardfehler der Schätzung = 0.246

Abb. 28: Regression GreenNDVI gegen Stickstoffkonzentration über alle drei Schnittzeitpunkte

Es zeigt sich auch, dass auch die Stickstoffgehalte relativ gute Beziehungen zum GreenNDVI aufzeigen. Eine Spezifizierung der Schätzfunktionen für die Stickstoffgehalte nach Schnittzeitpunkten bringen kaum Verbesserungen. Um den GreenNDVI als Grundlage für die N-Düngung nach dem NNI-Ansatz zu nutzen ist ähnlich wie 2011 eine einmalige Schätzung/Bonitur oder sensorische Messung notwendig.

Die Tabelle 11 enthält die Korrelationen zwischen dem kritischen und aktuellen N-Gesamtgehalt.

Tab. 11: Korrelationen zwischen GreenNDVI und Stickstoffgehalt (aktuell und kritisch)

	Schnittzeitpunkt	Nkrit	Nact
GreenNDVI	10.05.2012	0.937	0.953
		(16)	(16)
		0.000	0.000
GreenNDVI	25.05.2012	0.918	0.893
		(16)	(16)
		0.000	0.000
GreenNDVI	08.06.2012	0.958	0.896
		(16)	(16)
		0.000	0.000

Korrelation  
 (Stichprobengröße)  
 p-Wert

Auch hier zeigt sich wieder, dass eine direkte Schätzung der Eingangsparameter für die N-Düngung mit hohen Bestimmtheitsmaßen möglich ist.

### 3.2.6 Schlussfolgerungen und Algorithmus

Mit Hilfe von den zuvor dargestellten Entwicklungs- und Versuchsergebnissen wurde ein Algorithmus für die Umsetzung der teilflächenspezifischen N-Düngung in Winterweizen erstellt. Dieser umfasst die großteils automatisierte Befliegung und Gewinnung von Luftbildern (RGB, NIR), die Erzeugung einer NDVI-Orthobildkarte, eine darauf basierende gezielte Analyse des N-Ernährungszustand/Düngebedarf der Pflanzen und die abschließende Kombination dieser Informationen zur Erstellung einer Applikationskarte (Abbildung 29).

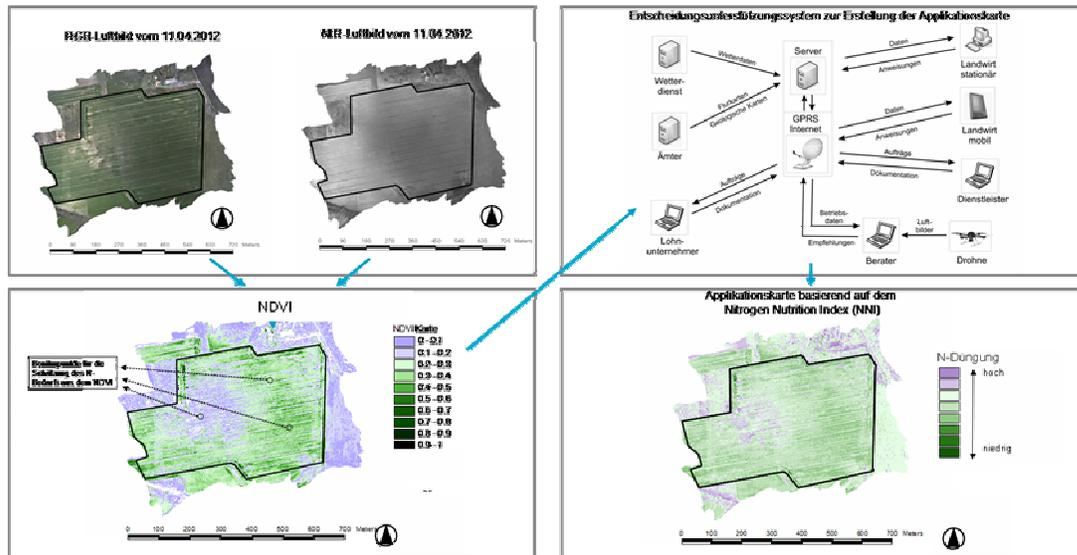


Abb. 29: Entscheidungsunterstützungssystem ADLER für die variable Applikation von N-Düngern in Winterweizen

Für das sogenannte „Ground Truthing“ und weitere Schritte des Algorithmus gilt folgendes:

- Die Erfassung der Biomasse muss zu den Schnittzeitpunkten anhand der Luftbilder zumindest für jeden Düngezeitpunkt separat erfolgen. Hierbei können lineare Beziehungen zwischen GreenNDVI und den pflanzenphysiologischen Parametern unterstellt werden, sodass wenige, jedoch geeignet gewählte Monitoringpunkte zur Kalibrierung ausreichen. Monitoringpunkte sollten in schlecht, mittel und gut entwickelten Beständen liegen. Aus unseren bisherigen Untersuchungsergebnissen schließen wir, dass auch eine Übertragung der Kalibrierung auf andere Flächen möglich ist, wenn der Düngezeitpunkt und wesentliche weitere Wachstumsbedingungen vergleichbar sind.
- Der N-Gehalt wird auf einer repräsentativen Fläche einmalig zum ersten Düngetermin erfasst. Das zu Grunde liegende Modell ist nach jetzigem Erkenntnisstand auch auf spätere Düngezeitpunkte übertragbar.
- Für die Monitoringpunkte wird aus Biomasse und N-Gehalt der aktuelle Gesamtstickstoffgehalt sowie der kritische Gehalt nach NNI-Ansatz ermittelt. Diese Daten können web-basiert ausgewertet werden, um so zeitnah zu einer N-Düngungsempfehlung unter Einbindung der unterschiedlicher Akteure (Landwirt, Berater, Lohnunternehmer) zu gelangen.
- Die Übermittlung der Applikationskarte an den Landwirt bzw. Lohnunternehmer ist der letzte Schritt.

Eine Erweiterung des nachfolgend beschriebenen GIS Moduls ADLER um die neuen und erst jetzt endgültig feststehenden, spezifischen Algorithmen in Hinblick auf den NNI-Ansatz ist problemlos möglich.

### **3.3 Methodik zur Bereitstellung des Stickstoffdüngungsplans**

Im Versuchsjahr 2011 konnten erste wesentliche Teile der im Versuchsjahr 2010 erarbeiteten Methodik zur Erstellung einer Streukarte zur teilflächenspezifischen Stickstoffapplikation für verschiedene landwirtschaftliche Fruchtarten entwickelt, erprobt und weiterentwickelt werden. Im Jahr 2012 wurde diese Methodik in ein GIS mit Schlagkarteifunktionen überführt und an ausgewählten Schlägen der Thüringen Praxisbetriebe angewendet.

Der Grundgedanke dieser Methodik ist es, den jeweiligen Schlag unter Auswertung der gesamten Datenlage (Bodenschätzung, Analyseergebnisse, Ertragskartierungen, etc.) in Ertragszonen einzuteilen und diese dann mit dem aktuellen Luftbild des Agricopters zu verschneiden. Anschließend wird das Luftbild (zunächst) in ein 25 m x 25 m Raster eingeteilt und für jede Rasterzelle ein Vegetationsindex berechnet. Darauf hin werden für jede Ertragszone die jeweiligen Maximum- und Minimumzellen des Vegetationsindex ausgewiesen. In diesen „Extremwertrastern“ werden Pflanzentests zur Bestimmung des Stickstoffbedarfs durchgeführt.

Im Wesentlichen wurden nachfolgende Teile dieser Methodik 2011 erprobt und entwickelt:

- Auswahl der **Methode zur Bestimmung des Stickstoffbedarfs** verschiedener landwirtschaftlicher Fruchtarten für die Berechnung einer Düngeempfehlung durch Vergleich der Düngeempfehlungen auf den Versuchsschlägen
- Erstellung eines **GIS-Moduls zur Verarbeitung und Auswertung der photogrammetrischen Daten** (Luftbilder) und Erstellung der Streukarte.

#### **3.3.1 Methode Bestimmung des Stickstoffbedarfs**

Die Methoden zur Bestimmung des Stickstoffbedarfs bei der 2. und 3. N-Gabe, die im Versuchsjahr 2011 verglichen wurden, sind die Bestimmung mittels N-Zange (Pflanzensaftbestimmung), der N-Tester von YARA (Farbtest), der PreAgro-Algorithmus (Halme zählen, N-Tester, Auf- und Abschläge für z.B. Witterungsbedingungen und Relief) sowie die auf Erfahrung beruhende Empfehlung des betreffenden Landwirts / Beraters.

Die Vergleichskriterien waren Zeit- und Kostenaufwand, Höhe der empfohlenen N-Menge und gleich bleibende Düngeempfehlung bei mehrfachen Wiederholungen.

Der N-Tester schnitt bei diesem Vergleichstest am besten ab. Er ist im Vergleich zur N-Zange zwar wesentlich teurer, dafür ist aber seine Handhabung deutlich einfacher und zeitschonender. Am aufwendigsten ist die Erstellung einer Düngeempfehlung mittels PreAgro-Algorithmus. Neben einer sehr zeitaufwendigen Zählung der Pflanzen und Halme benötigt auch dieser für einen Auf- bzw. Abschlag den N-Tester. Des Weiteren lagen die ermittelten Düngeempfehlungen deutlich über denen der N-Zange, des N-Testers und des Landwirts. Aus diesen Gründen wird im Versuchsjahr 2012 auf die Berechnung der Düngeempfehlung mittels PreAgro verzichtet und im Weiteren die Empfehlungen der N-Zange und des N-Testers verglichen.

#### **3.3.2 GIS-Modul zur Verarbeitung und Auswertung der photogrammetrischen Daten (Luftbilder) und Erstellung der Streukarte**

Um die Luftbilder des Oktokopters auswerten zu können, war laut Projektplan, die Entwicklung ein GIS-Modul vorgesehen, welches neben den Bildern des Oktokopters auch RGB-Aufnahmen aus anderen Quellen auswerten kann.

Da aufgrund der notwendigen technischen Entwicklung eine Befliegung aller Versuchsfelder mit dem projekteigenen Koptersystem 2011 noch nicht möglich war, wurden für das Versuchsjahr 2010 zunächst Luftbilder aus anderen Quellen genutzt.

Für die Erstellung des Programms wurden umfangreiche Programmierarbeiten, überwiegend bei der RUCON Engineering und Teilleistungen bei Unterauftragnehmern (gemäß

Projektplan) geleistet. Der Test des Programms erfolgte unter Nutzung der genannten Luftbilder.

Das fertiggestellte GIS-Modul ADLER erlaubt es, RGB-Bilder als auch RGB-NIR-Aufnahmen gemäß der oben beschriebenen Methodik auszuwerten. Zur Auswertung von RGB-Bilder wird der VARI (**V**isible **A**tmospherically **R**esistant **I**ndex) als Vegetationsindex verwendet, für die RGB-NIR-Aufnahmen der NDVI (**N**ormalized **D**ifferenced **V**egetation **I**ndex). Andere Algorithmen bzw. Indices sind jederzeit in das Programm integrierbar.

In das Modul werden die Luftbilder, die Schlaggrenzen und die Ertragszonen (shapes) eingegeben. Jede Ertragszone wird dann wie ein eigener (weitgehend homogener) Schlag behandelt.

Zunächst erfolgt die Einteilung in ein beliebig großes Raster. Gemäß der entwickelten Methodik soll dies zunächst ein 25m x 25m großes Raster sein. Entsprechend den jeweiligen technologischen Anforderungen können die Rastergrößen aber auch verändert werden.

Anschließend werden die durchschnittlichen Vegetationsindizes der einzelnen Rasterflächen berechnet und innerhalb jeder Ertragszone das Raster mit dem höchsten und dem niedrigsten Vegetationsindex ausgewiesen. Falls gewünscht, kann ein Schlag auch nur aus einer Ertragszone bestehen.

Durch ein Ground-Truthing wird der aktuelle Stickstoffbedarf der Pflanzen in diesen „Extremwertrastern“ bestimmt und die zu streuende Düngermenge ausgewiesen (N-Tester). Das Programm berechnet nunmehr durch lineare Interpolation die erforderlichen Düngemengen für jedes Rasterfeld sowie den Mittelwert für jede Ertragszone (siehe Abbildung 30).

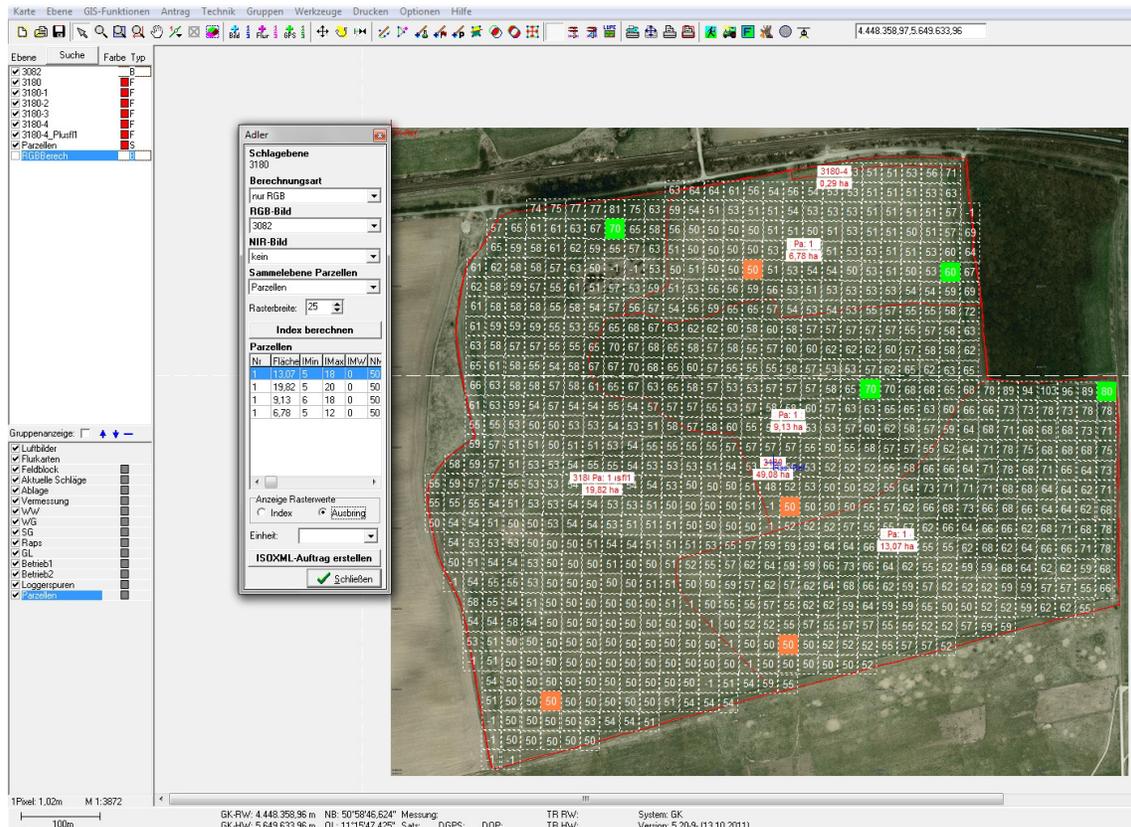


Abb. 30: GIS-Modul ADLER, Düngungsberechnung. Rasterzellen mit extremen Werten sind grün (hoch) und rot (niedrig) markiert

Diese „Düngeempfehlung“ wird dem Landwirt / Berater übergeben, der (auf der Grundlage seiner Erfahrungen und seiner gewählten Düngestrategie) den Ertragszonen-Mittelwert verändern und neu festlegen kann. Das Programm rechnet daraufhin die Düngemengen für jede Rasterzelle neu aus, so dass die Bildinformationen erhalten bleiben. Diese endgültige Streukarte kann dann ggf. mittels Mobilfunk auf das Traktorterminal übertragen werden.

## **4 Diskussion und Zielerreichung**

Die im Projektantrag aufgeführten Forschungs- und Entwicklungsziele für das ADLER-Projekt wurden weitestgehend realisiert. Teilweise mussten wir an einigen Forschungsfragen und Meilensteinen Modifikationen vornehmen. Diese Abweichungen von der ursprünglichen Planung dienten der Adaptierung der Arbeiten infolge kurzfristiger Entwicklungen wie z.B. Witterungsverlauf, Defekten oder Verfügbarkeit von neuen technischen Komponenten. Insgesamt hat das Projekt jedoch den Zeitrahmen eingehalten. Es folgt eine kurze Stellungnahme zu den Arbeitspaketen und dem Zielerreichungsgrad.

### **4.1 AP 1: Fernerkundungssystem**

Insgesamt wurde das Gesamtziel des AP 1.1 realisiert. Der Agricopter ermöglicht die geforderte zeitnahe und preiswerte Befliegung von Feldern innerhalb der gesamten Vegetationsperiode. Das System ist robust und leicht handhabbar. Der Arbeitsschwerpunkt des AP 1.1. mussten auf das Kamerasystem und AP 1.2 verlagert werden, da sich die georeferenzierte Orthofotoerstellung als größte Herausforderung erwies. So wurden im Projekt keine Arbeiten zur Berechnung von Flugstrecken und zum autonomen Starten und Landen durchgeführt. Dies lag an der erwähnten Verlagerung des Arbeitsschwerpunkts. Weiterhin wurden der verwendeten Basisplattform seitens des Herstellers während der Projektlaufzeit bereits so viel Funktionalität in Hinsicht Flugstrecken und Starten und Landen hinzugefügt, dass eine Eigenentwicklung nicht mehr notwendig war. Im AP 1.1 . nun vornehmlich das Kamerasystem multispektral konstruiert und GPS-Technologie integriert. Im AP 1.2 wurde die radiometrische Korrektur durch ein eigenes Verfahren realisiert. Die geometrische Korrektur wurde für Einzelbilder über die Camera Calibration Toolbox for Matlab vorgenommen. Für Orthofotos wurde diese Korrektur durch die Photogrammetrie-Software selbst durchgeführt. Es wurden diverse Softwarepakete evaluiert. Unter den Aspekten Leistung, Kosten und Ergonomie fiel die Wahl dabei auf PhotoScan Professional von Agisoft. Die Erstellung georeferenzierter Orthofotos konnte letztlich zufriedenstellend realisiert werden.

Die Entwicklung des Gesamtsystems aus AP 1 ist somit abgeschlossen .

Die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern war sehr produktiv. So wurde von allen Projektpartnern die Befliegung der Zielflächen professionell geplant und koordiniert. Die technischen Entwicklungen des Agricopters wurden in enger Absprache mit den Projektpartnern getroffen, so dass die Lösungen auf den Anwendungsfall der Stickstoffdüngung zugeschnitten sind. Ein reger Austausch von Ideen und Informationen ermöglichte eine positive Entwicklung der Teillösungen und des Gesamtsystems.

### **4.2 AP 2: Modelle und Algorithmenentwicklung für die Entscheidungsfindung**

Die Modelle für die Algorithmenentwicklung wurden abgeschlossen und das Projekt hat hierfür den Zeitrahmen eingehalten. Im Jahr 2011 wurde für die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung neben komplexen analytischen Auswertungsroutinen den NNI-Ansatz

getestet. Da sich dieser Index als relativ robust gegen Sortenunterschiede und Landschaften erwies, wurde dieser Ansatz im Versuchsjahr 2012 weiterverfolgt. Komplexere Auswertungsroutinen, wie im Projektantrag erwähnt, sind somit für die Umsetzung von Entscheidungsregeln nicht notwendig. Auch konnte basierend auf den im Zwischenbericht 2010 und 2011 beschriebenen Lösungskonzepten zeitig in 2011 mit der softwaretechnischen Realisierung eines GIS-gestützten Entscheidungsmodells begonnen werden. Die Ergebnisse aus 2012 unterstützen die Hypothese, dass aus den Agricopter abgeleitete Informationen zeitnah für die Datengewinnung und Düngung genutzt werden können.

### **4.3 AP 3: Web-basiertes System für Daten- und Workflow-Management**

Bei einem Bildflug über einen 50 Hektar Schlag entstehen je nach Flughöhe mehrere hundert Bilder. Diese ergeben zusammen mehrere hundert Megabyte an Daten. Die Übertragung dieser Daten einen Server mit drahtlosen Verfahren, d.h. per UMTS (Stand der Technik), dauert mehrere Stunden. Weiterhin kann eine stabile UMTS-Verbindung gegenwärtig nicht von jedem Ort aus garantiert werden.

Deshalb fiel die Entscheidung im Versuchsjahr 2012 auf ein semi-web-basiertes System für das Daten- und Workflow-Management. Die Bilder werden vom Büro des Dienstleisters aus auf den Server übertragen, zusammengesetzt und ausgewertet (Berechnung Vegetationsindex). Das ausgewertete Bild kann dann vom jeweiligen Berater durch einen personalisierten Zugang vom Server des Dienstleisters auf seinen Rechner übertragen und dort weiterverarbeitet werden. Die Erstellung der Streukarte erfolgt dann direkt auf dem PC des Beraters mit Hilfe des im Rahmen des Projektes entwickelten GIS-Moduls ADLER, welches fest installiert ist und über Updatefunktionen mit dem Server des Dienstleisters in Verbindung steht.

Die Kooperationspartner haben im ADLER-Projekt sehr gut zusammengearbeitet und in regelmäßigen Arbeitstreffen den Sachstand diskutiert. Die Rucon Engineering hat zeitnah im Projekt eigene UAS-Systeme parallel zu denen im Projekt gekauft bzw. aufgebaut und hierbei auf die Erfahrungen und Lösungen aus dem Projekt zugreifen können. Dies bezieht sich insbesondere auf technische Entwicklungen auf dem Kopter sowie auf den Arbeitskomplex Bildverarbeitung und georeferenzierte Orthobilderstellung. Insbesondere letztgenannte Aufgabe hat sich doch als sehr viel zeitaufwändiger herausgestellt da hierbei die spezifischen Bedingungen bei der Bilderfassung mit einem UAS berücksichtigt werden müssen. Daneben wurde gemeinsam eine praktikable Lösung für die Umsetzung der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung unter Einbindung von Luftbildern aus UAS erarbeitet. Die Rucon Engineering bietet inzwischen vielfältige Dienstleistungen für die landwirtschaftliche Praxis an und profitiert hierbei von den Entwicklungen aus ADLER. Die DBU hat mit der Förderung dieses Projekts schon frühzeitig die Potentiale der UAS-Technologie für die umweltgerechte Landbewirtschaftung erkannt.

## **5 Öffentlichkeitsarbeit**

Schon zu Beginn des Projektes konnte ein sehr reges Interesse der Presse an den Arbeiten in ADLER festgestellt werden. Dies setzte sich auch im zweiten Forschungsjahr fort. Eine Liste der durchgeführten Öffentlichkeitsarbeiten und Publikationen sind im Anhang aufgelistet. Ergänzend wurde 2011 vom Projekt Vorbereitungen getroffen, um die erste deutschsprachige Konferenz zu unbemannt fliegenden Systemen für die umweltgerechte Landbewirtschaftung durchzuführen. Die Konferenz hat am März 2012 in Berlin stattgefunden. Sie war mit 75 Teilnehmern völlig ausgebucht und es mussten Interessenten aus Platzmangel zurückgewiesen werden. Unter den Teilnehmern waren Firmen (u.a. Claas, Fritzmeier), Wissenschaftler und Studenten. Es wurden 18 Vorträge gehalten die das große Spektrum der Entwicklungen und Anwendungen von UAS zeigten. Weiterhin hat sich das

ADLER Projekt auf den DLG-Feldtagen 2012 in Bernburg präsentieren und so viele Kontakte zur landwirtschaftlichen Praxis hergestellt.

## 6 Danksagung

Die Autoren danken der DBU für die Förderung des Projekts ADLER (Az 26805) und die freundliche Unterstützung über die Projektlaufzeit.

## 7 Literaturverzeichnis

Bachmann, F.; Herbst, R.; Gebbers, R. and Hafner, V. (2013-1): Micro UAV based georeferenced orthophoto generation in VIS+NIR for Precision Agriculture. Accepted paper UAV-G conference in Rostock.

Bachmann, F., Herbst, R., Gebbers, R. und Hafner, V.(2013-2): Agricopter – Micro UAV basierte georeferenzierte Orthofotoerstellung in VIS+NIR für Precision Farming. Accepted paper CBA-AUS Workshop 2013 in Berlin

Debevec P., Tchou C., Gardner A., Hawkins T., Poullis C., Stumpf J., Jones A., Yun N., Einarsson P., Lundgren T. and Fajardo M. (2004): Estimating surface reflectance properties of a complex scene under captured natural illumination, ACM Transactions on Graphics

Gebbers, R.; Tavakoli, H. and Herbst, R. 2013. Crop sensor readings in winter wheat as affected by nitrogen and water supply. European Conference on Precision Agriculture (ECPA 2013). Lleida, Spain (to be published)

Goldman D. B. and Hung Chen J. (2005): Vignette and exposure calibration and compensation. Proceedings of the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV05), Vol. 1, IEEE Computer Society: 899-906

Heege, H.J.; Reusch, S. and Thiessen, H. (2008): Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. Precision Agriculture, Volume 9, Issue 3, 115-131

Justes, E.; Jeuffroy, C. and Mary, B. (1997): Wheat, barley and durum wheat. European Journal of Agronomy, Volume 29/2008, 184-190

Lemaire, F. and Gastal, G. (2002): N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. Journal of Experimental Botany, Volume 53/2002, 789-799

Mistele, B., Schmidhalter, U. 2008. Estimating the nitrogen nutrition index using canopy reflectance measurements. In: European Journal of Agronomie, Volume 29, pp. 184-190

Neitzel, F. and Klonowski J. (2011): Mobile 3D-mapping with a low-cost UAV system. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-1/C22, 1-6

## 8 Anhang

### 8.1 Öffentlichkeitsarbeit

#### Presseberichte und Publikationen ADLER

##### 2010

- DBU Pressemitteilung, 12.01.2010, Unbemannte Flugobjekte „Spione“ für eine nachhaltige Landwirtschaft
- BR online, 12.01.2010, Flugroboter - Geballte Hightech in Miniatur
- Presstext, 13.01.2010, Mini-Helikopter für nachhaltige Landwirtschaft
- Der Standard, 13.01.2010, Mini-Helikopter schwebt über dem Acker
- Antenne Thüringen, 15.01.2010, Der ADLER ist gelandet
- Welt online, 17.01.2010, Fliegender Helfer für den Landwirt
- agrar heute, 19.01.2010, Drohnen für eine nachhaltige Landwirtschaft
- Aandrijftechniek.nl, 19.01.2010, Quadcopters helpen bij bodembemesting
- natur+kosmos, 19.01.2010, Unbemannte Flugobjekte helfen bei der Bodenanalyse
- top agrar online, 20.01.2010, Drohnen sollen Flächen überprüfen
- vdi Nachrichten online, 22.01.2010, Aufklärer überm Acker
- BauernZeitung, 29.01.2010, Ufo untersucht Untergrund
- Märkische Oderzeitung, 30.01.2010, Fliegendes Auge fürs Feld
- Deutsche Welle, 24.02.2010, Living Planet
- Hamburger Abendblatt, 24.03.2010, Forscher machen Piloten überflüssig
- c't, 12.04.2010, Fliegen wie die Bienen
- HU Wissen, Humboldts Forschungsmagazin, Fliegende Roboter für die Landwirtschaft / Flying robots for agriculture, Humboldt-Universität zu Berlin, Juli 2010
- rbb Fernsehen Abendschau, 21.09.2010, 19:30, Berliner Wissenschaftsjahr: Wie funktioniert Intelligenz?
- Bauern Zeitung, 44. Woche, 5. November 2010, Das Projekt „Adler“, S.45
- 2010: Deutschlandradio Kultur, 10.03.2010, Elektronische Welten, Pflanzenspion in der Luft
- Steps into Future - Jugendmedienmagazin, "Die vernetzte Kuh auf Höhenflug" 8.10.2010

- rbb Inforadio, 18.10.2010, 10:25, Wissenswerte, QED 2010, Zukunftsthema Roboter

## 2011

- 2011: Neue Landwirtschaft 2011: Daten vom Adlerauge, Heft 1-2011, Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, S. 44-46, Januar 2011
- ZEIT Online Wissen, 25.08.2011, Fliegende Augen
- Ferry Bachmann: Vortrag bei der Geoinformatik 2011, Münster, Juni 2011 (A micro air vehicle for agricultural remote sensing tasks)
- Ferry Bachmann, Verena Hafner: Teilnahme an der motodrone, Finowfurt, August 2011
- Ferry Bachmann: Teilnahme an der sFly summer school, Zürich, Juli 2011
- Ferry Bachmann, Verena Hafner: Ausstellung Robotik auf der KI 2011, TU Berlin, Oktober 2011
- Ferry Bachmann: Ausstellung Google Developers Day, Berlin, November 2011

## Master- und Bachelorarbeiten

- Chung, T. und Schröder, B. (2011): Multispektrale Abschätzung des N-Bedarfs von Triticum aestivum (Winterweizen) unter Berücksichtigung des Nitrogen Nutrition Index. Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Fachgebiet Tierhaltungssysteme und Verfahrenstechnik
- Laufende Masterarbeit am Fachgebiet: Bischoff, S. (2013): Nutzung von UAS Bildern (RGB und NIR) für die ortsspezifische Stickstoffdüngung unter Berücksichtigung des Nitrogen Nutrition Index. Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Fachgebiet Tierhaltungssysteme und Verfahrenstechnik

## 2012

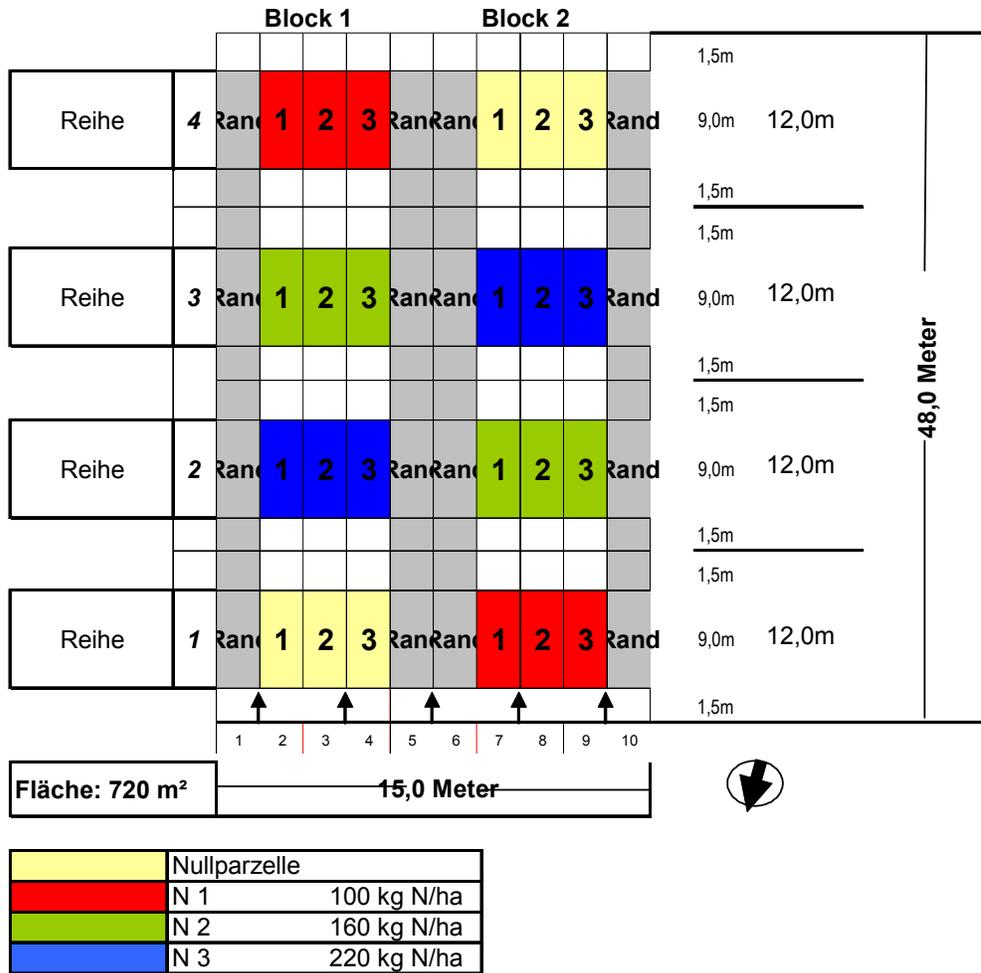
- Flyer Erlebnisbauernhof Grüne Woche 2012: Autonom fliegende Drohnen für die umweltgerechte Landbewirtschaftung, Fördergemeinschaft Nachhaltige Landwirtschaft (FNL)
- Tagung zu UAS am 05.03.2012 in Berlin
- DLG Feldtage, 19-21.06.2012

## 2013

- Präsentation + Paper (akzeptiert) „Agricopter – Micro UAV basierte georeferenzierte Orthofotoerstellung in VIS+NIR für Precision Farming“, 2. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft, 05.05.2013 in Berlin
- Präsentation + Paper (akzeptiert) „Micro UAV based geo-referenced orthophoto generation in VIS+NIR for precision agriculture“, UAV-g 2013, 05.09.2013 in Rostock
- Präsentation + Paper (akzeptiert) Gebbers, R.; Tavakoli, H. and Herbst, R. (2013): Crop sensor readings in winter wheat as affected by nitrogen and water supply. European Conference on Precision Agriculture (ECPA 2013). Lleida, Spain (to be published)

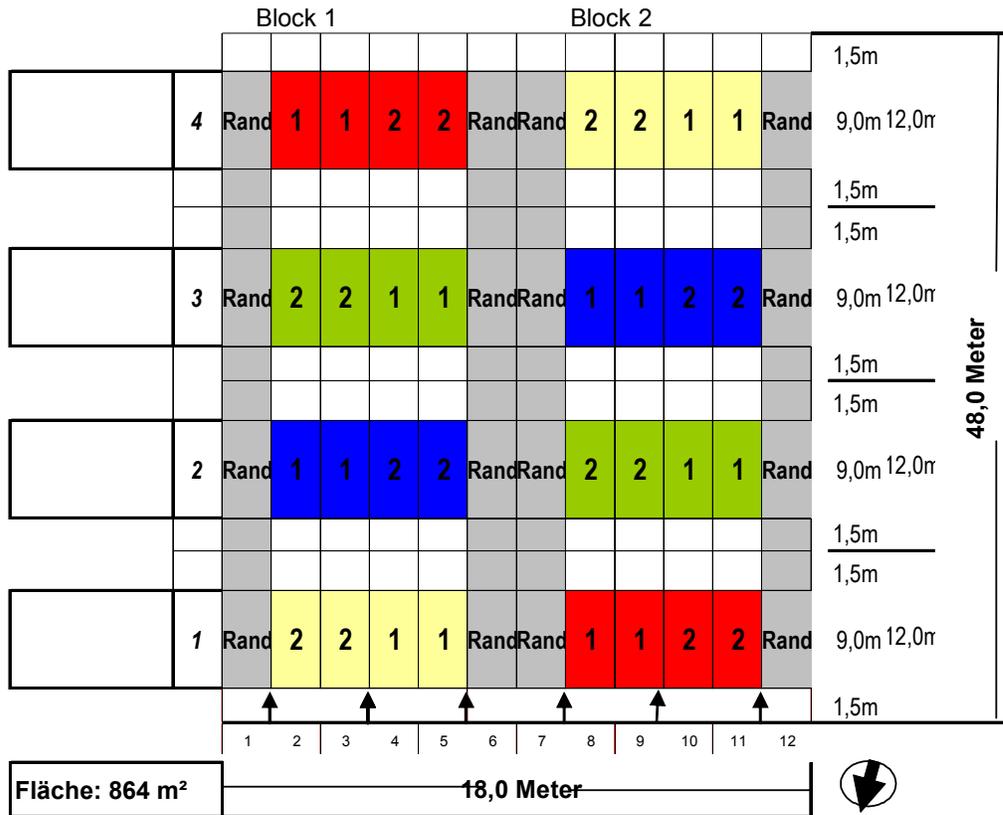
## 8.2 Versuchsanordnungen auf dem Gelände des Bundes-sortenamts Marquardt

Stickstoffsteigerungsversuch 2011



# ADLER Abschlussbericht

## Stickstoffsteigerungs- und Sortenversuch 2011

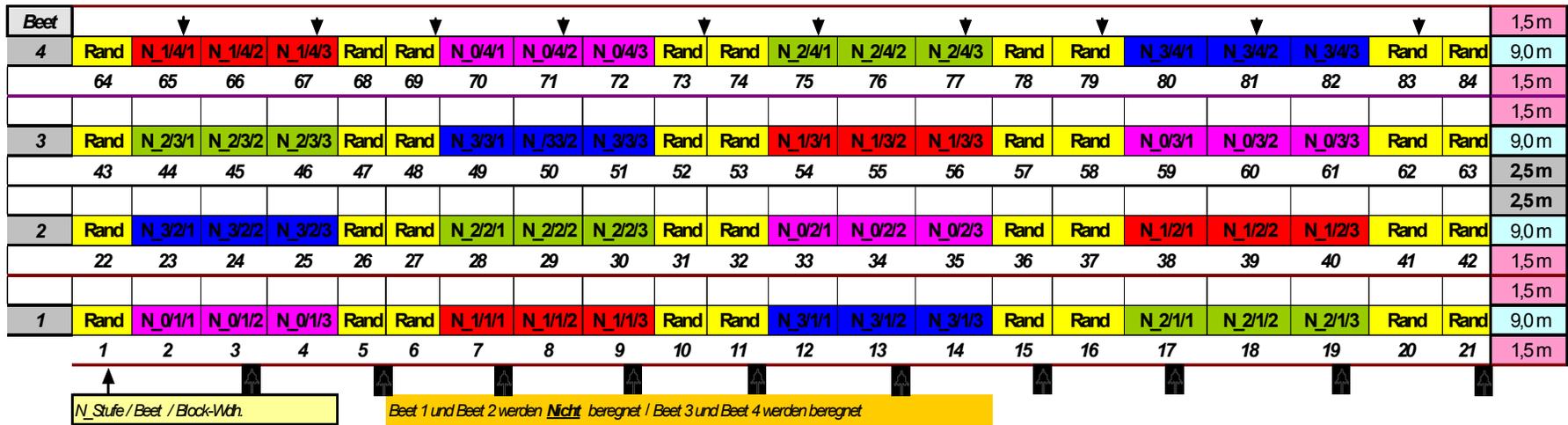


Nullparzelle	
N 1	100 kg N/ha
N 2	160 kg N/ha
N 3	220 kg N/ha

Anbau-Nr. 1 = WW Sorte CUBUS  
 Anbau-Nr. 2 = WW Sorte DRIFTER

# ADLER Abschlussbericht

## Stickstoffsteigerungs- und Beregnungsversuch 2012



	Nullparzelle
	N 1      60 kg N/ha
	N 2      120 kg N/ha
	N 3      240 kg N/ha