

Zusammenfassung der Diplomarbeit

„Konzipierung eines Gerätes zur Bodenmessung der bi-direktionalen Reflexanzverteilungsfunktion unter natürlichen Bedingungen“

und der Studienarbeit

„Instrumentierung für ein ferngesteuertes Modellflugzeug zur Fernerkundung der Erdoberfläche“

Die Entwicklung leistungsfähigerer Instrumente in der Fernerkundung ermöglicht immer weitere Einsatzgebiete. Vom Instrument einzelner Spezialisten entwickelt sich die wissenschaftlich präzise Fernerkundung zum Arbeitsmittel der Wahl in vielen Anwendungen.

Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die Auswertung durch die höhere Qualität der Daten. Es treten jetzt Effekte auf, die bei den älteren, schlechteren Instrumenten aufgrund der niedrigen Auflösung nicht ins Gewicht gefallen sind. Ein sehr wichtiger Effekt ist hierbei die winkelabhängige Reflexion natürlicher Oberflächen. Wird diese nicht beachtet, entstehen Fehler in Größenordnungen, die ein sinnvolles Arbeiten verhindern.

Das Institut für Raumfahrtsysteme beabsichtigt mit einem so genannten „Drei-Etagen-Experiment“ einen grundlegenden Beitrag zum Verständnis der winkelabhängigen Reflexion zu leisten. Dieses Experiment soll die Fusion der Messdaten von einem Bodenmessgerät, einem unbemannten Kleinflugzeug und dem geplanten Satelliten „Flying Laptop“ des Instituts umfassen. Durch die Kombination der drei Plattformen mit ihren unterschiedlichen Arbeitshöhen soll im Besonderen die Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche untersucht werden. Die Konzentration aller Plattformen an einem Institut erlaubt den direkten Vergleich sowohl der Sensoren als auch der Messdaten, was bisher nicht möglich war.

Bei den Überlegungen zur Realisierung des 3-Etagen-Experimentes war es erforderlich, das System als Ganzes sowie den multidisziplinären Charakter immer im Auge zu behalten und die Möglichkeiten der Technologien der Raum- und Luftfahrt als auch der bodengebundenen Verfahren miteinander zu verbinden.

Das Bodenmessgerät dient der Bestimmung der winkelabhängigen Reflexion ohne den Einfluss der Atmosphäre. Die Messungen bilden somit auch die Grundlage für die Kalibration der anderen Plattformen. Die Anforderung an ein solches Instrument ist also besonders die Genauigkeit der Daten.

Das Kleinflugzeug misst in einer Flughöhe von ca. 300m die winkelabhängige Reflexion unter dem Einfluss der bodennahen Atmosphäre. Der Vorteil eines fliegenden Trägers ist zudem die Möglichkeit auch in Bereichen zu messen, die für das Bodenmessgerät nicht zugänglich sind, z.B. Wald.

Der Satellit erfasst aus einer Umlaufbahn in mehreren hundert Kilometern Höhe die Erdoberfläche. Dabei durchläuft die reflektierte Strahlung die gesamte Atmosphäre. Eine direkte Anwendung der Erkenntnisse auf andere Satellitendaten ist somit möglich. Die winkelabhängige Reflexion wird gemessen, indem der Satellit während eines Überfluges einen Punkt am Boden fixiert und aufnimmt.

Die Systeme müssen jeweils so ausgelegt und konstruiert werden, dass sie mit den Mitteln des Institutes aufgebaut und betrieben werden können. Dies betrifft sowohl den Bereich der finanziellen Mittel als auch die zur Verfügung stehende Infrastruktur.

Die eingereichten Arbeiten behandeln die Messungen in den ersten beiden Etagen und legen diese im Hinblick auf das Gesamtprojekt aus.

Grundlagen:

Natürliche Oberflächen besitzen keine idealen gleichmäßigen Reflexionseigenschaften wie es das Modell des lambertschen Strahlers voraussetzt. Dies macht sich besonders bei Aufnahmen aus großer Höhe mit weitwinkligen Sensoren bemerkbar (Flugzeug- und Satellitenaufnahmen). So ergibt die gleiche Oberfläche unter einem flachen Aufnahmewinkel ein anderes Bild als bei einer Aufnahme senkrecht nach unten.

Die Reflexion hängt neben den Eigenschaften der Oberfläche und der Stärke der Einstrahlung auch von der Position der Strahlungsquelle und des Sensors ab.

Die Funktion, welche die Einflüsse der Winkel beschreibt, wird bi-direktionale Reflektanzverteilungsfunktion, kurz BRDF, genannt.

Die BRDF wird im Bereich der Fernerkundung für folgende Ziele eingesetzt:

- Für die Korrektur von Bilddaten, um über den gesamten Bildbereich auf einen konstanten Aufnahmewinkel zurückzurechnen (besonders auch um mehrere Bilder anzugleichen).
- Zur Klassifikation von Oberflächen, wenn Bilddaten aus verschiedenen Aufnahmewinkeln vorliegen.
- Zur Ableitung von Pflanzenparametern oder Gesteinen aus Fernerkundungsdaten.

Die Qualität der erzeugten Produkte der Fernerkundung wird dadurch deutlich gesteigert. Gerade im wachsenden Bereich der Klassifikation von landwirtschaftlichen Nutzflächen lässt sich zukünftig die nötige manuelle Nachbearbeitung von Auswertungen deutlich reduzieren. Dadurch besteht das Potenzial einen operationellen Dienst mit Fernerkundungsdaten einzurichten, der es den Betroffenen, wie beispielsweise Landwirten, ermöglicht von solchen Daten direkt zu profitieren.

Im militärischen Bereich hat die BRDF im sichtbaren und thermischen Spektralbereich große Bedeutung für Erkennungs- und Tarnungsaufgaben.

Weiterhin dient die BRDF im Bereich der Computersimulation dazu, virtuelle Umgebungen realistischer erscheinen zu lassen. Diese sog. anisotrope Filterung wird mit immer schnelleren Computern heute bereits im Heimbereich bei Computerspielen eingesetzt. Eine verbesserte Kenntnis der BRDF würde hier eine Erhöhung des Realitätsgrads ermöglichen.

Um die genannten Anwendungen ausführen zu können, müssen die Reflexionseigenschaften der Oberflächen bekannt sein. Die nötigen Daten werden mit Aufbauten im Labor oder im freien Feld gewonnen. Es gibt bisher nur wenige solche Messungen, die für zivile Anwendungen zur Verfügung stehen.

3-Etagen-Experiment:

Am Institut für Raumfahrtssysteme (IRS) läuft momentan die Entwicklung des Kleinsatelliten „Flying Laptop“, der neben der Fernerkundung auch zur Messung der BRDF herangezogen werden soll. Die hier eingereichten Arbeiten beschreiben zwei weitere Plattformen zur Messung der BRDF, ein unbemanntes Kleinflugzeug und ein Bodenmessgerät. Zusammen entsteht das so genannte 3-Etagen-Experiment. Hier wird in den jeweiligen Plattformen jeweils in denselben Spektralbereichen gemessen. Da die Geräte alle im Zugriff des IRS stehen, sind gleichzeitige Messungen möglich, ohne verschiedene Institutionen koordinieren zu müssen. Die gleichzeitige Messung in unterschiedlichen Höhen erlaubt es, den Einfluss der Atmosphäre auf die winkelabhängige Reflexion genau zu bestimmen.

Messung mit einem Bodenmessgerät:

Das Bodenmessgerät bildet die Basis des „Drei-Etagen-Experimentes“.

Ähnliche Bodenmessungen wurden bereits von anderen Institutionen durchgeführt. Allerdings sind diese Daten bisher hauptsächlich mit speziell entwickelten und gebauten Sensoren gewonnen worden. Solche Entwicklungen sind teuer und erfordern auch bei den Messungen einen hohen Aufwand an Material und Personal. Im Rahmen der hier beschriebenen Arbeiten wird ein System definiert, welches diese Aufgabe mit serienmäßigen Sensoren aus dem Bereich Computer Vision erfüllt. Das ist durch die rasche Weiterentwicklung der digitalen Kamertechnik in den vergangenen Jahren möglich geworden.

Durch diesen Ansatz kann das Projekt in kurzer Zeit realisiert werden und durch standardisierte Schnittstellen modular erweitert werden.

Die Grundvoraussetzung zur Bestimmung der BRDF ist eine Messung der Reflexion einer Oberfläche in einem großen Winkelbereich und bei unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln. Diese Aufgabe führt bei einer Messung vom Boden aus zu zwei Lösungsansätzen:

Goniometer:

Ein Sensor (meist ein Spektrometer), der einen einzelnen Punkt radiometrisch auflöst, wird mittels einer Mechanik um das zu untersuchende Objekt bewegt. Die Messungen können im freien Feld oder im Labor stattfinden, wobei im Labor eine künstliche Lichtquelle verwendet wird. Dies hat den Vorteil, dass die Einstrahlung exakt kontrollierbar ist und auch keine diffuse Strahlung auftritt.

Der Nachteil von Goniometer-Systemen ist ihre Größe und der Aufwand, der mit dem Aufbau verbunden ist.

Außerdem wird nur ein kleiner Bereich der Oberfläche aufgenommen, der dann für die Gesamtheit der Fläche repräsentativ sein muss.

Zentraler Sensor:

Ein oder mehrere Sensoren sind in der Mitte des zu untersuchenden Bereichs erhöht aufgestellt und tasten ihn komplett ab. Dabei ist es möglich, Sensoren, die einen Punkt auflösen mit zwei beweglichen Achsen (z.B. Parabola) oder einen Zeilensensor mit nur einer Drehachse (z.B. WAAC) zu verwenden. Die Messungen erfolgen im freien Feld, da ein großer Bereich der gleichen Oberfläche benötigt wird. Es wird wiederholt bei verschiedenen Sonnenständen gemessen.

Aus dem Verfahren ergeben sich die Probleme mit diesem Aufbau: Die Oberfläche im Messbereich muss gleichförmig sein. Zusätzlich ist diese Methode (wie allerdings auch ein Feldgoniometer) von der natürlichen Einstrahlung durch die Sonne abhängig.

Der Vorteil der Systeme ist, dass sie kompakt und transportabel aufgebaut werden können und so für den schnellen Einsatz mit wenig Personal geeignet sind. Außerdem ist die Messzeit relativ kurz, was bei veränderlichen Umgebungsbedingungen von Vorteil ist.

Die Entscheidung, welches Verfahren weiter untersucht werden soll, wird durch die Umgebungsbedingungen dominiert.

Die Voraussetzung zur Messung der BRDF ist ein weitgehend wolkenloser Himmel. Ein Einsatz der Messgeräte lässt sich deshalb nicht lange im Voraus planen.

Erfahrungen mit aufwändigen Systemen haben gezeigt, dass aufgrund der langen Vorbereitungszeit viele Messgelegenheiten verpasst werden. Wichtige Forderung an das zu bauende System sind deshalb die Bedienung durch wenige Personen, ein schneller Einsatz und die Transportierbarkeit in einem normalen Fahrzeug.

Aus den vorhergehenden Betrachtungen wird deutlich, dass nur ein System mit zentralem Sensor diese Anforderungen erfüllen kann. Der Aufbau eines Goniometers hingegen ist immer auch mit einem großen mechanischen System verbunden.

Die Messung der BRDF soll nach dem Verfahren erfolgen, welches am DLR in Berlin entwickelt und patentiert wurde. Neben bereits vorhandenen Erfahrungen spricht vor allem die hohe Auflösung des Sensors für ein solches System. Die Oberfläche wird hierbei mit einem Zeilensensor innerhalb einer Umdrehung abgetastet.

So kann der Winkelbereich, über den ein Mittelwert gebildet wird, in der Nachbearbeitung bestimmt werden. Bei Systemen mit punktförmiger Abtastung kann es zu Problemen kommen, wenn die Auflösung in derselben Größenordnung liegt, wie die Strukturen im untersuchten Bereich.

Bei den meisten Komponenten für das zu bauende Messgerät konnte die Auswahl aufgrund von Rechnungen und Überlegungen getroffen werden. Eine Ausnahme ist das Gestell, welches die Sensoren in einer Höhe von ca. 5m zu tragen hat. Vorgeschlagen wurde ein Stativ aus der Beleuchtungstechnik. Es wurde ein experimenteller Aufbau verwendet, um zu klären, ob der vorgeschlagene Träger funktionieren kann. Mit der selbst entwickelten und gebauten Sensorik konnte gezeigt werden, dass dies zutrifft.

Das entwickelte Gesamtkonzept stellt ein System dar, welches es dem Institut ermöglicht, BRDF-Messungen durchzuführen. Die Anforderungen hinsichtlich Transport und Bedienung konnten erfüllt werden.

Messung mit einem UAV:

Das UAV stellt die zweite Etage des „Drei-Etagen-Experiments“ dar. Es soll aus einer Flughöhe von etwa 300 m den Einfluss der bodennahen Atmosphäre auf die winkelabhängige Reflexion bestimmen. Die technischen Grundlagen für den Bau und die Instrumentierung des UAV wurden in Studienarbeiten erarbeitet. Es wurde ein Entwurf entwickelt, der speziell darauf ausgelegt ist, wissenschaftliche Daten zu gewinnen. Eine Verwendung bereits existierender UAV's wurde geprüft, aber verworfen, da diese größtenteils für militärische Zwecke ausgelegt sind und nicht die geforderten Flugeigenschaften aufweisen.

Wie schon beim Bodenmessgerät werden im UAV hauptsächlich industriell gefertigte Komponenten vorgesehen, um den Entwicklungsaufwand zu minimieren. Als Schnittstellen werden ebenfalls Industriestandards verwendet.

Da es für die Bestimmung der BRDF nötig ist, unter allen gewünschten Winkeln die Reflexion zu vermessen, stellen sich an das Flugzeug spezielle Anforderungen. Diese sind im Besonderen eine stabile Fluglage, eine langsame Fluggeschwindigkeit und ausreichendes transportierbares Gewicht und Volumen für die Nutzlast/Sensoren. Eine große Spannweite und ausreichende Motorisierung wurden gewählt, um auch hier Reserven für Erweiterungen zu haben.

Der zu untersuchende Bereich der Erdoberfläche wird aus verschiedenen Winkeln aufgenommen. Um die erhaltenen Bilddaten weiterverarbeiten zu können, müssen Position und Orientierung des Flugzeuges bei jeder Aufnahme bekannt sein. Die geforderte Genauigkeit der Winkel dieser Orientierungsdaten muss größer sein, als der Öffnungswinkel eines Bildpunktes des verwendeten Sensorsystems. Wie in der Studienarbeit ausgeführt wird, ist eine Bestimmung der Orientierung über Inertialsensoren in der geforderten Preis- und Gewichtsklasse nicht realisierbar. Systeme mit ausreichender Präzision übersteigen das Gewicht des gesamten UAVs.

Zu bestimmen sind die dreidimensionale Position des Flugzeuges im Raum und drei Winkel, welche die Drehung des Flugzeuges beschreiben.

Eine Möglichkeit, diese 6 Werte zu erhalten, ohne inertielle Sensoren zu verwenden, besteht in der Anwendung des räumlichen Rückwärtsschnittes. Dieses Verfahren aus der Photogrammetrie ermöglicht es, aus markierten und vermessenen Punkten am Boden die Position und Lage der Kamera zu berechnen.

Es wurde ein Test durchgeführt um die Anwendbarkeit des Verfahrens zu demonstrieren.

Auf einer Oberfläche sind 4 Punkte mit genau bekannten Koordinaten im Rechteck angeordnet. Mit einer handelsüblichen Digitalkamera werden nun Aufnahmen aus verschiedenen Winkeln aufgenommen, die jeweils alle 4 Punkte enthalten.

Die Vermessung der Punkte und das Berechnen der Position und der Winkel geschehen mit Hilfe eines photogrammetrischen Auswerteprogrammes.

Die Ergebnisse zeigen, dass es so möglich ist, nur aufgrund des Bildinhaltes die benötigten Daten der Position zu berechnen.

Das Flugzeug muss zur Erfassung der BRDF Kreise um das zu untersuchende Gebiet abfliegen und bei jedem Kreis die Höhe ändern. Für eine Bestimmung der BRDF sind unter den getroffenen Annahmen ca. 60 Aufnahmen nötig.

Hierbei werden die Nachteile des Goniometers ausgeglichen, da die Aufnahmedauer gering ist und der zu untersuchende Bereich mit hoher Auflösung aufgenommen wird (bei einem Goniometer kommen meist Sensoren mit einem Öffnungswinkel bis zu 5° zum Einsatz).

Die Vorteile eines solchen Systems sind, dass außer dem Anbringen und Vermessen der Referenzpunkte keine weiteren Vorbereitungen zu treffen sind.

Außerdem können auch Oberflächen vermessen werden, die für andere Verfahren nicht zugänglich sind, da ihr Bewuchs beispielsweise zu hoch ist.

Eine Verwendung des UAV für weitere Einsätze ist bereits vorgesehen. Am Institut soll getestet werden, ob Fernerkundungsdaten gewonnen werden können, die mit anderen Systemen vergleichbar sind. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens dient das Flugzeug dann der Erprobung von Flugreglern. Zielstellung ist dabei, ein unbemanntes Flugzeug im kontrollierten Luftraum fliegen zu können.

Kalibrierung:

Um ein akzeptierbares Ergebnis zu erhalten, muss der gesamte Messaufbau, insbesondere jeder optische Sensor, kalibriert werden.

Die Ausrichtung der Kameras wird bei der geometrischen Kalibrierung eingestellt. Die Eigenschaften des Gesamtsystems aus Optik, Filtern und Sensor werden bei der radiometrischen Kalibrierung vermessen.

Die entwickelten Verfahren gehen auch hier von der vorhandenen Infrastruktur des Institutes aus. Die Verwendung von Testmustern zur geometrischen Kalibrierung der Zeilenkameras ist eine Möglichkeit, ohne die sonst üblichen, sehr großen Schwenkeinrichtungen auszukommen. Es werden Strukturen aufgenommen aus deren Abbildung die Position des Sensors berechnet werden kann.

Die radiometrische Kalibrierung erfolgt mit Hilfe einer homogenen Strahlungsquelle. Diese liefert gleichmäßiges Licht mit einer bekannten Strahlungsflußdichte. Für jeden Bildpunkt können dann Umrechnungsfaktoren bestimmt werden, um von digitalen Werten auf Strahl-dichten umzurechnen.

Erweiterungen:

Die beschriebenen Systeme messen in ihrem Grundaufbau die BRDF im Bereich des sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereichs. Von großem Interesse ist weiterhin der Bereich der Wärmestrahlung, das sog. thermische Infrarot. Auch in diesem Bereich, in dem vornehmlich Emission auftritt, gibt es starke winkelabhängige Einflüsse.

Diese sind von besonderem Interesse bei der Bestimmung von Bodentemperaturen, die für Klimamodelle wichtig sind.

Im Bereich des thermalen Infrarots ist aufgrund der bisher fehlenden Sensoren die Zahl der Messungen gering. Mögliche schnelle Temperaturänderungen erschweren die Messung zudem, deshalb wird die Messung einer Referenztemperatur nötig. Es werden in der eingereichten Arbeit neue Messgeometrien entwickelt, die es ermöglichen, auch in diesem Spektralbereich mit einer hohen räumlichen Auflösung zu messen ohne einen mechanischen Aufbau wie ein Goniometer zu benötigen.

Die Industrie arbeitet zur Zeit stark an der Entwicklung abbildender Spektrometer. Auch hier findet eine Miniaturisierung statt, die es ermöglicht, ein solches Gerät zur Messung der BRDF einzusetzen. Es ist nur mit einem Spektrometer möglich, den wahren spektralen Verlauf der Reflexion zu bestimmen. Eine Kamera mit Filter kann immer nur das Integral über die einfallende Strahlung und die Filterkurve bestimmen. In der vorgelegten Diplomarbeit ist die Erweiterung mit einem abbildenden Spektrometer bereits vorgesehen.

Zusammenfassung:

Die hier beschriebenen Arbeiten entwickeln für die Aufgabe der BRDF-Messung ein System, welches auf verschiedenen Plattformen eingesetzt werden kann. Die entsprechenden Plattformen, das Bodengerät und das Kleinflugzeug, werden als Konzept definiert.

Die Besonderheit im Vergleich zu bisherigen Ansätzen zur Bestimmung der BRDF ist die weitgehende Verwendung vorhandener Komponenten und die Berücksichtigung des Aufwandes für den Einsatz der Geräte.

Ein schneller Einsatz ermöglicht so häufigere Messungen und damit eine Erweiterung der Datengrundlage.

Die Plattformen an sich, in besonderem Maße das UAV, eignen sich auch für die Erprobung und den Einsatz anderer Instrumente und sind somit über den Rahmen des eigentlichen Vorhabens hinaus für die Forschung interessant.

Stuttgart, den 27.02.2006