

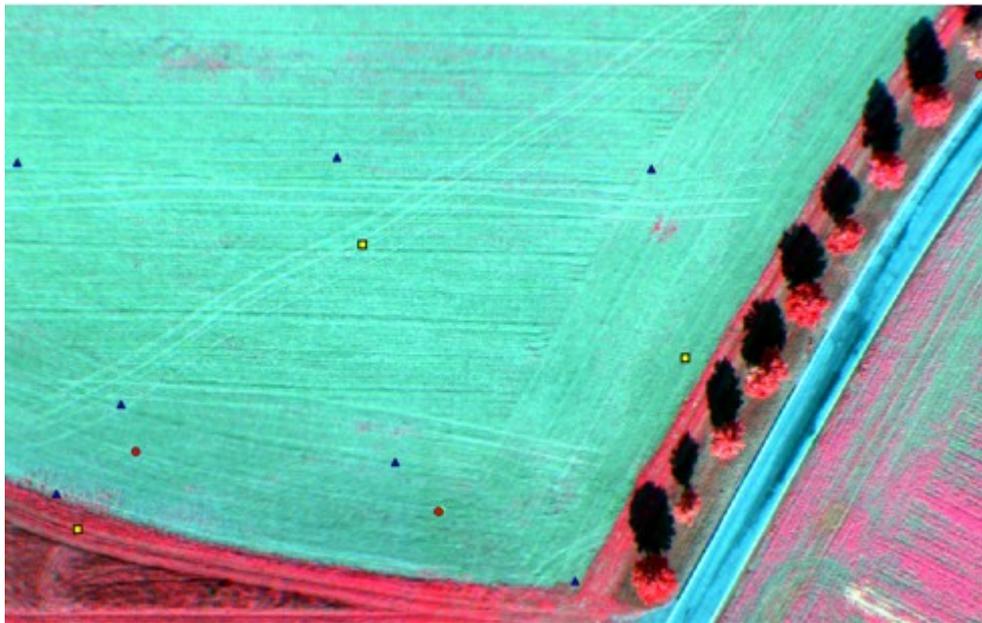


Einsatz eines ferngesteuerten Kleinflugzeuges zur Erfassung von Umweltdaten

IRS-07-AG17

Boysen-Kennzeichen: Boy07-Nr.50

Abschlussbericht



Dezember 2010

Dipl.-Ing. Ursula Kirchgäßner

Inhaltsverzeichnis

<u>1 Einleitung.....</u>	<u>3</u>
<u>2 Erfassung von Umweltdaten mit dem Stuttgarter Adler.....</u>	<u>3</u>
<u>3 Nutzlast.....</u>	<u>4</u>
<u>3.1 Aktuelle Instrumentierung.....</u>	<u>4</u>
<u>3.2 Kalibrierung und Genauigkeit.....</u>	<u>5</u>
<u>4 Flugplanung.....</u>	<u>6</u>
<u>5 Datenverarbeitung und Auswertung.....</u>	<u>7</u>
<u>5.1 Verknüpfung und Georeferenzierung der Daten.....</u>	<u>7</u>
<u>5.2 Strahlungstransport und Reflektanzen.....</u>	<u>9</u>
<u>6 Messungen 2009/2010.....</u>	<u>11</u>
<u>6.1 Untersuchung von Bodeneigenschaften.....</u>	<u>11</u>
<u>6.2 Agroforst – Kombiniertes Anbau verschiedener Nutzpflanzen.....</u>	<u>13</u>
<u>7 Zusammenfassung und Ausblick.....</u>	<u>14</u>

1 Einleitung

Das Projekt *Stuttgarter Adler* soll zeigen, wie mit einfachen, kostengünstigen Mitteln wissenschaftliche Fernerkundungsdaten über physikalische und chemische Prozesse in der Umwelt erfasst werden können. Solche Daten sind notwendig, um ökologisch relevante Vorgänge zu untersuchen und bieten z.B. in der Landwirtschaft die Möglichkeit, ökonomisch und ökologisch vorteilhafte Methoden zu entwickeln und anzuwenden. Finanziert von der Friedrich-und-Elisabeth-Boysen Stiftung konnten im Förderungszeitraum von insgesamt drei Jahren die zur Fernerkundung mit dem Kleinflugzeug *Stuttgarter Adler* notwendigen Schritte hierzu erarbeitet und demonstriert werden.

Das ferngesteuerte Kleinflugzeug *Stuttgarter Adler* wurde als Plattform zur Fernerkundung am Institut für Raumfahrtssysteme (IRS) der Universität Stuttgart entwickelt [1]. Mit zwei elektrischen Antrieben und einem maximalen Startgewicht von 25 kg erreicht es eine Flugzeit von bis zu 30 Minuten. Es wurde für Messflüge mit einer Fluggeschwindigkeit von 10 bis 20 m/s in einer Höhe von 100 bis 300 m ausgelegt. Der Erstflug fand im Oktober 2008 statt, seitdem wurde das Flugzeug als Plattform für Fernerkundung ausgebaut und mit verschiedenen Instrumenten ausgestattet. Inzwischen stehen am IRS zwei Exemplare des Flugzeuges zur Verfügung, so dass zwei verschiedene Nutzlasten ohne größere Umbauten geflogen werden können.

Der Schwerpunkt der Forschungsarbeit lag in der Entwicklung einer vollständigen Prozesskette zur Erfassung von Umweltdaten, angefangen bei der Kalibrierung der Instrumente, der Flugplanung und -durchführung über die Georeferenzierung und radiometrische Korrektur bis zur inhaltlichen Auswertung der Messdaten.

Die Instrumente wurden im Rahmen dieser Arbeit im Labor radiometrisch kalibriert, so dass aus den Messwerten physikalische Daten ermittelt werden können. Der Wert solcher Daten misst sich an ihrer Genauigkeit und Zuverlässigkeit, daher wurden verschiedene Schritte unternommen, die erreichte Genauigkeit zu bestimmen.

Die Prozesskette zur Erfassung und Auswertung der luftgestützten Daten ist nun einsatzfähig. Das erweiterte Flugsteuerungssystem bietet eine schnelle und flexible Planung von Messflügen. Eine neu entwickelte grafische Benutzeroberfläche ermöglicht die schnelle und einfache Prozessierung der Daten, so dass diese innerhalb kurzer Zeit georeferenziert für die inhaltliche Auswertung zur Verfügung stehen. Anhand einiger Messflüge konnten Anwendungen in der Landwirtschaft demonstriert werden.

2 Erfassung von Umweltdaten mit dem *Stuttgarter Adler*

Um die Daten hinsichtlich der Ermittlung umweltrelevanter Eigenschaften der Erdoberfläche mit gängigen Methoden der Fernerkundung auswerten zu können, bedarf es einer sorgfältigen Vorbereitung der Messflüge und einer umfangreichen Bearbeitung der Daten nach dem Flug. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Prozesskette zur Erfassung und Auswertung der Daten entwickelt. Eine Übersicht der Arbeitsschritte ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Arbeiten zur Entwicklung der einzelnen Schritte werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

Zunächst werden die für einen Bildflug mit dem *Stuttgarter Adler* notwendigen Voraussetzungen und Vorbereitungen beschrieben. Eine Aufstellung der aktuell vorhandenen Instrumentierung mit der zugehörigen Kalibrierung sowie dem Einbau und der Ansteuerung der Nutzlast erfolgt in Kapitel 3.

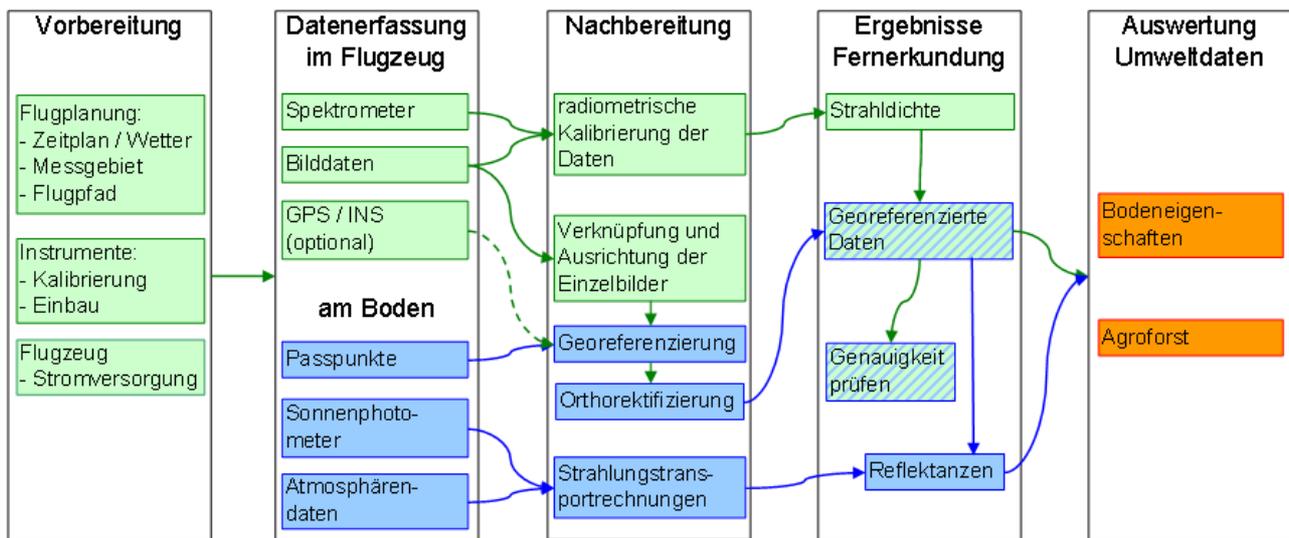


Abbildung 1: Prozesskette der Gewinnung von Fernerkundungsdaten mit dem Stuttgarter Adler und deren Auswertung

Zur Unterstützung der Flugführung bei der Durchführung von Bildflügen wurde der *Stuttgarter Adler* mit dem bereits im Zwischenbericht 2009 [2] vorgestellte Flugsteuerungssystem *Paparazzi* [3] ausgestattet, das in der Lage ist, das Flugzeug anhand eines vordefinierten Flugplans zu steuern. Das System wurde für die Fernerkundung mit dem *Stuttgarter Adler* angepasst und insbesondere für die Flugplanung erweitert. Die Flugplanung mit Zielsetzung, Umweltbedingungen, Programmierung der Flugroute usw. werden in Kapitel 4 dargestellt.

Kapitel 5 beschreibt die notwendigen Auswertungsschritte, um die im Flug aufgenommenen Daten nutzbar zu machen. Die Daten müssen zunächst radiometrisch kalibriert werden, um die Messwerte in physikalische Größen zu übertragen. Darauf folgt eine weitergehende Auswertung dieser Werte. Hier wird auch auf die parallel zur Befliegung am Boden durchgeführten Messungen eingegangen, insoweit sie zur Auswertung der luftgestützten Daten notwendig sind. Parallel zur radiometrischen Auswertung erfolgt die geometrische Verarbeitung der Bilddaten. Diese beiden Schritte sind voneinander unabhängig, da sie unterschiedliche Anforderungen an die Datenqualität stellen. Erst nach der Georeferenzierung werden deren Ergebnisse auf die radiometrisch kalibrierten Daten bzw. die Reflektanzdaten angewendet.

Schließlich können die Daten inhaltlich ausgewertet werden, was in Kapitel 6 anhand zweier Beispiele für Umweltdaten dargestellt ist. Die Messungen wurden am Ihinger Hof an Versuchsfeldern der Universität Hohenheim durchgeführt.

3 Nutzlast

3.1 Aktuelle Instrumentierung

Die Missionsnutzlast besteht wahlweise aus drei Kameras im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich (VIS/NIR) sowie einem Spektrometer in demselben Spektralbereich, oder aus einer thermischen Infrarotkamera in Kombination mit einer der Kameras im sichtbaren Spektralbereich. Alle im *Stuttgarter Adler* eingesetzten Instrumente sind passive Sensoren, welche die von den beobachteten Oberflächen emittierte oder reflektierte Strahlung registrieren. Die technischen Daten der Instrumente, die zum Teil auf Herstellerangaben basieren und zum Teil im Laufe dieser Arbeit ermittelt wurden, sind in Tabelle 1 zu-

sammengefasst. Die VIS/NIR-Kameras besitzen einen sehr schmalen Öffnungswinkel, um eine hohe Bodenauflösung zu ermöglichen. Bei einer Flughöhe von 300 m wird eine Pixelgröße am Boden von ca. 10 cm erreicht.

	VIS/NIR Kameras	VIS/NIR Spektrometer	TIR Kamera
Hersteller	Vision Components GmbH	Avantes	DIAS Infrared GmbH
Modell	VC4068	AvaSpec 128	Pyroview 320L Compact
Sensor	1280 x 1024 Pixel CCD	128 Pixel Photodioden Array	320 x 240 Pixel ungekühltes Bolometer
Dynamikbereich	8 bit	16 bit	12 bit
Kanäle	grün, rot, NIR	VIS/NIR	TIR
Spektralbereich	520, 630, 880 nm	400–1000 nm	8–14 μm
FWHM	81, 79, 135 nm	6,3 nm	5,5 μm
Brennweite	17,8 mm	20 mm	25 mm
Blickwinkel	20° x 16°	0,6° x 0,3°	30° x 23°
Schwadbreite	80 m	50 cm	80 m
Bodenauflösung	10 cm	50 cm	21 cm
Gewicht	460 g pro Kamera	150 g	1600 g Kamera, + 750 g PC

Tabelle 1: Nutzlastinstrumente Stuttgarter Adler

3.2 Kalibrierung und Genauigkeit

Für die Fernerkundung sind verschiedene Eigenschaften der Instrumente relevant. Zum einen werden die spektralen sowie radiometrischen Eigenschaften benötigt, also der Wellenlängenbereich, in dem jedes Gerät misst sowie die Empfindlichkeit in diesem Bereich. Zum anderen müssen die geometrischen Abbildungseigenschaften jedes Instruments bekannt sein, um die Aufnahmegeometrie und damit den genauen geografischen Ort jeder Messung ermitteln zu können. Diese Eigenschaften werden im Labor vermessen, um Kalibrierfaktoren abzuleiten, welche nach dem Flug auf die Daten angewendet werden.

Die spektralen Eigenschaften des Spektrometers wurden mit Hilfe von Linienstrahlern, welche nur bei ganz bestimmten Wellenlängen Licht ausstrahlen, untersucht. Das Gitter des Spektrometers projiziert das Licht nach Wellenlängen aufgeteilt auf eine Photodiodenzeile mit 128 Pixeln. Der abgebildete Wellenlängenbereich erstreckt sich von ca. 500 nm bis 1007 nm und erreicht damit eine Auflösung von durchschnittlich ca. 4 nm. Die Mittelwellenlängen der Pixel wurden zunächst vom Hersteller kalibriert. Die Halbwertsbreite (Full Width at Half Maximum, FWHM) beträgt nach Herstellerangaben 6,4 nm. Mit Hilfe von Linienstrahlern werden diejenigen Punkte auf der Photodiodenzeile bestimmt, an denen die entsprechende Wellenlänge auftrifft. Die Empfindlichkeitsbereiche benachbarter Pixel überlappen sich um ca. 37%, daher sprechen mehrere Pixel auf denselben Linienstrahler an. Über die Messwerte der ansprechenden Pixel wird ein kubischer Spline gelegt. An der Stelle des Maximums dieses Splines muss die Wellenlänge des entsprechenden Linienstrahlers liegen, wobei dies nicht unbedingt der Mitte eines Pixels entsprechen muss.

Die spektrale Transmission der Front-End-Filter der drei VIS/NIR-Kameras wurde mit dem Spektrometer überprüft. Das Spektrometer wurde dafür vor der Ulbricht-Kugel im Optik-Labor des IRS positioniert und die Einstrahlung mit und ohne Filter gemessen. Die Werte

erwiesen sich als stabil und auch gegenüber Verdrehung und Kippen der Filter invariant.

Die radiometrische Kalibrierung stellt die Beziehung zwischen den Messwerten eines bestimmten Instruments und den physikalischen Strahlungsgrößen bei der Aufnahme her. Um die Messwerte der Kameras (abbildend, breiter Wellenlängenbereich) mit denen des Spektrometers (Punktmessung, spektral aufgelöst) vergleichbar zu machen, werden alle Instrumente auf spektrale Strahldichten pro Nanometer Einheit (einfallende, wellenlängenabhängige Energie pro Fläche und Raumwinkel) kalibriert. Diese werden im Fall der abbildenden Instrumente als gewichtetes Mittel über die Pixel, welche das Spektrometer abbildet, berechnet. Die Spektrometerdaten werden über den Wellenlängenbereich gemittelt, welcher dem gewünschten Kamerafilter entspricht. So können für alle VIS/NIR-Instrumente die Messwerte in Energie pro Fläche, Raumwinkel und Wellenlängenbereich angegeben werden und sind damit vergleichbar [4]. Dabei wird bei den VIS/NIR-Instrumenten eine absolute Genauigkeit von 7 % erreicht, der relative Fehler durch Rauschen beträgt hier 1 % bis 2 %. Diese Werte wurden im Optik-Labor des IRS ermittelt und in [5] veröffentlicht.

Die absolute Genauigkeit der Temperaturmessung mit der TIR-Kamera wurde anhand einer Labormessung überprüft. Dafür wurde Wasser mit Hilfe von Eis Temperaturen abgekühlt und mit der Thermalkamera aufgenommen. Gleichzeitig wurde die Wassertemperatur mit einem kalibrierten Quecksilberthermometer gemessen, wobei die Messgenauigkeit des Thermometers 1K beträgt und die Ablesegenauigkeit des Thermometers etwa 0.1K ausmachen. Die so ermittelte absolute Temperaturgenauigkeit der TIR-Kamer beträgt ca. 5 %. Die relative Genauigkeit der Temperaturmessung mit der Kamera im Flug wurde anhand des Bildrauschens über homogenen Flächen wie Asphalt bestimmt. In den Luftbildern aus 300 m Höhe können Temperaturdifferenzen am Boden von etwa 0,5 K unterschieden werden.

Die geometrische Kalibrierung der abbildenden Instrumente wurde im Zwischenbericht 2009 beschrieben, ebenso wie die. Die Bore-sight-Kalibrierung, also die Ausrichtung des Spektrometers bezüglich der Kameras, musste für das neue Flugzeug erneut durchgeführt werden. Die Messmethode wurde erheblich verbessert und daher auch für die alte Konfiguration wiederholt. Die Instrumente werden dazu horizontal drehbar auf einem Schrittmotor montiert und auf eine konstante Lichtquelle gerichtet, die vertikal verschiebbar ist. Durch diese beiden Freiheitsgrade kann der Messbereich des Spektrometers in und quer zur Flugrichtung unabhängig voneinander bestimmt werden.

4 Flugplanung

Die Vorbereitung von Messflügen muss sowohl die inhaltliche Zielsetzung als auch die geometrischen Gegebenheiten berücksichtigen. Bei der Aufnahme von Luftbildern im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich ist die Sonneneinstrahlung ausschlaggebend. In solchen Bildern wird ausschließlich das reflektierte Sonnenlicht abgebildet. Daher muss der Zeitpunkt eines Messfluges so gewählt werden, dass die Sonne möglichst hoch steht, also der Zenitwinkel klein ist, und dass die Atmosphäre transparent ist. Wolken sind hier sehr große Störeinflüsse, da sie die Strahlung nicht nur reflektieren, sondern auch streuen. Dadurch ist die einfallende Strahlung nicht mehr genau zu bestimmen, weshalb die Messflüge wurden bei möglichst günstigem Wetter durchgeführt werden

Der inhaltlichen Auswertung von Luftbildern muss immer eine photogrammetrische Prozessierung vorangehen, welche die geometrische Korrektur und die geografische Zuordnung beinhaltet. Für diese Schritte der Datenprozessierung ist die Flugplanung sehr wich-

tig, da hier die Aufnahmegeometrie vorgegeben wird und vor allem die vollständige Abdeckung der Fläche mit einer großzügigen Überlappung zwischen den Einzelbildern sichergestellt werden muss. Der anfängliche Versuch, das Flugzeug manuell zu steuern, wurde für Bildflüge vollständig aufgegeben. Das bereits im Zwischenbericht 2009 vorgestellte Flugsteuerungssystem wurde um spezielle Programmteile erweitert, welche eine automatische Planung und Durchführung der Befliegung von vorgegebenen Flächen ermöglichen. Dabei können die Messinstrumente wahlweise zeitgesteuert oder nach GPS-Koordinaten ausgelöst werden. Die Vorbereitung von Messflügen mit der Bodenstation und Simulationssoftware des Flugsteuerungssystems wird damit erheblich erleichtert und beschleunigt. Außerdem wird die zur vollständigen Abdeckung der gewünschten Fläche benötigte Flugzeit reduziert, da der Flugpfad exakt der Fläche und dem gewünschten Abstand zwischen den Flugstreifen angepasst wird.

5 Datenverarbeitung und Auswertung

Die Verarbeitung der Daten erfolgt zunächst in zwei voneinander unabhängigen Schritten. Zum einen wird die Aufnahmegeometrie aus den Bilddaten rekonstruiert, um die Messwerte mittels Kameraposition und -ausrichtung ihrer geografischen Herkunft zuordnen zu können. Zum anderen erfolgt die Anwendung der Kalibrierfaktoren auf die Messdaten. Nach diesen beiden Schritten werden die Ergebnisse der Georeferenzierung auf die kalibrierten Daten angewendet, so dass ein geografisch referenzierter, radiometrisch kalibrierter Datensatz entsteht. Eine erste Auswertung der Daten erfolgt mit Hilfe des Strahlungstransports, der es ermöglicht, die Reflektanz der beobachteten Fläche zu bestimmen.

5.1 Verknüpfung und Georeferenzierung der Daten

Für die räumliche Orientierung und Georeferenzierung von Luftbildern existiert eine Reihe von Programmpaketen zur Erstellung von Orthofotos mit Hilfe der Aerotriangulation und des räumlichen Rückwärtsschnitts. Die vorhandene Software stellt jedoch hohe Anforderungen an die Luftbilder, Aufnahmegeometrie und Lagemessung.

Zur Lagemessung werden im *Stuttgarter Adler* Thermalsensoren eingesetzt, welche die Nick- und Rollwinkel des Flugzeugs aus dem Unterschied der Strahlungstemperatur zwischen Himmel und Erdboden abzuschätzen erlauben. Diese Schätzwerte werden zur Navigation verwendet, waren aber ursprünglich nicht kalibriert und lieferten keine echten Winkelangaben. In mehreren Testflügen wurden deshalb parallel dazu die Lagewinkel mit Inertialmesseinheit erfasst und ein Korrekturfaktor für die Winkelberechnung aus den Thermalsensoren ermittelt. Unter dessen Verwendung konnte der Schätzwert der Lagewinkel erheblich verbessert werden. Sie können jetzt für spezielle Messungen zur Ausrichtung der Kameras auf ein vordefiniertes Zielgebiet eingesetzt werden [6], genügen aber weiterhin wegen ihrer Ungenauigkeit nicht zur Auswertung der Bilder [7].

Aufgrund der Flugeigenschaften sowie der geringen Flughöhe des Kleinflugzeugs unterscheidet sich außerdem die Fluggeometrie von Standardbefliegungen mit bemannten Flugzeugen. Die Einhaltung von geplanten Standardüberdeckungen während des Fluges ist in der Regel nur bedingt möglich, da die einzelnen Bilder zwar große Überlappungen aufweisen, aber nicht regelmäßig angeordnet sind.

Die beim *Stuttgarter Adler* eingesetzten Kameras unterscheiden sich in ihren geometrischen Eigenschaften stark von gewöhnlich zur photogrammetrischen Datenerfassung eingesetzten Instrumenten. Aufgrund der geringen Größe ist die Pixelzahl der Sensoren beschränkt. Um dennoch eine größere Bodenauflösung zu erreichen, besitzen die Kameras einen engeren Öffnungswinkel.

Eine geometrische Auswertung der Luftbilder mit klassischen Softwarepaketen zur automatischen Bündelblockausgleichung ist aus diesen Gründen zunächst nicht möglich. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit und in Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart eine Vorgehensweise entwickelt, welche völlig ohne Vorabinformationen zur Flugzeuglage während der Bildauslösung auskommt. Die geometrische Auswertung der Bilddaten durch eine automatische Bündelblockausgleichung erfolgt durch das Programmsystem *Bundler* mit der von Snavely [8, 9] entwickelte Methode, welche es ermöglicht, 3D-Informationen aus beliebigen Bildsammlungen zu rekonstruieren. Die in *Bundler* realisierte näherungswertfreie Bündelblockausgleichung beruht zunächst ausschließlich auf Verknüpfungspunkten zwischen den Bildern. Für die Merkmalsberechnung und Zuordnung der Verknüpfungspunkte wird der im Zwischenbericht 2009 beschriebene SIFT-Algorithmus [10] eingesetzt. Das Programm beginnt die Ausgleichung mit wenigen Bildern und erweitert die Szene nach und nach.

Durch die Beschränkung der Beobachtungen auf Verknüpfungspunkte beziehen sich die berechneten äußeren Orientierungen der Kamerastandpunkte zunächst auf ein Modellkoordinatensystem. In der zur Auswertung der *Adler*-Bilder realisierten Implementierung erfolgt der Übergang in das übergeordnete Referenzkoordinatensystem entweder basierend auf GPS-Messungen der Kamerastandpunkte oder durch Stereomessung von Passpunkten. Damit wird jeweils eine 7-Parametertransformation vom Modell- ins Referenzkoordinatensystem bestimmt.

Aus den 3D Koordinaten der Verknüpfungspunkte wird eine ausgleichende Ebene berechnet, die in flachem Gelände den Erdboden recht gut annähert. Die Entzerrung der Einzelbilder erfolgt durch Projektion auf diese Ebene, wodurch die Koordinaten jedes Messpunktes bestimmt werden können. Abbildung 2 zeigt die Entzerrung eines Bildblocks mit der automatisch berechneten Bildanordnung nach der Transformation in das Referenzkoordinatensystem, hier UTM Zone 32. Der durch ein Bild abgedeckte Bereich wird jeweils als Rechteck dargestellt. Dessen Mittelpunkt wird durch eine Linie mit der zugehörigen Kameraposition verbunden.

Im Rahmen des Projekts *Stuttgarter Adler* wurde eine Diplomarbeit ausgeschrieben und betreut, in der eine Software entwickelt wurde, welche für die beschriebenen Arbeitsschritte eine grafische Oberfläche zur Verfügung stellt [11]. Sie ermöglicht die Auswahl von Bildsammlungen und die Einstellung verschiedener Parameter. Nach der Durchführung der näherungswertfreien Bündelausgleichung können Passpunkte in Bildpaaren interaktiv gemessen werden. Daraus wird eine Transformation in das geografische Koordinatensystem berechnet, was die benötigten Informationen über die Aufnahmegeometrie liefert. Anschließend können die Bilder georektifiziert werden.

Die mit dieser Methode erreichbare Genauigkeit der Georeferenzierung wurde anhand eines speziellen Messfluges mit 3 Streifen über einer Fläche von ca. 200 m x 400 m untersucht. Dabei wurden insgesamt 65 Bilder aufgenommen. Auf der Fläche waren 43 jeweils 25 cm x 25 cm große, weiße Signaltafeln ausgelegt. Deren Koordinaten wurden mit statischer differentieller GPS-Phasenbeobachtung mit einer Genauigkeit von 1 cm in der horizontalen Lage und 2 cm in der Höhe bestimmt.

Die Daten lassen sich so mit einer guten Genauigkeit georeferenzieren. Die Standardabweichung der berechneten Koordinaten beträgt in horizontaler Richtung 4 bis 5 Zentimeter und vertikal etwa 38 Zentimeter. Mit der gewonnenen Orientierung der Bilder kann außerdem eine Auswertung mit kommerziellen Programmen durchgeführt werden. Solche Programme können die Kamerageometrien besser berücksichtigen, so dass die Genauigkeit der Georeferenzierung auf 3 bis 4 Zentimeter horizontal und ca. 20 Zentimeter vertikal ver-

bessert werden kann. Diese Ergebnisse wurden bei einer Fachkonferenz präsentiert und veröffentlicht [7].

Die Koordinaten der Spektrometermessungen werden aus den Bilddaten der Kameras abgeleitet. Durch die Boresight-Kalibrierung ist die pixelgenaue Position der Spektrometermessung im Bild bekannt. Aus der äußeren Orientierung der Kameras bei jeder Aufnahme werden die Koordinaten der entsprechenden Pixel und damit des Spektrometermessflecks berechnet. Abbildung 2 zeigt zu jedem Bild die Position der zugehörigen Spektrometermessungen als Raute.

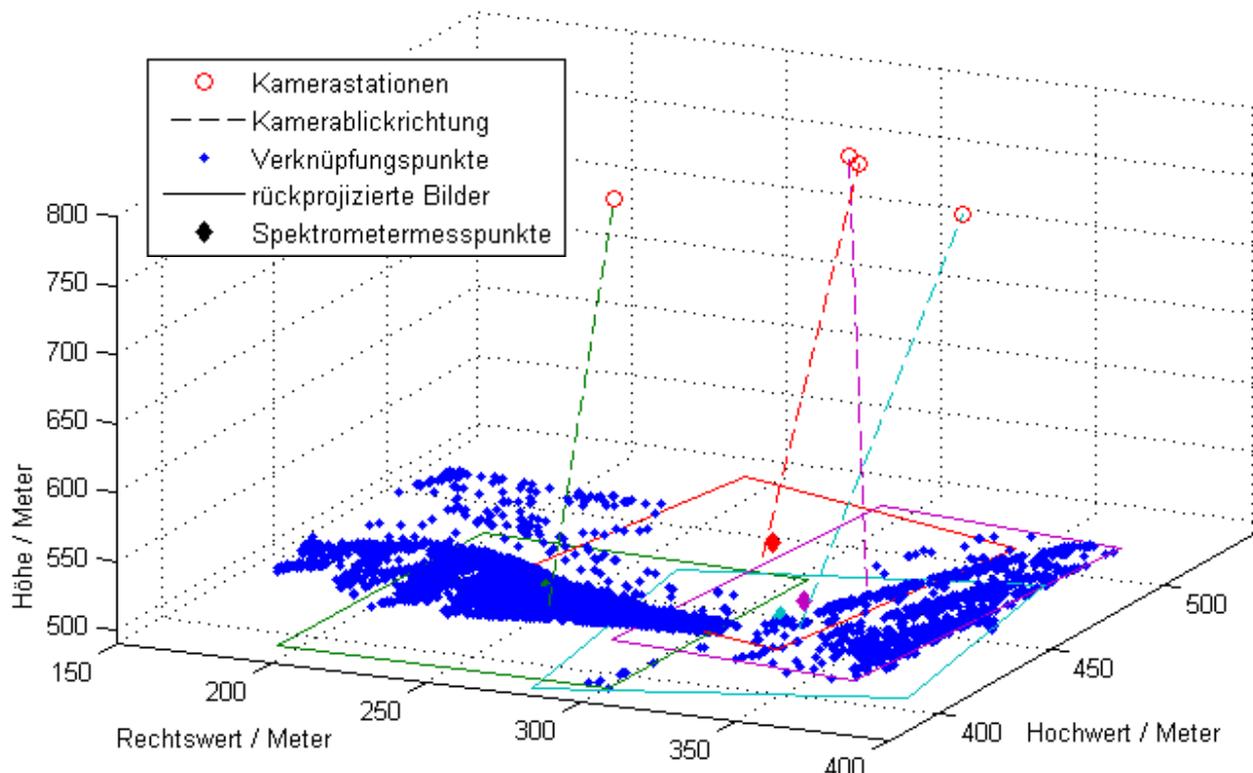


Abbildung 2: Beispiel für die Anordnung der georeferenzierten Daten

5.2 Strahlungstransport und Reflektanzen

Der absolute Wert der reflektierten Strahlung (Energie pro Fläche und Raumwinkel) der im Sichtfeld der VIS/NIR-Instrumente liegenden Oberflächen kann durch Anwendung der Kalibrierung aus den Grauwerten der Messungen bestimmt werden. Das Verhältnis zwischen der von einer Oberfläche in den Halbraum reflektierten Strahlung und der aus dem Halbraum einfallenden Strahlung ist die hemisphärische Reflektanz. Diese wird durch die Material- und Oberflächeneigenschaften bestimmt und weist bei natürlichen Oberflächen häufig einen sehr charakteristischen Verlauf über die Wellenlängen auf. Daher können aus luftgestützten Messungen Umweltdaten abgeleitet und Beschaffenheit und Zustand der abgebildeten Oberfläche charakterisiert werden.

Im sichtbaren Wellenlängenbereich dominiert die Sonnenstrahlung. Die gemessene Strahlung ist daher nicht nur von der betrachteten Oberfläche abhängig, sondern auch von der Sonneneinstrahlung und den Eigenschaften der Atmosphäre. Je genauer die Strahlungsverhältnisse während der Aufnahmen bekannt sind, desto exakter können die Oberflächeneigenschaften bestimmt werden. Daher werden während jedes Messfluges mit dem *Stuttgarter Adler* die zeit- und wellenlängenabhängigen optischen Eigenschaften der Atmosphäre mit einem Sonnenphotometer (siehe Zwischenbericht 2009) bestimmt. Weitere Atmosphärenparameter wie Druck, Temperatur und Luftfeuchtigkeit werden mit

einem Handmessgerät gemessen.

Mit Hilfe von numerischem Strahlungstransport, der die physikalischen Vorgänge beim Transport elektromagnetischer Strahlung durch die Atmosphäre beschreibt, wird dann die einfallende Strahlung berechnet, so dass aus den Spektrometermessungen die spektralen Reflektanzen der Oberflächen bestimmt werden können. Eine analytische Lösung der Strahlungstransportgleichungen ist im Allgemeinen nicht möglich, sodass hierfür numerische Löser eingesetzt werden. Hierfür werden die Programme *Modtran* und *libRadTran* eingesetzt. Für jeden Flug wird die einfallende Strahlung mit den zu diesem Zeitpunkt gemessenen Atmosphärenparametern bestimmt. Die Abweichung aufgrund verschiedener, geringfügig veränderlicher Einflüsse wie Sonnenstand, optische Dichte der Temperatur und Flughöhe werden im Rahmen einer Studienarbeit, die für das Projekt *Stuttgarter Adler* durchgeführt wird, untersucht [12]. Ein Flug dauert etwa 20 bis 30 Minuten. Während dieser Zeit kann die Einstrahlung als konstant angenommen werden.

Die Einstrahlung wird für die einzelnen Wellenlängen in 0,1 nm-Schritten berechnet und anschließend für die verschiedenen Instrumente in den Wellenlängenbereichen, die in der spektralen Kalibrierung bestimmt wurden, gewichtet und zusammengefasst. Insbesondere beim Spektrometer mit seinen schmalen Kanälen muss der Wellenlängenbereich möglichst genau bekannt sein. Ungenauigkeit der spektralen Kalibrierung kann zu erheblichen Abweichungen in der berechneten Reflektanz führen. Wird der Wellenlängenbereich für die einzelnen Pixel falsch oder zu eng gewählt, so wirken sich die Absorptionsbanden der Atmosphäre negativ auf die zu berechnenden Reflexionswerte aus. Die Empfindlichkeit der Pixel wird mit einer Gauß-Verteilung angenähert. Da die tatsächliche Empfindlichkeit der Pixel davon aber leicht abweicht, ergeben sich Unstetigkeiten im Bereich von starken Absorptionsbanden. Im Bereich der Sauerstoffabsorption wird der Fehler sehr groß, etwa über 20 Prozent. Besonders groß wird der Fehler jedoch mit über 30 Prozent in der Wasserdampfbande. Diese Bereiche müssen bei der Auswertung der Daten ausgelassen werden.

Für einen Vergleich der Messwerte zwischen den Instrumenten werden die Spektrometerdaten nach Empfindlichkeit gewichtet und über die Wellenlängen gemittelt. Die Messwerte im Bild werden über den Pixelbereich gemittelt, welchen das Spektrometer abbildet. Da die untere Grenze des grünen Filters 10 nm unterhalb der kleinsten Wellenlänge des Spektrometers liegt, wird für diesen Kanal die Mittelung nur über den verfügbaren Bereich vorgenommen. In Abbildung 3 sind Beispiele von Messung mit dem *Stuttgarter Adler* über Brache und Vegetation dargestellt.

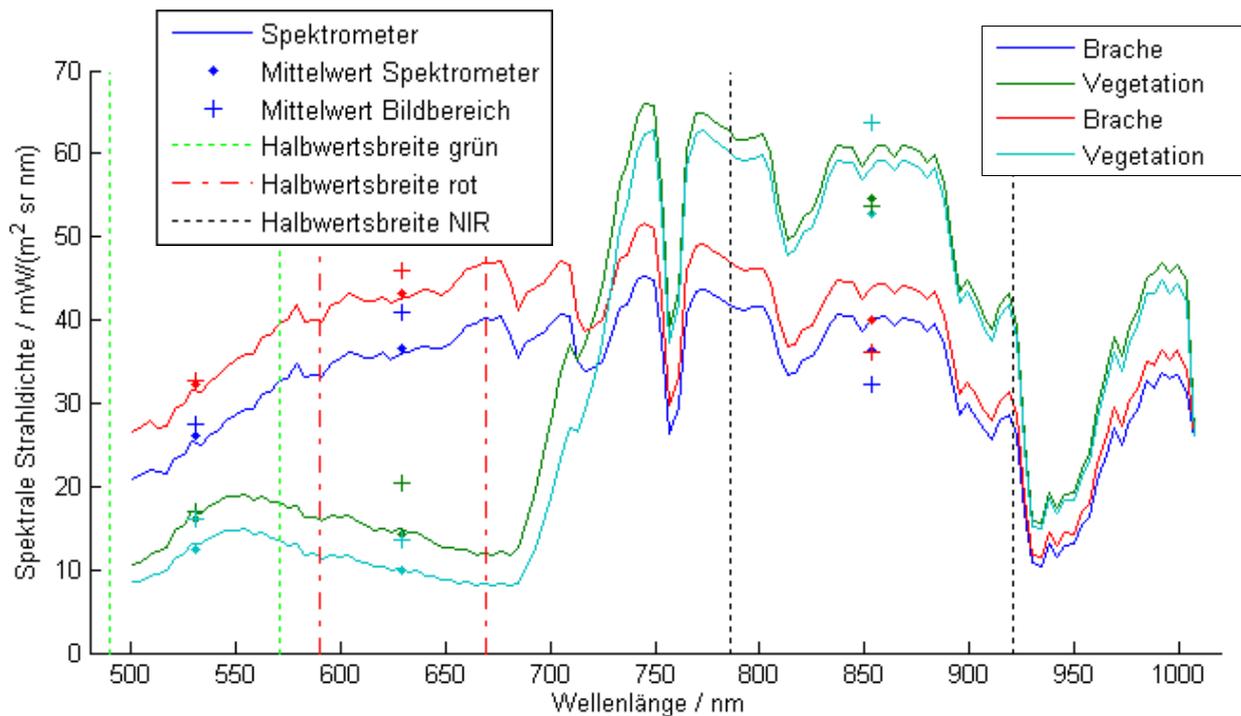


Abbildung 3: Beispiel Spektromettermessungen mit Mittelung und Bilddaten

6 Messungen 2009/2010

Die Fernerkundungsplattform *Stuttgarter Adler* fand in der Landwirtschaft im Rahmen von Untersuchungen zur „Precision Agriculture“ erste Anwendungen. „Precision Agriculture“ ist eine Anpassung der landwirtschaftlichen Methoden an räumlich und zeitlich variable Bodeneigenschaften und Ansprüche der Nutzpflanzen [13]. Landwirtschaftlich genutzte Flächen können durch den an die Heterogenität von Boden- und Pflanzenparametern angepassten Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmittel ökonomischer und gleichzeitig nachhaltiger bewirtschaftet werden. Dies setzt jedoch voraus, dass die Verteilung der Boden- und Pflanzeigenschaften bekannt ist, was durch Bodenproben alleine nur schwer erfüllt werden kann, da der Aufwand, solche Proben zu nehmen und auszuwerten sehr groß ist. Die Anzahl der benötigten Bodenproben kann dagegen durch den Einsatz von Fernerkundungsdaten erheblich reduziert werden.

In den Jahren 2009 und 2010 wurden zu diesem Zweck mit dem *Stuttgarter Adler* mehrere Felder der Versuchsstation Ihinger Hof im Landkreis Böblingen, auf denen durch die Universität Hohenheim landwirtschaftliche Forschung betrieben wird, befliegen. Die Flüge wurden von dem an die Versuchsfelder angrenzenden Modellflugplatz des Modellflugvereins Weil der Stadt aus durchgeführt.

6.1 Untersuchung von Bodeneigenschaften

In der ersten Anwendung geht es um die Erfassung der Heterogenität von Bodeneigenschaften durch Fernerkundung, insbesondere der Konzentration an organischem Kohlenstoff im Boden. Diese beeinflusst die Aktivität von vielen Herbiziden, den pflanzenverfügbaren Stickstoff und die Fähigkeit des Bodens, Pflanzennährstoffe anzulagern. Daher werden Informationen über den organischen Kohlenstoff im Boden dazu verwendet, die Applikationsraten von Landbewirtschaftungsmaßnahmen zu modifizieren. Instrumente wie die des *Stuttgarter Adler* sind zur Fernerkundung dieser Bodeneigenschaften gut geeignet,

denn vor allem der Gehalt an organischer Substanz und Ton hat einen starken Einfluss auf die Bodenreflexion, welche durch Kameras und Spektrometer gemessen wird.

Im Jahr 2009 wurden die Felder Lammwirt (ca. 11,2 ha) und Schafhauser Straße (4,6 ha) in mehreren Messflügen aufgenommen. Für jedes der Felder wurden an zwei verschiedenen Tagen durch Mitarbeiter der Universität Hohenheim Proben des Oberbodens genommen (Lammwirt: 22. April und 19. November, Schafhauser Straße: 27. Juli und 27. August). Insgesamt wurden 115 bzw. 44 Bodenproben genommen und deren Koordinaten mittels DGPS ermittelt. Bei Laboruntersuchungen wurde später der pH-Wert, der Tonanteil (Textur) sowie die Menge an Feuchte, C_{org} und Natrium festgestellt.

Um den Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) zu kartieren, wurde in Anlehnung an Fox [14] und Chen [15] zunächst die Beziehung zwischen den In-Situ-Messwerten (C_{org} in %) und den entsprechenden Strahldichten der Luftbilder in den Kanälen rot (R), grün (G) und NIR (N) durch lineare Regression berechnet.

$$C_{org} = 4,992 - (3,15 G + 2,64 R + 0,315 N) \cdot 10^{-3}$$

Die punktuell durch Proben gemessene Menge an organischem Kohlenstoff variierte von 0.83 % bis 1.89 % C_{org} . Die mit der obigen Gleichung berechneten Werte des gesamten Feldes betragen 0.01 % bis 2,86 % C_{org} . Wie bei der Regression zu erwarten, unterscheiden sich die Mittelwerte mit 1,38 % bzw. 1,36 % nur geringfügig. Für die Kartierung in Abbildung 4 wurde der C_{org} -Gehalt in 10 Gruppen, entsprechend der jeweiligen Legende, eingeteilt und farbig dargestellt. Die Inhomogenität der Oberbodens wird hier offensichtlich, der südliche Teil des Feldes weist in beiden Karten eine größere Konzentration an C_{org} auf, als der nördliche Teil.

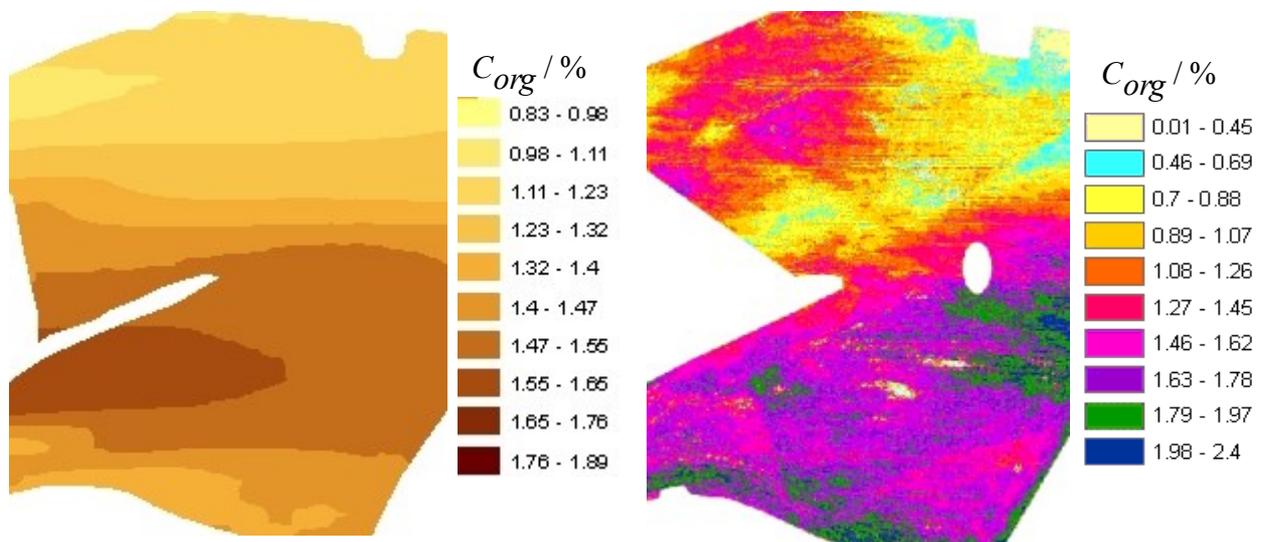


Abbildung 4: Durch Interpolation (links) und durch Fernerkundung (rechts) bestimmter C-Gehalt.

Die relative Differenz D_C zwischen den beiden Methoden wird durch die Gleichung

$$D_C = (C_{org}(FE) - C_{org}(Interp)) / C_{org}(FE)$$

bestimmt, mit den fernerkundlich (FE) und durch Interpolation ($Interp$) bestimmten Werten. Das Ergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt. Auf knapp der Hälfte der Fläche wird die Menge an organischem Kohlenstoff etwas überschätzt. In der nordöstlichen Ecke des Feldes wird der Kohlenstoffgehalt unterschätzt. Nur am südlichen Rand des Feldes treten

große Abweichungen zwischen den beiden Methoden auf.

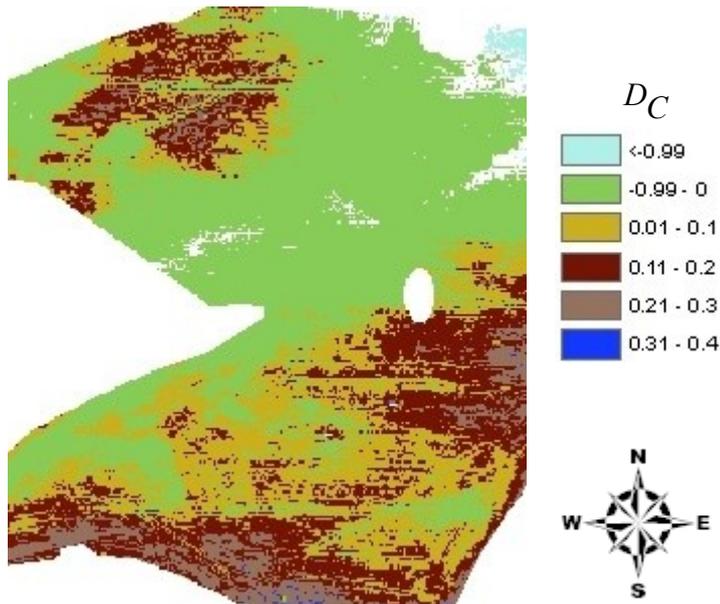


Abbildung 5: Differenz zwischen C-Gehalt aus Interpolation und Fernerkundung

6.2 Agroforst – Kombiniertes Anbau verschiedener Nutzpflanzen

Im Sommer 2010 wurde als weitere Anwendung ein Feld befliegen, auf dem derzeit ein Versuch zum kombinierten Anbau von Getreide und Nutzhölzern durchgeführt wird. Der kombinierte Anbau soll durch Synergieeffekte die Produktivität und Wirtschaftlichkeit der Fläche erhöhen und gleichzeitig die Biodiversität fördern, indem in den Gehölzstreifen Lebensräume für unterschiedlichste Tiere geschaffen werden. Um die Auswirkungen verschiedener Gehölze auf den Ertrag der benachbarten Maispflanzen zu untersuchen, wurden auf der fraglichen Ackerfläche Walnussbäume, Weiden und Hecken in mehreren Reihen angepflanzt. Der Versuch ist langfristig angelegt, da die Walnussbäume einige Jahre benötigen, ehe sie so groß sind, dass sie die benachbarten Nutzpflanzen in ihrem Wachstum beeinträchtigen könnten und bis sie Ertrag in Form von Nüssen und später hochwertigem Nutzholz bringen. Die Weiden und Hecken dagegen wachsen sehr schnell und können schon in den ersten Jahren des Versuchs Energieholz liefern. Mit dem *Stuttgarter Adler* sollen die Ertragsuntersuchungen an den Maispflanzen unterstützt werden, indem die Ergebnisse der punktuellen Ertragsmessung durch Pflanzenproben mithilfe der Luftbilddaten auf die Fläche erweitert werden. Hierzu wurden parallel zur Probennahme am Boden Flüge in 300 m Höhe vornehmlich mit den VIS/NIR-Instrumenten durchgeführt.

An drei Terminen wurden Ertragsmessungen an den Pflanzen durchgeführt, indem in 2, 6 und 12 Meter Abstand von den Gehölzreihen Schnittproben genommen wurden. Die erste Probe wurde einige Wochen nach Aussaat, am 8. Juni, die zweite am 18. August und die letzte am 20. September kurz vor der Ernte geschnitten. Dabei wurde jeweils die Anzahl der Pflanzen auf einer bestimmten Länge aufgezeichnet und später im Labor deren Trockenmasse bestimmt. Parallel zur Probenahme wurden mehrere Bildflüge durchgeführt. Es wurde versucht, je eine Befliegung möglichst zeitnah zum Probenschnitt durchzuführen, jedoch lagen wegen ungünstiger Wetterverhältnissen zum Teil einige Tage bis Wochen dazwischen. Vor Aussaat wurden bereits am 22. und 28. April Flüge durchgeführt, zum ersten Probenschnitt fanden Flüge am 28. Mai und am 24. Juni statt.

Am 10. August und 1. September wurde die Situation kurz vor und zwei Wochen nach dem zweiten Probenschnitt aufgenommen. Fast zeitgleich mit dem dritten Probenschnitt fand die letzte Befliegung am 21. September statt. Die Entwicklungsstadien der Maispflanzen sind mit den Terminen der Probennahme und zugehörigen Befliegungen in Tabelle 2 aufgelistet.

Pflanzenwachstum	Schnittproben	Befliegungen
Blattentwicklung	1. Probe: 08.06.	28.05., 24.06.
Blütenbildung	2. Probe: 18.08.	10.08., 1.09.
Absterben	3. Probe: 20.09.	21.09.

Tabelle 2: Entwicklungsstadien des Mais, Beprobung und Befliegung.

Die Bilddaten werden inhaltlich ausgewertet, um die Korrelation zu den In-Situ Messwerten zu ermitteln und Werte für gesamtes Feld ermitteln. In Abbildung 6 ist ein Ausschnitt des Feldes am 21. September, kurz vor der Ernte, im NIR-Kanal dargestellt. Deutlich zu unterscheiden sind die Maisreihen von den drei verschiedenen Gehölzen in den Forststreifen.



Abbildung 6: Feld Binsensee mit Forststreifen, Kanal NIR.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz kleiner, ferngesteuerter Flugzeuge (UAV) bietet sich für die Fernerkundung in vielen Anwendungsbereichen an, da er eine kostengünstige und flexible Datenerfassung mit zeitlich und geometrisch hoher Auflösung verspricht. In dieser Arbeit wurde untersucht, in wie weit diese Erwartungen erfüllt werden können und welche Arbeitsschritte dafür notwendig sind. Die zur Erfassung der Fernerkundungsdaten notwendige Soft- und Hardware ist nun am IRS vorhanden. Die Auswertung der bereits recht umfangreichen Datensammlung hat begonnen und kann mit den erarbeiteten Methoden fortgeführt werden. Die inhaltliche Auswertung der Daten und eine abschließende Einschätzung ihrer

Qualität und ihres Nutzens ist derzeit noch in Arbeit, das Projekt wird bis Mitte des Jahres 2011 mit der Einreichung einer Dissertationsschrift beendet.

Die Plattform *Stuttgarter Adler* wird auch darüber hinaus weiterhin zu wissenschaftlichen Zwecken genutzt. Die wissenschaftliche Nutzlast wird derzeit um ein abbildendes Spektrometer erweitert. Beide hier vorgestellten Anwendungen sollen weiter verfolgt werden. Für die Bodenuntersuchung bietet sich in Zukunft die Verwendung von Reflektanzen an. Die Befliegung der Agroforstfläche soll in den nächsten Jahren fortgeführt werden.

Literaturverzeichnis

- 1: Benedikt Alt, Marc Schwarzbach, 2004, Auslegung eines Modellflugzeuges fuer die Fernerkundung. Diplomarbeit, Institut für Raumfahrtsysteme, Universität Stuttgart.
- 2: Ursula Kirchgäßner, 2009, Einsatz eines ferngesteuerten Kleinflugzeugs zur Erfassung von Umweltdaten. Zwischenbericht BOY07-Nr.50 .
- 3: P. Brisset, 2006, The Paparazzi solution. Micro Air Vehicle Conference.
- 4: Ulrich Beisl, 2006, Absolute spectroradiometric calibration of the ADS40 sensor. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI (part1):5.
- 5: Ursula Kirchgäßner, Uwe Putze, Maria von Schönermark, 2010, Quantitative remote sensing with off-the-shelf instruments on a small UAV. 3rd Recent Advances in Quantitative Remote Sensing.
- 6: Niels Droeske, 2010, Stuttgarter Adler BRDF-Flugpläne. Diplomarbeit, Institut für Raumfahrtsysteme, Universität Stuttgart.
- 7: Ursula Kirchgäßner, Uwe Putze, Maria von Schönermark, Norbert Haala, 2010, Anforderungen an die Auswertung UAV-gestützter Fernerkundungsdaten. DGPF Tagungsband 19/2010:597-605.
- 8: N. Snavely, S. Seitz, R. Szeliski, 2006, Photo Tourism: Exploring image collections in 3D. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH).
- 9: N. Snavely, S. Seitz, R. Szeliski, 2007, Modeling the World from Internet Photo Collections. International Journal of Computer Vision 80(2):189-210.
- 10: David G. Lowe, 2004, Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision 60(2):91-110.
- 11: Sascha Getto, 2010, Erstellung einer graphischen Auswerteumgebung zur Georeferenzierung und Entzerrung von Luftbildern des Stuttgarter Adlers. Diplomarbeit, Institut für Raumfahrtsysteme, Universität Stuttgart.
- 12: Nadine Lütze, 2011, Strahlungstransport Fernerkundung mit den Stuttgarter Adler. Studienarbeit, Institut für Raumfahrtsysteme, Universität Stuttgart.
- 13: B. M. Whelan, A. B. McBratney, 2001, The "Null Hypothesis" of Precision Agriculture Management. Precision Agriculture 2:265-279.
- 14: Garey A. Fox, Roopa Metla, 2005, Soil Property Analysis using Principal Component Analysis, Soil Line, and Regression Models. Soil Science Society America Journal 69:1782-1788.
- 15: F. Chen, 2000, Field-scale mapping of surface soil organic carbon using remotely sensed imagery. Soil Science Society of America Journal 64:746–753.