

3.3 Luftbilder (TP II-2)

Teilprojektleiter: Prof. Dr.-Ing. R. Bill

Bearbeiter: Dr.-Ing. G. Grenzdörffer, Dipl. Geogr. T. Foy, Dipl. Geogr. A. Irrgang

3.3.1 Zusammenfassung

Im Jahre 2001 konnten die geometrischen Untersuchungen zu dem am IGGI entwickelten digitalen integrierten flugzeuggetragenen Fernerkundungssystem für precision farming (PFIFF) abgeschlossen werden. Daneben ist das untersuchte Sensorenspektrum in der zweiten Projekthälfte wesentlich erweitert worden, zum einen durch die Verwendung von Landsat TM Satellitenbildern und zum anderen durch terrestrische Spektrosensoren (Hydro-N-Sensor im Spektralmodus) und Feldspektrometermessungen. Der Fokus der Auswertungen lag auf der multitemporalen Analyse verschiedener Zeiträume und dem Vergleich verschiedener Sensoren. Als digitale Auswertestrategien zur Analyse der Luftbilder sind Indizes zur Bestandesdichte/Biomasse sowie objektorientierte Klassifizierungsansätze erfolgreich zum Einsatz gekommen.

Summary

In the year 2001 the accuracy assessment of the geometric properties of the integrated digital airborne remote sensing system for precision farming (PFIFF) could be successfully finished. Beside this the focus of the research activities was widened by investigating additional sensors in the second half of the project. On one hand satellite sensors, like Landsat TM and on the other hand terrestrial sensors like the Hydro-N sensor in the spectral mode and field spectrometer measurements. The focus of the investigation of these sensors dealt with time-series image analysis at different time and spatial scales and the comparison of different sensors. For the airborne imagery indices for the crop development and the vegetation fraction were successfully explored. Further more object oriented classification strategies were also tested.

3.3.2 PFIFF

Am Institut für Geodäsie und Geoinformatik ist in den letzten Jahren für Precision Farming ein digitales integriertes flugzeuggetragenes Fernerkundungssystem (PFIFF) entwickelt worden (Grenzdörffer, 2001).

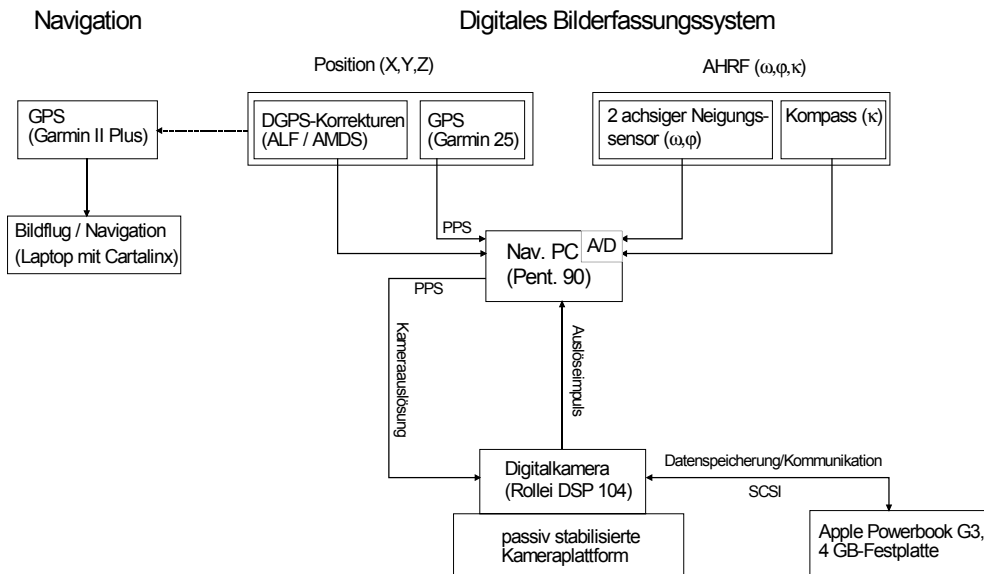


Abb. 3.3-1: Aufbau und Komponenten des flugzeuggetragenen integrierten digitalen Fernerkundungssystems PFIFF

Fig. 3.3-1: Components of the airborne integrated digital remote sensing system PFIFF

Neben der Kamera gehören die GPS-gestützte Bildflugnavigation, ein integriertes System zur automatischen GPS-gestützten Auslösesteuerung und ein Attitude Heading Reference System (AHRS) zur genäherten Erfassung der Parameter der äußeren Orientierung mittels GPS, einem zweiachsigen Neigungssensor und einem Magnetkompass zum Gesamtsystem, das in Abb. 3.3-1 schematisch dargestellt ist.

3.3.3 PFIFF unter Bildflugbedingungen

Bei der Registrierung der Lageparameter der äußeren Orientierung (als Näherungs- bzw. Startwerte für eine automatische Bildzuordnung sind neue, preiswerte Sensoren eingesetzt, kalibriert und erprobt worden. Um die Genauigkeit des PFIFF zur direkten Orientierungsbestimmung unter Flugzeugbedingungen zu testen, wurde am 02.11.2000 ein signalisierter Bildflug von zwei Testgebieten durchgeführt. Die photogrammetrische Auswertung liefert unabhängige Kontrollinformationen zur Qualitätsbestimmung der direkt gemessenen Position und der Lagewinkel. Durch den Vergleich der Parameter der äußeren Orientierung beider Systeme kann die Absolutgenauigkeit der direkten Positions- und Winkelbestimmung durch das GPS/AHRS-System festgestellt werden. In einem nächsten Schritt können die Bilder mit den Orientierungsparametern des GPS/AHRS Systems direkt georeferenziert werden. Vergleiche mit bekannten Kontrollpunkten am Boden liefern Informationen über die erzielbare Genauigkeit der Punktbestimmung im Objektraum aus den direkt orientierten Luftbildern. Dieser Genauigkeitsvergleich ist umfassend, da sich sowohl Restfehler der Orientierungsparameter als auch Kalibrierfehler des optischen Systems sowie Fehler bei der Ausrichtung und Synchronisation der verschiedenen Sensoren in den Differenzvektoren zu den bekannten Kontrollpunktkoordinaten zeigen.

Das Bildflugzeug, eine Cessna 172, wurde mit einem ASTECH-3DF-Multi-Antennen-GPS-Empfänger ausgerüstet. Dafür wurden die vier Antennen für den Test provisorisch auf dem Flugzeugdach montiert und mit einem Tachymeter TC 600 relativ zueinander exakt eingemessen. Darüber hinaus wurde eine L1/L2-Flugzeugantenne für den Leica SR 399-Empfänger direkt oberhalb der Kamera auf dem Flugzeugdach fixiert. Die Höhendifferenz zum Projektionszentrum wurde gemessen und als Antennenoffset berücksichtigt. Die Garmin 25 GPS-Antenne des Navigationssystems wurde ebenfalls auf dem Flugzeugdach montiert. Auf einen DGPS-Korrekturdienst wurde aufgrund der S/A-Abschaltung verzichtet. Die Digitalkamera mit dem aufgesetzten Neigungssensor wurde für den Flug fixiert, um eine stabile relative Orientierung der Kamera zu dem GPS-Mehrantennen-System zu gewährleisten.

Es wurden zwei Testgebiete in der Nähe des Flughafens als photogrammetrische Blöcke aufgenommen. Der erste Block dient dabei zur Simultankalibrierung und zum Genauigkeitsvergleich der eingesetzten Neigungssensoren und der GPS-Positionsbestimmung. Mit dem zweiten Block sollen die Möglichkeiten und das Genauigkeitspotential einer passpunktlosen automatischen Aerotriangulation (AT) unter den für precision farming üblichen Bildflugbedingungen untersucht werden.

Für den Block Purkshof (Flugplatzgelände bei Rostock) lagen Passpunkte in ausreichender Anzahl vor, so dass die Lage des Bildhauptpunktes im Rahmen einer Simultankalibrierung für den Bildflug bestimmt werden konnte. Die äußere Genauigkeit des Blocks Purkshof – gemessen an unabhängigen Kontrollpunkten – betrug bei einem Bildmaßstab von 1:16.500 ca. 10 cm in der Lage und 21 cm in der Höhe, was im Ergebnis mit herkömmlichen photogrammetrischen Kameras durchaus vergleichbar ist. Bei der geringeren Höhengenaugkeit ist das Basisverhältnis der Digitalkamera zu berücksichtigen, welches um den Faktor 2,5 geringer ist als bei einer Reihenmesskammer mit einem Weitwinkelobjektiv.

In einem Bore-sight-Alignment wurde der Winkeloffset zwischen den Ergebnissen der Aerotriangulation, die sich auf das Projektionszentrum beziehen, und den gemessenen 3DF-Winkeln, die sich auf die auf dem Flugzeugdach montierten GPS-Sensoren beziehen, bestimmt. Ein Vergleich der GPS-Koordinaten des hochgenauen L1/L2-Empfängers und des einfachen GPS-Empfängers ergab, unter der Berücksichtigung des Antennenoffsets zwischen den beiden Empfängern für die Projektionszentren der beiden Blöcke, dass der Garmin-Empfänger für seine Preisklasse eine sehr hohe Genauigkeit von < 4 m in der Lage liefert. Auch unter Berücksichtigung der maximalen Abweichungen ist die Koordinatenqualität des Garmin-Empfängers für die Initialisierung einer automatischen Aerotriangulation ausreichend, auch wenn die Koordinaten bei der Ausgleichung nicht mehr zur Ergebnisverbesserung beitragen können. Ein Vergleich der Winkelmessungen ergab, dass die 3DF-Winkel auf dem Flugzeugdach $0,35^\circ - 0,55^\circ$ von den Winkeln der Aerotriangulation abwichen. Im Gegensatz dazu wichen die direkt gemessenen Winkel des AHRS um 1° im Nickwinkel, $2,45^\circ$ im Rollwinkel sowie 14° im Kurswinkel von den indirekt bestimmten Winkeln der AT ab. Die äußerst unbefriedigenden Werte des Kompass sind auf verschiedene Faktoren zurückzuführen, die nachträglich kaum korrigiert werden können.

Für den Block Toitenwinkler Moorwiesen (in Rostock) wurde das Konzept einer passpunktlosen Aerotriangulation angewendet, bei der nur die Positionen der Projektionszentren hochgenau in die Triangulation eingeführt werden müssen. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die innere Orientierung der Kamera bekannt ist, denn durch die fehlende Redundanz ist keine Simultankalibrierung möglich.

Die eingeführten Startwerte der äußeren Orientierung der L1/L2-GPS-Positionen und 3DF-Winkel erwiesen sich als hinreichend genau, um den Prozess der automatischen Verknüpfungspunktsuche erfolgreich zu initialisieren. Die äußere Genauigkeit wurde durch Kontroll-

punkte /-linien aus der ALK, die nicht in die Triangulation mit einbezogen wurden, bestimmt (vgl. Abb. 3.3-2, s. Anhang) und lag bei einem Bildmaßstab von 1 : 44.500 im Subpixelbereich, d. h. < 1 m in der Lage.

Mit diesem erfolgreichen Experiment wird das hohe geometrische Genauigkeitspotential der Digitalkamera deutlich und Möglichkeiten einer effizienten automatischen passpunktlosen Aerotriangulation mit dem Farbdigitalsensor aufgezeigt.

Das bedeutet, dass der ursprüngliche Ansatz, mit preiswerten Sensoren die näherungsweise Bestimmung der äußeren Orientierung zu ermöglichen, nur teilweise erfolgreich war. Während die GPS-Projektionszentren als Startwerte für eine automatische AT hinreichend genau waren, hat die Winkelbestimmung durch das AHRS unter den speziellen Bildflugbedingungen nur zu teilweise befriedigenden Ergebnissen geführt. Jedoch zeigte der umfassende Vergleich, dass unter der Verwendung hochgenauer GPS-Technik mit dem PFIFF eine automatische passpunktlose Aerotriangulation möglich ist und zu sehr guten Ergebnissen führt.

3.3.4 Multitemporale Satellitenbildauswertung Sachsen-Anhalt

Zur Untersuchung der Vegetationsdynamik innerhalb einer Vegetationsperiode sowie zur Untersuchung und zum Vergleich der spektralen Reflexionsmuster von terrestrischen und flugzeuggestützten Sensoren (N-Sensor im Spektralmodus (TP I-2, Anwendung von Modulen in der Praxis), Pendolometer (TP III-5, Herbizide, Fungizide und Wachstumsregler), Luftbilder (TP II-2, Luftbilder), NIR-Aufnahmen (TP II-4, Bestandesinformationen)) ist eine Landsat-TM-Satellitenbildserie, bestehend aus 12 Miniszene (50 * 50 km) vom 20.02. – 20.08.2001 erworben worden. Der Ausschnitt der Miniszene wurde so gewählt, dass alle Projektschläge der Wimex bzw. TAS Raguhn ausgewertet werden können. Von den 12 Szenen, die in einem zeitlichen Intervall von 16 Tagen aufgezeichnet wurden, sind aufgrund der Bewölkung nur 5 Szenen im Zeitraum vom 13.05. - 03.08.01 – teilweise mit Einschränkungen – verwertbar. Damit konnte leider keine Aufnahme während der Bestockungs- bzw. der Schossphase vor dem Fahrenblattstadium ausgewertet werden.

Die Vorverarbeitung der Satellitenbildszenen umfasste eine Atmosphärenkorrektur mit ATCOR 1.8 sowie eine subpixelgenaue Geokodierung auf die TK 25. Bei einem Wolkenanteil von 40 % und mehr stoßen die automatischen Routinen von ATCOR zur Bestimmung der Sichtweite bzw. dem Dunst an ihre Grenzen, was den manuellen Arbeitsaufwand stark erhöht. Auf der Grundlage atmosphärenkorrigierter Aufnahmen ist ein direkter multitemporaler Vergleich der Grauwerte einzelner Kanäle bzw. abgeleiteter Indizes zwischen den Aufnahmen möglich.

3.3.4.1 Sensorvergleich am Beispiel des Schlages Kiesberg

Im Folgenden soll anhand des Schlages Kiesberg (23,95 ha) der Wimex AG Baasdorf ein Vergleich zwischen den verschiedenen terrestrischen, flugzeug- und satellitengestützten Sensoren vorgenommen werden. Der Schlag weist eine große bodenbürtige Heterogenität auf (Ackerzahlen 32 - 82). Im Rahmen des Intensivmessprogramms 2001 wurden durch Dr. Dammer (TP III-5, Herbizide, Fungizide und Wachstumsregler) an 19 Punkten verschiedene Bestandesparameter (Biomasse, Bestandeshöhe, LAI, Anzahl Halme/m², Krankheitsbefall) zu unterschiedlichen Zeitpunkten als Ground Truth-Daten bestimmt. Die Bestandesparameter (Biomasse, Bestandeshöhe, LAI) weisen hohe lineare Korrelationen untereinander auf. So beträgt am 17.5.01 für Biomasse zu LAI das lineare Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,78$ sowie Bestandeshöhe zu LAI $R^2 = 0,67$ und Biomasse zu Bestandeshöhe $R^2 = 0,77$.



3.3.4.1.1 Vergleich Landsat TM- und Hydro-N-Sensor im Spektralmodus

Ab EC 34 – 37 wird bei Winterweizen nahezu das gesamte Licht im roten Wellenlängenbereich absorbiert. Die geringen Reflexionswerte von 2 – 4 % im roten Wellenlängenbereich sind rauschbehaftet und werden bei der atmosphärenkorrigierten Landsat TM-Szene nur durch maximal 6 verschiedene Grauwerte abgebildet. Die starke Grenzflächenreflexion im NIR führt hingegen zu Reflexionen von 43 – 58 %, was einem Umfang von 45 Grauwerten der atmosphärenkorrigierten Landsat TM-Szene entspricht. Als Konsequenz sind bei der Ableitung eines Vegetationsindex, wie dem NDVI, die ohnehin geringen Unterschiede wesentlich auf das Rauschen im roten Wellenlängenbereich zurückzuführen. Deshalb können während dieser Phase einkanalige Korrelationen von NIR bzw. MIR zu den gemessenen Bestandesparametern sinnvoll sein, um die räumliche Variabilität des Bestandes abzubilden. Beispielsweise ergeben sich für den Schlag Kiesberg für die Landsat TM-Aufnahme vom 13.05.01 lineare Korrelationen von NIR (= TM-Kanal 4) zur Biomasse von $R^2 = 0,67$, bzw. NIR zur Bestandeshöhe von $R^2 = 0,64$. Der NDVI hingegen ist zu den Bestandesparametern vollständig dekorreliert ($R^2 < 0,1$). Gleiches gilt z. B. für den NDVI des Hydro N-Sensors (siehe Abb. 3.3-3, s. Anhang).

In der Abreifephase kommen die Vegetationsindizes aus der Sättigung, da die Reflexion im roten Wellenlängenbereich wieder zunimmt und gleichzeitig die Grenzflächenreflexion im NIR abnimmt. Zum Zeitpunkt 29.06.01 (EC 77) ergibt die Beziehung TM NDVI zur Höhe $R^2 = 0,66$ sowie Landsat TM NDVI zum LAI $R^2 = 0,56$. Für den N-Sensor NDVI zur Bestandeshöhe ergibt sich $R^2 = 0,77$ sowie N-Sensor NDVI zum LAI $R^2 = 0,65$. Die relativ niedrigen Korrelationen der Landsat TM-Daten zu den Ground Truth-Daten ist nicht weiter verwunderlich, da selbst Lageungenauigkeiten < 1 Pixel zu großen Unterschieden in den Bestimmtheitsmaßen führen können. Deshalb ist eine Korrelation mit anderen flächenhaften Daten aussagekräftiger, wie der rein optische Vergleich mit dem N-Sensor NDVI zeigt (Abb. 3.3-3). Um die genannten Lageungenauigkeiten sowie die Streuung durch Mischsignaturen einzelner Pixel zu reduzieren, werden für die Korrelationen des Hydro-N-NDVI's mit dem Landsat TM NDVI auf ein 1 ha Raster interpoliert, um ein Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,8$ zu erzielen.

Während der Reifephase (EC 71 - EC 85) können Fernerkundungsaufnahmen bzw. daraus abgeleitete Vegetationsindizes mit großer Zuverlässigkeit auch zur Ertragsschätzung verwendet werden, wie z. B. Irrgang et al. (2001), Johnen (2001), Klimek (2001) und Selige & Schmidhalter (2001) für verschiedene Sensoren und Regionen gezeigt haben. Zur Ermittlung des Bestimmtheitsmaßes des NDVI zum Ertrag ist die vom TP II-5 (Aufbereitung Ertragskartierungen) aufbereitete und auf ein 25 m Raster interpolierte Ertragskartierung des Mähdeschers (Abb. 3.3-3) analog zur oben beschriebenen Vorgehensweise auf ein 1 ha Raster vergrößert worden. Dabei ergab sich eine lineare Beziehung mit $R^2 = 0,67$ ($n = 32$) für Landsat TM sowie ein $R^2 = 0,75$ für den NDVI des Hydro-N-Sensors. Bei der Güte der Bestimmtheitsmaße sind die vielfältigen Probleme bei den Ertragsmesssystemen zu berücksichtigen, vgl. z. B. Ebert & Grenzdörffer (2001). Zudem spiegelt der NDVI in erster Linie die Biomasse wider. Diese ist jedoch nicht zwangsläufig mit dem Kornertag gleichzusetzen, wie das aus den Handernten berechnete Verhältnis zwischen Biomasse und Kornertag (53 – 62 %) zeigt.

3.3.4.1.2 Luftbild 22.05.01

Da die ausgemähten 2 * 2 m großen Messpunkte zur Biomasse auf den Luftbildern vom 22.05.01 deutlich identifiziert werden konnten, wurde für die Korrelation der Luftbildinfor-

mationen zu den Bestandesparametern in der direkten Umgebung der Messpunkte ein Polygon mit ähnlichen spektralen Charakteristika über eine Region Growing-Ansatz definiert, um die Mikrovarianz benachbarter Pixel zu reduzieren.

Während die einzelnen Kanäle des Luftbildes nicht mit den gemessenen Bestandesparametern übereinstimmen, wies der nachfolgend noch genauer vorgestellte Index VARI des Luftbildes vom 22.05.01 eine signifikante lineare Korrelation zu den am 17.05.01 gemessenen Bestandesparametern Biomasse ($R^2 = 0,64$) und LAI ($R^2 = 0,72$) sowie eine mäßige lineare Korrelation zur Bestandeshöhe ($R^2 = 0,54$) auf (vgl. Abb. 3.3-3, s. Anhang).

3.3.4.1.3 Schlussfolgerungen Satellitendaten und Sensorvergleich

- Eine sinnvolle Korrelation zwischen einem „klassischen“ Vegetationsindex (NDVI, TSAVI ...), optischen Sensoren und dem LAI sowie anderen Bestandesparametern (Biomasse, Bestandeshöhe) ist nach EC 37 bis zum EC 72 nicht möglich, da die Indizes in dieser Periode ihr Maximum erreicht haben. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um einen breitbandigen oder schmalbandigen Sensor handelt.
- Eine Alternative können einkanalige Korrelationen im NIR bzw. MIR darstellen. Dies gilt für den Hydro-N-Sensor nur unter der Voraussetzung, dass die Aufnahme bei wolkenlosem Himmel erfolgt, da sich ansonsten bei variablen Einstrahlungsbedingungen die Reflexion der Pflanzen verändert.
- Während der Seneszenzphase liefern alle untersuchten Sensoren akzeptable Korrelationen zu den Bestandesparametern und dem Ertrag, d. h. die Wahl des Sensors (N-Sensor, Pendel, NIR-Video, Luftbild, Satellit ...) ist mehr oder weniger egal (vgl. Abb. 3.3-3, s. Anhang). Selbstverständlich ist das Bestimmtheitsmaß von der Bodenaufösung abhängig. Aufgrund der Sensorcharakteristika sowie der geometrischen Vorverarbeitung des Landsat TM werden ab einer Rastergröße von 1 ha akzeptable Bestimmtheitsmaße ($> 0,7$) zur Ertragskartierung, dem Hydro-N-Sensor bzw. dem Pendel ermittelt.
- Die räumliche Heterogenität der Bestandesparameter Höhe und Biomasse lässt sich durch alle in dem Vergleich eingesetzten Sensoren sehr gut erfassen. Obgleich der LAI als Eingangsparameter in verschiedenen Wachstumsmodellen verwendet wird, so ist seine Messung im Feld aufwendig und insbesondere bei Beständen mit unregelmäßiger Standraumausnutzung fehlerbehaftet. Die Korrelationen des LAI zu den Indizes fernerkundlicher Sensoren sind generell schlechter als zur Biomasse und zur Bestandeshöhe.

3.3.5 Luftbilder Schlag KSG111-4, Mecklenburg-Vorpommern

Der Schlag 111-4 in Kassow ist 2001 ebenfalls ein Teil des Intensivmessprogrammes, welches eine gute Datengrundlage an Ground Truth-Informationen durch das TP III-5 (Herbizide, Fungizide und Wachstumsregler) gewährleistet. Im Gegensatz zum Schlag Kiesberg ist die Mikrovarianz auf dem Schlag 111-4 höher. Die am 22.05.01 durch das TP III-5 (Herbizide, Fungizide und Wachstumsregler) gemessene Frischmasse korreliert eng mit der Bestandeshöhe ($R^2 = 0,80$), aber nur gering mit dem LAI ($R^2 = 0,34$), was im Wesentlichen auf die eingesetzte Drilltechnik zurückzuführen ist, die im Breitsaatverfahren unregelmäßige Reihen erzeugt. Dieses führt bei der optischen LAI-Messung zu Problemen.

Das Ziel bei der Verwendung von Indizes ist es, die spektrale Information der verwendeten Kanäle in einem Wert zu vereinigen und die Mit- und Gegenlichteffekte und andere atmosphärische Störfaktoren zu reduzieren. Die gängigen Vegetationsindizes beruhen auf dem starken Unterschied zwischen der roten und der NIR-Reflexion vitaler Pflanzen, da durch die

beiden Kanäle ca. 90 % der multispektralen Informationen erklärt werden können. Von Stark et al. (2000) ist ein **V**isible **A**tmospherically **R**esistant **I**ndex (VARI) entwickelt worden, der nur Spektralbereiche des sichtbaren Lichts verwendet und linear mit dem Vegetationsanteil des Bestandes (= Bestandesdichte) korreliert. Der Index wird auch als **V**egetation **F**raction **I**ndex (VFI) benannt.

$$VARI = \frac{Grün - Rot}{Grün + Rot - Blau}$$

Die Anwendung des Indexes zur Auswertung von Feldspektrometermessungen bezog sich in den Untersuchungen von Stark et al. (2000) auf Winterweizen und Mais in den USA. Eine Übertragung auf den Luftbildfall wurde nicht vorgenommen. Bei Luftbildern ist der VARI gegenüber etwaigen Farbstichen sehr sensitiv. So führt ein Blaustich z. B. zu überhöhten Werten. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der Vorverarbeitung der Bilder zu sehen, die eine Farbanpassung umfasst, bei der die drei Farbkanäle untereinander angepasst werden, um z. B. den Einfluss der Rayleigh-Streuung, der sich im blauen Kanal besonders bemerkbar macht, zu reduzieren. So ist z. B. bei der Aufnahme vom 22.05.01 die Dunstkorrektur, bei insgesamt sehr niedrigen Grauwerten, nicht optimal durchgeführt worden, was zu einem leichten Blaustich führte. Dieser konnte nachträglich durch parallel durchgeführte Feldspektrometermessungen korrigiert werden.

Ein großes Problem bei der Auswertung hochaufgelöster Luftbilder stellen die Fahrgassen dar, die insbesondere im Frühjahr Überstrahlungen und Farbartefakte verursachen können, die dazu führen, dass die Fahrgasse mehrere Pixel einnimmt. Der Fahrgasseneffekt nimmt im Laufe der Vegetationsperiode ab, da die in der Mitte und am Rand wachsenden Pflanzen zunehmend die Fahrgasse verdecken. Um den Fahrgasseneffekt und Extremwerte zu minimieren, sind bisher zwei verschiedene Verfahrenswege beschritten worden. Im Frühjahr ist es ggf. notwendig, einen Filter zu generieren, der die Fahrgassen in der Originalauflösung möglichst eliminiert. Für den Filter kann man sich die Tatsache zu Nutze machen, dass bei unbedecktem bzw. gering bedecktem Boden der rote Kanal höhere Grauwerte als der grüne Kanal aufweist. Anschließend sind die Daten auf ein 5 m Raster vergrößert worden, um Extrema zu eliminieren. Bei geringerem Fahrgasseneinfluss im Frühsommer sind die Aufnahmen direkt auf ein 5 m Raster vergrößert worden. Um zu vermeiden, dass die ausgemähten Bereiche, Lageungenauigkeiten bei der Georeferenzierung bzw. ein Punkt extremer lokaler Variabilität zur Korrelation verwendet wird, ist ein Buffer mit einem Durchmesser von 10 m sinnvoll.

Der Mittelwert des VARI vom 24.04.01 (EC 31) beträgt 0,21 mit einer Standardabweichung von 0,12. Die Farbartefakte in den Fahrgassen beeinträchtigen das Ergebnis, dennoch sind insbesondere die dichten Bestände sowie Schadstellen deutlich zu erkennen.

Der VARI vom 22.05.01 (EC 37) weist einen Mittelwert von 0,3 mit einer Standardabweichung von 0,22 auf. Die starke Streuung ist auf die hellen Fahrgassen und Schadstellen zurückzuführen. Außerdem sind die zur Biomassebestimmung ausgemähten Flächen von 2 * 2 m deutlich zu erkennen. Nach der Eliminierung von 4 offensichtlichen Ausreißern, bei denen der Fahrgasseneffekt zu einer deutlichen Unterschätzung führte, konnte mit einem $R^2 = 0,80$ ($n = 28$) eine signifikante Beziehung zur Bestandeshöhe bzw. zur Biomasse ($R^2 = 0,77$) hergestellt werden.

Der VARI der Aufnahme vom 04.07.01 weist einen Mittelwert von 0,22 mit einer Standardabweichung von 0,054 auf. Das lineare Bestimmtheitsmaß R^2 des VARI zur Höhe beträgt

0,85 ($n = 16$). Aufgrund der Beziehungen zwischen Biomasse und Bestandeshöhe ist das Bestimmtheitsmaß zur Biomasse mit einem $R^2 = 0,80$ nur unwesentlich geringer.

Der VARI des Luftbildes mit einer Rasterweite von 5 m liefert ein Bild mit vielen Details und einem gewissen Rauschanteil, der z. B. durch die genannten Fahrgasseneffekte und Mikroheterogenitäten des Bestandes hervorgerufen wird. Demgegenüber bieten die in einem Fahrgassenabstand von 18 m aufgezeichneten und ebenfalls auf 5 m geostatistisch interpolierten Hydro-N-Sensor-Werte ein kontinuierliches und geglättetes Bild. Vor einem statistischen Vergleich der beiden Bilder ist deshalb eine Glättung der Luftbildinformationen unabdingbar. Bei einer einheitlichen Rasterweite von z. B. 25 m wird eine große Ähnlichkeit der beiden Datensätze optisch und statistisch ($R^2 = 0,80$, $n = 323$) sofort sichtbar (s. Abb. 3.3-4a-d, Anhang).

Die auf den Luftbilddaufnahmen vom 24.04.01 bzw. 22.05.01 sichtbaren räumlichen Muster der Bestandes-/Biomasse-Differenzierung in der Bestockungs- und Schossphase sind zum großen Teil persistent und treten in der Abreifephase wieder deutlich hervor. Dabei zeichnen sich insbesondere die Schwachstellen und die biomassereichen Standorte durch die größte Persistenz aus. Johnen (2001) hat dies detailliert für den Schlag 106 ebenfalls nachweisen und die Unterschiede anhand der N-Düngung, der ECa- und TWI-Messungen sowie der Hof-Bodenkarte individuell auf verschiedene Ursachen zurückführen können.

Der VARI hat auf den hier vorgestellten Schlägen und darüber hinaus gezeigt, dass er die Biomassenverteilung auf dem Schlag sehr gut repräsentiert und somit als räumliche Grundlage für teilflächenspezifische Applikationen eingesetzt werden kann, bei denen die Biomasseverteilung eine ausschlaggebende Größe ist, z. B. für Wachstumsregulatoren, Fungizide sowie die 2. und 3. N-Gabe. Für quantitative Auswertungen und Zeitreihenanalysen bedarf die relative Kalibrierung, d. h. die Vorverarbeitung und Atmosphärenkorrektur der Aufnahmen noch weiterer Untersuchungen.

3.3.5.1 Seneszenzanalyse Schlag KSG111-4 Hydro-N-Sensor im Spektralmodus

Der Schlag KSG 111-4 wurde während der Abreifephase 03.07.01 – 03.08.01 (EC 75 – 92) insgesamt sieben Mal mit dem Hydro-N-Sensor im Spektralmodus entlang der Fahrgassen befahren. Die im Sekundenintervall aufgezeichneten Werte sind mit geostatistischen Verfahren auf ein 5 m Raster interpoliert worden. Damit konnte die Anisotropie in Fahrgassenrichtung berücksichtigt werden. Am 04.07.01 ist an 10 Punkten die Biomasse und die Bestandeshöhe bestimmt worden. Vor der Ernte wurden am 03.08.01 an 16 ausgewählten Punkten Handernten durchgeführt. Anhand der Handernten sind zur Übersichtlichkeit aus den NDVI-Werten fünf charakteristische Kurven des Abreifeverhaltens ermittelt worden (siehe Abb. 3.3-5 und Tab. 3.3-1).

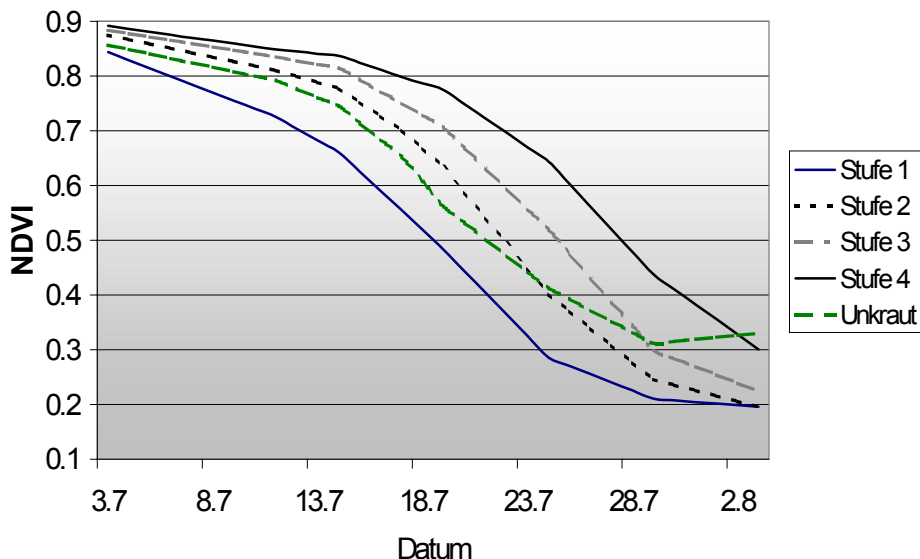


Abb. 3.3-5: Charakteristische Seneszenzverläufe, NDVI Hydro-N-Sensor, Schlag KSG 111-4, 2001 (WW)

Fig. 3.3-5: Characteristic senescence curves, NDVI Hydro-N sensor, field KSG 111-4, 2001 (WW)

Tab. 3.3-1: Pflanzenbauliche Charakterisierung der Seneszenzstufen anhand der Handerte, 03.08.2001

Tab. 3.3-1: Crop characteristics of the senescence levels determined by hand yields, 3.8.2001

	Abreife	Höhe [cm]	Biomasse [kg]	Ertrag [dt/ha]	Kornanteil [%]	Protein [%]
Stufe 1	Früh	57 – 65	1,4 – 1,6	61 – 68	40 – 45	12 – 13
Stufe 2	Normal	76 – 81	2,2 – 3,2	89 – 112	28 – 39	14 – 15
Stufe 3	Spät	78 – 84	2,5 – 3,6	76 – 98	26 – 30	16
Stufe 4	Sehr spät	84 – 87	3,6 – 4,3	76 – 101	20 – 24	16 – 17
Unkraut	Früh	67	1,5	57	38	13

Anhand der Abb. 3.3-5 wird deutlich, dass der Entwicklungsunterschied zwischen den früh und den spät abreifenden Beständen etwa 8 – 10 Tage beträgt.

Zur Übertragung der anhand der Handerten gebildeten Stufen in die Fläche wurde eine überwachte multitemporale Klassifikation der NDVI-Datensätze (s. Abb. 3.3-6, s. Anhang) durchgeführt. Da zwischen Stufe 1 und 2 eine Lücke besteht, die nicht durch Handernte-punkte abgedeckt wurde, ist zusätzlich eine Stufe 1.5 eingeführt worden. Darüber hinaus musste noch der Tatsache Rechnung getragen werden, dass die Verunkrautung nicht überall so signifikant ist wie bei der dargestellten Kurve. Deshalb ist eine weitere Klasse mit geringer Verunkrautung eingeführt worden.

Die Ertragswirksamkeit der räumlichen im Luftbild bzw. der mit dem NDVI des Hydro-N-Sensors sichtbaren Muster der Biomasse hängt maßgeblich von der Ertragsstruktur ab. Hier hat sich 2001 für die untersuchten Winterweizenschläge in Kassow (106, 111-2, 111-4) gezeigt, dass aufgrund der sehr variablen Verhältnisse zwischen Kornenertrag und Biomasse (20 – 45 % !!) die Kornenerträge nur eingeschränkt mit den durch die FE-Sensoren gemessenen

Mustern übereinstimmen ($R^2 < 0,56$). Die Ursache liegt vor allem an der teilweise feuchten Witterung, die dazu führte, dass der Winterweizen auf den Standorten mit einem hohen Wasserangebot die Anzahl der Triebe nicht ausreichend reduziert hat und somit viele kleine Ähren (max. 870/m²) mit einer hohen Biomasse, jedoch einem insgesamt geringen Einzelährengewicht gebildet wurden. Dies wird z. B. durch die Tatsache gestützt, dass die bei der Handernte auf Schlag 111-4 gemessene Kornfeuchte bei einem $R^2 = 0,92$ mit dem Kornanteil korreliert ist.

Im Gegensatz dazu weist der Winterroggen auf dem Schlag 109 einen nahezu konstanten Kornanteil von 22 - 24 % auf. Dies bedeutet in der Konsequenz, dass die Biomasse mit einem $R^2 = 0,95$ und der Kornertrag mit einem $R^2 = 0,91$ durch den NDVI des Hydro-N-Sensors erfasst werden konnte.

Die verlängerte Phase der Milch- und Gelbreife auf den feuchten Standorten wurde zur Assimilateinlagerung des Stickstoffs in das Korn verwendet, was die hohen Protein-Gehalte (> 16 %) des E-Weizens auf den feuchten Standorten eindrücklich beweisen, die mit $R^2 = 0,79$ mit der Kornfeuchte korrelieren.

Ausgehend von den zum Beginn und zum Ende der Seneszenz erhobenen Biomassesschnitten ist das „Window of Opportunity“, d. h. der günstige Zeitraum zur Erfassung der räumlichen Heterogenität durch einen FE-Sensor ermittelt worden. Generell ist zu sagen, dass die Bestimmtheitsmaße mit zunehmender Abreife abnehmen ($R^2 = 0,96 - 0,5$), da sich mit der Abreife die Wassergehalte und Kornanteile der Pflanzen zunehmend unterscheiden. Außerdem können z. B. Spätverunkrautungen und Lagergetreide die NDVI-Werte negativ beeinflussen. Der günstige Zeitraum mit einem $R^2 > 0,8$ erstreckt sich über ca. 3 Wochen vom 03.07. – 23.07., also bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Unterschiede des NDVI innerhalb des Schlags abnehmen (vgl. Abb. 3.3-5).

3.3.6 Ausblick 2002 und zukünftige Arbeiten

Auf der Grundlage der bisherigen Forschungen stehen im letzten Projektjahr verschiedene Untersuchungsschwerpunkte an:

- Entsprechend dem Projektantrag sollen 2002 höchstauflösende Satelliten- bzw. Flugzeugscannerdaten für ihre Eignungsfähigkeit für precision agriculture untersucht werden.
- Durch die "All Wetter Verfügbarkeit" des N-Sensors sind gezielte Überfahrten zu phänologisch relevanten Terminen im Spektralmodus geplant, um die zeitliche Sensitivität verschiedener Phänomene gezielt zu analysieren.
- Nachdem 2001 auf der Grundlage der Luftbilder Applikationskarten für teilflächenspezifische Pflanzenschutzmaßnahmen generiert wurden, die Spritztechnik zur differenzierten Applikation jedoch versagte, soll 2002 ein neuer Anlauf unternommen werden. Dabei sollen die Vorteile und der ökologische und ökonomische Nutzen luftbilddifferenzierter Applikationen demonstriert werden.
- Die Anwendung des VARI zur Biomassekartierung bedarf zusätzlicher Untersuchungen, wobei weitere Kulturen und das Preprozessing/Kalibrierung der Luftbilder sowie die Entwicklung von automatischen Filteralgorithmen zur Unterdrückung des Fahrgaseneffekts im Vordergrund stehen.
- In Zusammenarbeit mit den TP IV-4a (Regionaler Stoffaustrag) und dem TP III-4 (Düngung) sollen darüber hinaus weitere Fragestellungen zur Eignungsfähigkeit von Luftbildern bzw. Hydro-N-Sensor-Scanneraufnahmen für die N-Düngung untersucht werden.

- In Zusammenarbeit mit den TP II-6a (Ermittlung Ertragspotentiale) und dem TP II-6b (Ertragspotentialkarten) soll untersucht werden, wie die aus FE-Daten abgeleiteten Produkte als zusätzliche Parameter in das Pflanzen- und Ertragsmodell CERES Eingang finden können.

3.3.7 Literatur

- Ebert, C.; Grenzdörffer, G. (2001): Ertragskartierung – Fehler rechtzeitig erkennen. *Agrarmarkt* 7: 36 – 39
- Grenzdörffer, G. (2001): Konzeption, Entwicklung und Erprobung eines digitalen integrierten flugzeuggetragenen Fernerkundungssystems für Precision Farming (PFIFF).- Dissertation an der Ingenieurwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock.- 140 S. (Im Druck)
- Irrgang, A.; Johnen, T.; Gebbers, R. (2001): Evaluation of Yield Maps by Low-Cost Remote Sensing. In: Grenier G.; Blackmore, S. (eds.): *Third European Conference on Precision Agriculture.- Montpellier, France, Vol. 1: 217-222*
- Johnen, T. (2001): Fernerkundungs- und GIS-gestützte Untersuchungen zur teilflächenspezifischen Ertragsabschätzung von Winterweizen in Mecklenburg 83 S.- Unveröff. Dipl. Arb., Universität Rostock
- Klimek, S. (2001): GIS-gestützte multitemporale Auswertung von Landsat-TM-Szenen für Anwendungen im Precision Farming.- 87 S., unveröff. Dipl. Arb., Universität Rostock
- Selige, T.; Schmidhalter, U. (2001): Site Specific Soil Resource mapping using Remote Sensing.- In: Grenier G.; Blackmore, S. (eds.): *Third European Conference on Precision Agriculture.- Montpellier, France, Vol. 1: 307-311*
- Stark, R.; Gitelson, A.; Grits, U.; Rundquist, D.; Kaufman, Y. (2000): New technique for remote estimation of vegetation fraction: principles, algorithms and validation.- *Aspects of Applied Biology*, 60: 241 – 246

