

Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung  
landwirtschaftlicher Flächen  
mit multitemporalen Fernerkundungsbildern

Diplomarbeit

Richard Steffen

Universität Hannover  
Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen  
Prof. Dr.-Ing. Heipke

Januar 2001

Hannover, den 18. April 2001

#### Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass diese Arbeit selbstständig von mir verfasst wurde. Ich habe keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen und keine sonstigen fremden Hilfen verwendet.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Vegetation und Fernerkundung . . . . .	3
2.1.1	Pflanzen und deren Entwicklungszyklen . . . . .	3
2.1.2	Landwirtschaftlicher Ackerbau . . . . .	4
2.1.3	Reflexion, Absorption und Streuung . . . . .	9
2.2	Aufnahmesysteme . . . . .	15
2.2.1	Feldspektrometer . . . . .	15
2.2.2	Daedalusscanner . . . . .	16
2.2.3	Satellitensystem von RapidEye . . . . .	17
2.3	Verwendete Programme . . . . .	18
2.3.1	ERDAS IMAGINE 8.3 und 8.4 . . . . .	18
2.3.2	GNUPLOT . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Datenmaterial und Aufbereitung</b>	<b>20</b>
3.1	Vergleichsdaten . . . . .	20
3.1.1	Datenaufnahme . . . . .	20
3.1.2	Spektralbandumwandlung . . . . .	21
3.2	Bilddaten . . . . .	24
3.2.1	Daedalusscannerbefliegung . . . . .	24
3.2.2	Kalibrierung, radiometrische Korrektion und Georeferenzierung	24
3.2.3	Extraktion von Signaturkurven . . . . .	26

<b>4</b>	<b>Trennbarkeitsanalyse</b>	<b>28</b>
4.1	Multitemporaler Ansatz . . . . .	28
4.2	Vergleichsdaten . . . . .	28
4.2.1	EC Stadien und Vergleichszeitpunkte . . . . .	29
4.2.2	Analyse . . . . .	31
4.2.3	Bewertung . . . . .	34
4.3	Bilddaten . . . . .	35
4.3.1	Analyse . . . . .	35
4.3.2	Bewertung . . . . .	39
4.4	Vergleich . . . . .	39
4.5	Trennbarkeit aller untersuchten Oberflächen in den Bilddaten . . . . .	41
4.5.1	Analyse . . . . .	41
4.5.2	Bewertung . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Klassifikation</b>	<b>48</b>
5.1	Grundlegendes . . . . .	48
5.2	Der ERDAS IMAGINE - Expert Classifier . . . . .	49
5.3	Modellbildung . . . . .	50
5.3.1	Modell zur Grobtrennung . . . . .	51
5.3.2	Modell zur Feintrennung . . . . .	52
5.4	Maximum-Likelihood . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Klassifikationsergebnisse</b>	<b>57</b>
6.1	Genauigkeiten der Modelle . . . . .	57
6.2	Vorgehensweise und Ergebnisse der Firma RapidEye . . . . .	64
6.3	Diskussion und Vorschläge für ein Expertensystem . . . . .	65
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>68</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>70</b>
<b>A</b>	<b>Inhalt der beiliegenden Datenträger</b>	<b>72</b>
A.1	Gesamtinhalt . . . . .	73

# Abbildungsverzeichnis

2.1	EC-Stadien von Weizen . . . . .	4
2.2	Zeitliche Entwicklung verschiedener Pflanzen in Bezug auf deren Hauptentwicklungsstadien . . . . .	5
2.3	Durchlässigkeit der Atmosphäre „atmospheric window“ auf einer logarithmischen Skala . . . . .	9
2.4	Aufnahmegeometrie eines photographischen Bildes . . . . .	10
2.5	Typische Reflexionsspektren von Boden . . . . .	12
2.6	Bildfluggeometrie . . . . .	16
3.1	Winterweizen vor der Umwandlung . . . . .	23
3.2	Winterweizen nach der Umwandlung . . . . .	23
4.1	EC-Stadien der Pflanzen in Garching . . . . .	29
4.2	Reflexionsspektren zum Tag 117 - Vergleichsdaten . . . . .	31
4.3	Reflexionsspektren zum Tag 160 - Vergleichsdaten . . . . .	32
4.4	Reflexionsspektren zum Tag 213 - Vergleichsdaten . . . . .	33
4.5	NDVI - Vergleichsdaten . . . . .	33
4.6	Reflexionsspektren zum Tag 117 - Bilddaten . . . . .	35
4.7	Reflexionsspektren zum Tag 131 - Bilddaten . . . . .	36
4.8	Reflexionsspektren zum Tag 160 - Bilddaten . . . . .	37
4.9	Reflexionsspektren zum Tag 213 - Bilddaten . . . . .	38
4.10	NDVI - Bilddaten . . . . .	38
4.11	Zusammenstellung von Bildausschnitten der untersuchten Oberflächen als Echtfarbenbild . . . . .	41
4.12	Zusammenstellung von Bildausschnitten der untersuchten Oberflächen als Falschfarbenbild (CIR) . . . . .	42

4.13	Zusammenstellung von Bildausschnitten der untersuchten Oberflächen als NDVI-Bild . . . . .	43
4.14	Zusätzliche Reflexionsspektren zum Tag 117 - Bilddaten . . . . .	44
4.15	Zusätzliche Reflexionsspektren zum Tag 131 - Bilddaten . . . . .	45
4.16	Zusätzliche Reflexionsspektren zum Tag 160 - Bilddaten . . . . .	45
4.17	Zusätzliche Reflexionsspektren zum Tag 213 - Bilddaten . . . . .	46
4.18	Zusätzliche NDVI - Bilddaten . . . . .	46
5.1	Entscheidungsbaum . . . . .	49
5.2	Wahrscheinlichkeiten im Modell . . . . .	50
5.3	Modell zur Grobtrennung . . . . .	51
5.4	Modell zur Feintrennung . . . . .	53
6.1	Farbzuordnungen im Ausgabebild . . . . .	58
6.2	Klassifikationsergebnis des Feinmodells . . . . .	59
6.3	Schlagweise Genauigkeit in Prozent . . . . .	62

# Kapitel 1

## Einleitung

Die Landwirtschaft stellt einen wichtigen Zweig der Volkswirtschaft dar. In Deutschland wachsen auf 17 Millionen Hektar Ackerland Rohstoffe, wie Rapsöl, Getreide, Gemüse, Zuckerrüben, Wein, Hopfen und Futtermittel für die Tierproduktion. Sie sind Ausgangsstoffe für viele Produkte und dienen der Versorgung der Bevölkerung mit Grundnahrungsmitteln.

Mit der Fernerkundung steht eine wirtschaftliche Methode zur Verfügung, um die Überwachung und das Qualitätsmanagement des Produktionsprozesses zu gewährleisten. Zur Zeit wird von der visuellen Interpretation der Fernerkundungsdaten auf automatische Auswerteverfahren übergegangen. Im Zuge einer rechnergestützten Interpretation (Klassifizierung) können die verschiedenen Fruchtarten auf den landwirtschaftlichen Flächen identifiziert werden. Fortschrittliche Verfahren lassen auf den Zustand und den Nährstoffbedarf schließen. In der Entwicklung sind neben der rein automatischen Bildinterpretation auch wissensbasierte Systeme, in denen neben den Bildinformationen komplexes Hintergrundwissen integriert ist. Durch die Vernetzung unterschiedlicher Datenbanken ist eine fachübergreifende Wissensverarbeitung möglich.

Diese Informationen dienen dem sogenannten *Precise Farming* als Basisdaten, mit deren Hilfe gezielte Düngung, Krankheits- und Schädlingsbekämpfung möglich ist. Geringere Bewirtschaftungskosten und höhere Erträge sind die Vorteile dieses Verfahrens. Weiterhin dienen die Informationen über Schädigungen (z.B. Hagelschäden) den Versicherungen zur Quantifizierung des Versicherungsfalles. So können kostenintensive Gutachten vermieden und Missbrauch vorgebeugt werden. Im Zuge der europäischen Harmonisierung der Landwirtschaft wurde das MARS-Projekt („Monitoring Agricultural Statistics with Remote Sensing“) ins Leben gerufen, welches mit Mitteln der Fernerkundung Ertragsschätzungen und Überwachungen der Anbauflächen erlaubt. Diese Daten dienen zur Regulierung der Preispolitik und sind Grundlage für zukünftige Maßnahmen zum Erhalt und Harmonisierung des europäischen Agrarmarktes. Ebenso findet eine automatische Überprüfung der Größe von Stilllegungsflächen, zu der jeder Landwirt verpflichtet ist, statt.

Das kooperative Projekt INVEKOS („Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem“) zwischen namhaften Firmen in der Fernerkundung und mehreren europäischen Behörden wurde als integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem vom Europäischen Rat 1992 verabschiedet. Ziel des integrierten Systems ist, ein vereinheitlichendes,

---

maßnahmenübergreifendes System der Förderungsverwaltung zu schaffen. Es verbindet die im MARS-Projekt technisch umgesetzte Anwendung der Fernerkundung mit verwaltungstechnischen Aufgaben der Behörden, was zu einer gravierenden Kostenersparnis im Verwaltungsbereich geführt. Im kommerziellen Bereich sei die Firma VISTA GmbH genannt, die sich neben der Nutzungsklassifizierung und Ertragschätzung auch mit hydrologischen Fragestellungen der Erdoberfläche beschäftigt. Die Aquisition der Bilddaten zur Analyse erfolgt üblicherweise durch wissenschaftliche oder kommerzielle Fernerkundungssatelliten. Hier sind insbesondere die Systeme Landsat, Spot, ERS-1, MOMS, MOS-1 zu nennen. Kommerzielle Systeme wie IKONOS von der Firma Space-Imaging oder das geplante System der Firma RapidEye zeigen die wirtschaftliche Bedeutung solcher Fernerkundungssysteme.

Mit dieser Arbeit sollen Grundlagen, Probleme und Lösungsvorschläge der Anwendung der Fernerkundung in der Landwirtschaft beschrieben werden. In Zusammenarbeit mit der Firma RapidEye, welche Daedalusscannerdaten und Referenzdaten der landwirtschaftlichen Nutzung zur Verfügung stellte, soll untersucht werden, inwieweit eine Trennung landwirtschaftlicher Anbauflächen möglich ist. Dabei soll analysiert werden, in welchen Spektralkanälen und zu welchen Zeitpunkten die Information der Trennbarkeit zu finden ist. Die Beurteilung des Spektralverhaltens zu verschiedenen Zeitpunkten benötigt umfangreiches Wissen aus der Biologie und Landwirtschaft.

In Kapitel 2 werden deshalb die wichtigsten Grundlagen dieses Bereiches dargestellt. Die zur Verfügung stehenden Daten sollen weiterverarbeitet (Kapitel 3) und auf die Trennbarkeit der vorkommenden Nutzpflanzen (Kapitel 4) untersucht werden. Mit den gewonnen Erkenntnissen soll daraufhin ein Modell zu Trennung der unterschiedlich genutzten Flächen mit Hilfe der multitemporalen Bilddaten erstellt werden. Im Kapitel 5 soll eine praktikable Lösung eines Klassifizierungsansatzes gefunden und mit dem ERDAS Expert-Classifer implementiert werden. Nach dem Testen des Klassifizierungsmodells wird eine Genauigkeitsüberprüfung (Kapitel 6) durchgeführt und die Ergebnisse werden diskutiert und bewertet. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen soll ein System vorgeschlagen werden, welches die Aspekte der Automatisierung und fachbereichsübergreifende Datenimplementierung berücksichtigt.



# Kapitel 2

## Theoretische Grundlagen

### 2.1 Vegetation und Fernerkundung

#### 2.1.1 Pflanzen und deren Entwicklungszyklen

Um ein Verständnis für die Beziehungen zwischen der Fernerkundung und der in der Landwirtschaft vorkommenden Nutzpflanzen zu erhalten, ist es notwendig, die zeitliche und physiologische Entwicklung der Kulturpflanzen zu kennen. Vorab sollen dazu einige Begriffe erklärt werden <sup>1</sup>:

- **Phänologie:** Lehre von den Erscheinungen des jahreszeitlichen Ablaufs in der Pflanzen und Tierwelt
- **Morphologie:** Lehre von der Entwicklung der Formen (Formbildung)
- **Ontogenese:** Irreversible Entwicklung eines Lebewesens von der befruchteten Eizelle bis zur Geschlechtsreife

Ontogenese ist der Entwicklungsprozess der Pflanze, in dessen Verlauf eine Spezialisierung und Differenzierung einzelner Pflanzenteile erfolgt. Sie ist die geordnete Folge von Veränderungen der äußeren Gestalt und der Phänologie mit der Zeit. Die Entwicklungszustände und Phasen können durch morphologische Stadien und die Reihenfolge ihres Erscheinens beschrieben werden. Die Skalierung der Ontogenese kann nach dem EC-Code erfolgen. Die Tabelle 2.1 zeigt die gesetzmäßige Entwicklung in morphologisch definierten Phasen. Der EC-Code wird zur Charakterisierung des Entwicklungszustandes verwendet. So wurde eine Skalierung von 0 bis 99 angesetzt. Die Hauptstadien sind nach der Beobachtung von Getreide benannt, können aber auf andere Arten leicht übertragen werden. Eine weitere Unterteilung ist zwar möglich, in Hinblick auf die Anwendung in der Fernerkundung jedoch nicht zweckmäßig.

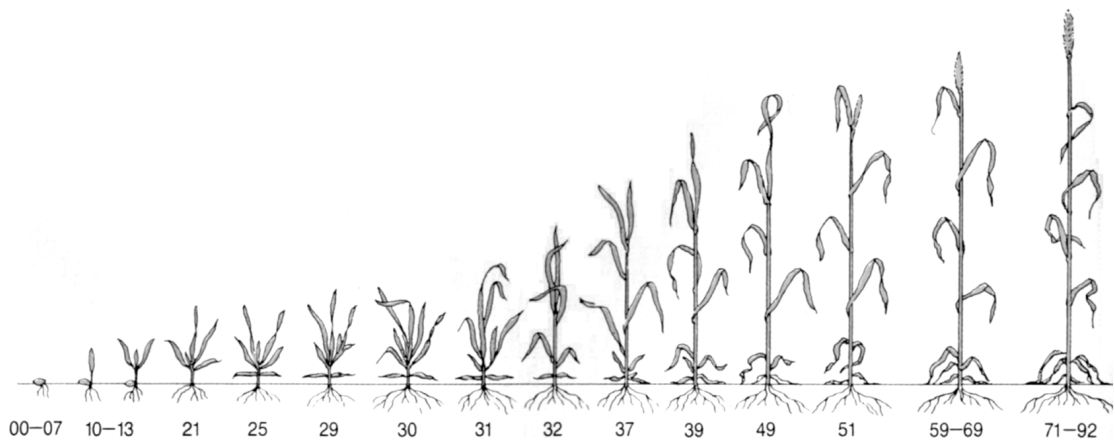
---

<sup>1</sup>vgl. Bachthaler (1992)

Stadium	EC-Code
Keimung	0 - 9
Sämlingswachstum	10 - 19
Bestockung	20 - 29
Schossen (Halmstreckung)	30 - 39
Ährenscheiden	41 - 49
Ährenschieben	50 - 59
Blüte	60 - 69
Reife	71 - 94
Samenruhe	95 - 99

*Tabelle 2.1: EC-Code (Zadoks et al., 1974)*

In Abbildung 2.1 sind die Hauptentwicklungsstadien von Weizen dargestellt.



*Abbildung 2.1: EC-Stadien von Weizen (Bachthaler, 1992)*

Von wesentlicher Bedeutung ist der zeitliche Verlauf, vom Zeitpunkt der Aussaat bis Reifung der unterschiedlichen Kulturpflanzen. Nur durch dieses Wissen ist die Zuordnung eines Zeitpunktes zu dem Entwicklungsstadium der spezifischen Pflanze möglich. Abbildung 2.2 zeigt diese Zuordnung für einige Beispiele.

### 2.1.2 Landwirtschaftlicher Ackerbau

Die Landwirtschaft ist ein weitreichendes Gebiet der Wissenschaft. Sie erzeugt die unterschiedlichsten Rohstoffe für unsere Volkswirtschaft und ist ein wesentliches Glied in der Nahrungsproduktion. Sie beeinflusst das Aussehen unserer Kulturlandschaft und ist mitverantwortlich für die Pflege unserer Umwelt. Um ein Verständnis für die Pflanzenentwicklung in der Landwirtschaft zu bekommen, müssen die Grundlagen der Pflanzenproduktion bekannt sein. Daher soll hier besonderes Augenmerk

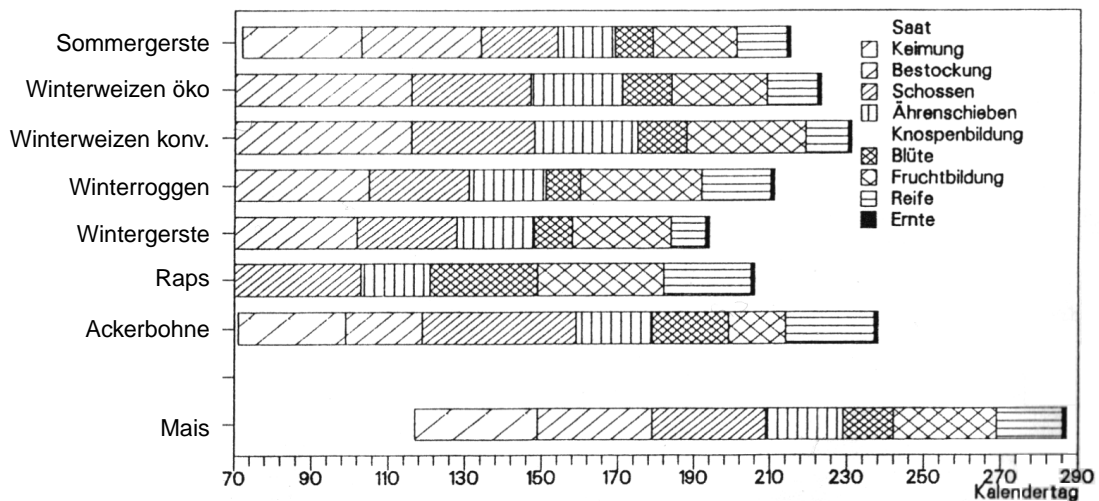


Abbildung 2.2: Zeitliche Entwicklung verschiedener Pflanzen in Bezug auf deren Hauptentwicklungsstadien (Schneider, 1994)

auf die Bodenbeschaffenheit, Aussaattermine, Pflanzenschädigungen, Wasser- und Nährstoffbedarf, Erntezeitpunkte und Fruchtfolge gelegt werden.

### Der Boden

Jede Pflanze benötigt einen optimalen Boden für eine gute Entwicklung. Daher ist das Wissen über die Bodenart und deren Eigenschaften für den Landwirt sehr wichtig. Der Boden wird nach seiner Entstehung, Mineral- und Humusgehalt, Wasserspeichervermögen und Durchlässigkeit, PH-Wert, Stickstoffgehalt, Bodendurchlüftung, Schadstoffgehalt, Festigkeit und Bodenleben charakterisiert. Bodenkarten im Maßstab von 1:5000 können in der Regel von den Landesvermessungsämtern oder Landwirtschaftsämtern bezogen werden. Sie dienen dem Landwirt, neben selbst durchgeführten Bodenproben, als Grundlage seiner Fruchtfolgewahl, zu erbringenden Bodenpflege und Düngung. Für eine tiefgründigere Einsicht in dieses Gebiet sei auf Spezialliteratur verwiesen.

### Die Pflanzen

In der Landwirtschaft werden zwei wesentliche Feldfruchtgruppen unterschieden. Die Tabelle 2.2 zeigt einige Beispiele.

Halmfrüchte	Blattfrüchte
Winterweizen	Kartoffeln
Wintergerste	Winterraps
Winterroggen	Betarüben
Sommerweizen	Feldgemüse
Sommergerste	Kleegras
Hafer	Mais
	Erbse

Tabelle 2.2: Einteilung von Feldfrüchten (Bachthaler, 1992)

Halmfrüchte stellen die verschiedenen Getreidesorten dar. Sie sind in ihrer morphologischen Entwicklung einander sehr ähnlich. Nach ihrer Phänologie ist jedoch eine andere Einteilung nötig. Man unterscheidet zwischen einjährigen und zweijährigen Pflanzen. Erstere durchleben ihre gesamte Entwicklung innerhalb eines Kalenderjahres. Zweijährige Pflanzen benötigen zur Schossauslösung und Vernalisation (Ährenentwicklung) den Jahresübergang mit seinen kühlen Temperaturen (wenige Wochen unter 5°C). Diese Pflanzen sind nur durch diese Ruhephase in der Lage, später Blüten und somit Früchte zu entwickeln. Tabelle 2.3 zeigt ein Beispiel.

Zweijährig	Einjährig
Winterweizen	Kartoffeln
Wintergerste	Sommergerste
Winterroggen	Erbse
Winterraps	Sommerweizen
Betarüben	Feldgemüse
	Mais

*Tabelle 2.3: Einteilung nach Ein- und Zweijährigkeit*

Diese Unterscheidung ist ein Ansatz zur multitemporalen Grobtrennung. Die Beta-rübe stellt eine Sonderrolle dar. Sie ist zwar eine zweijährige Pflanze, wird aber im Allgemeinen im Frühjahr gesät und schon im Herbst geerntet. Zur Grobtrennung siehe Kapitel 4 und 5.

An dieser Stelle soll auf die Besonderheit der zu untersuchenden Pflanzen eingegangen werden. Insbesondere in Abhängigkeit von Saat- und Erntezeitpunkt können Rückschlüsse auf spektrale Kenngrößen gewonnen werden.

**Wintergerste** - Sie stellt relativ geringe Ansprüche. Schwere kalkhaltige Böden bringen die besten Erträge. Aussattermin ist zwischen dem 10. und 20. September mit einem Reihenabstand von 8-12 cm. Eine Entwicklung bis zur guten Bestockung zum Winter ist erwünscht. Die Düngung ist abhängig von der Vorfrucht. Geerntet wird schon vor der Totreife<sup>2</sup>, da Halm- und Ährenknick zu Ertragsverlusten führen können.

**Winterweizen** - Er stellt hohe Ansprüche an Klima und Boden. Benötigt werden ausreichend Wärme und Feuchtigkeit bis in den Juli, sowie kalk- und humusreiche Böden mit annähernd neutralem PH-Wert. Auf plötzliche Kälteeinbrüche reagiert er empfindlich, ist jedoch bis zum EC-Stadium 20 winterfest. Der optimale Aussattermin liegt zwischen dem 5. und 10. Oktober. Es sollte mit einer Drillweite<sup>3</sup> von 12 bis 14 cm gesät werden. Für die spätere Bearbeitung sind Fahrgassen empfehlenswert. Gedüngt wird mit Phosphorsäure und Kali. Die Stickstoffdüngung beeinflusst die Ertragsentwicklung maßgeblich. Weizen hat eine langsame Frühjahrsentwicklung. Erst mit zunehmenden Temperaturen beschleunigt sich der Biomassenaufbau und mit der Bestockung benötigt er viel Wasser. Die Ernte richtet sich nach der Kornfeuchte. Der richtige Zeitpunkt ist die sogenannte Totreife. Krankheiten kommen

<sup>2</sup>Die Pflanze besteht aus abgestorbener Biomasse.

<sup>3</sup>Reihenabstand durch die Aussaat

als Blattdürre, Blatt- und Spelzenbräune, Weizensteinbrand, Zwergsteinbrand und verschiedene Pilzkrankheiten vor.

**Roggen** - Er gilt als die anspruchsloseste Getreideart bezüglich Boden und Klima. Von Mitte September bis Mitte Oktober ist der günstigste Saatzeitpunkt. Eine Bestockung im Herbst ist erwünscht. Roggen verträgt Frost bis  $-20^{\circ}\text{C}$ , ist aber gegen lang liegende Schneedecken empfindlich (Schneeschnitz). Roggen ist im Gegensatz zu anderen Getreidearten Fremdbefruchter<sup>4</sup>. Daher benötigt er trockene Witterung in der Blüte. Der Pflegeaufwand ist gering. Erntezeitpunkt ist die Vollreife.

**Triticale** - Sie ist eine Kreuzung aus Weizen und Roggen und dient vorwiegend als Futtergetreide. Aussaattermin ist der 25. September bis 10. Oktober. Eine Halmverkürzung mit chemischen Mitteln ist unverzichtbar. Gedüngt wird wie bei Roggen. Triticale gilt als gesunde Getreideart, kann jedoch an Fußkrankheiten leiden.

**Raps** - Das Klima und der Boden haben wesentlichen Einfluss auf den Raps. Mit der Aussaat zwischen dem 20. und 25. August (Reihenabstand ca. 13 cm) ist eine gute Entwicklung zum Wintereinbruch erforderlich, da er nur begrenzte Frosthärte aufweist. Der Boden sollte tief durchwurzelt werden können. Die Blüte ist im Mai. Geerntet wird bei schwarzen Körnern. Das Blattwerk kann noch teilweise grün sein.

**Kartoffel** - Sie ist sehr anpassungsfähig an Klima und Boden. Warme Frühjahrswitterung und gute Wasserversorgung begünstigen das Wachstum. Mittelschwere, milde Lehmböden liefern die höchsten Erträge. Eine Vorkeimung des Pflanzengutes ist empfehlenswert. Gepflanzt wird zwischen April und Mai mit einer Reihenweite von 75 cm. Die Reife der Knollen ist bei trockenem Blattwerk gegeben. Kartoffeln müssen gegen verschiedene Krankheiten und Schädlinge, wie z.B dem Kartoffelkäfer geschützt werden. Hier kommen oft moderne Insektizide zum Einsatz.

**Erbse** - Bekannt ist sie durch ihr Stickstoffbindungsvermögen und ihre Anpruchslosigkeit. Leichte Böden und geringer Niederschlag führen kaum zu Ertragseinbußen. Aussaat ist bei abgetrocknetem Boden zu einem möglichst frühen Zeitpunkt mit einem Reihenabstand von 13-17 cm. Die Ernte erfolgt bei Trockenwerden des Blattwerkes zum Ende des Sommers.

**Zuckerrübe** - Sie zählt zu den zweijährigen Pflanzen. Der Rübenkörper wird im ersten Vegetationsjahr voll ausgebildet, im zweiten Jahr folgen Spross und Samenanlagen. Werden Zuckerrüben nicht zur Samengewinnung angebaut, findet die Ernte schon im ersten Jahr statt. Zur Keimung und Jugendentwicklung sind Temperaturen über  $10^{\circ}\text{C}$  und tiefgründige Böden erforderlich. Die Wasserversorgung muss zu diesem Zeitpunkt gesichert sein. Gesät wird April bis Mai mit einem Reihenabstand von 50 cm. Trockenheitsperioden im Sommer werden durch Abwerfen älterer Blätter überstanden. Geerntet wird von September bis Ende Oktober.

**Mais** - Er stellt geringe Bodenansprüche. Im Gegensatz dazu werden günstige klimatische Bedingungen benötigt. Zur Keimung braucht er Temperaturen von über  $9^{\circ}\text{C}$  und eine Wassersättigung von 40-80%. Dies sollte ab dem 20. April gegeben sein. Der Reihenabstand ist mit 60-80 cm optimal. Viel Wärme und Sonne wird während der vegetativen und generativen Phase (Mai bis September) benötigt. Da

---

<sup>4</sup>Befruchtung mit eigenem Pollen nicht möglich.

Mais als Körner-, Kolben- oder Silomais verwendet wird, richtet sich die Ernte nach seiner Verwertung. Körnermais sollte möglichst trocken sein. Silomais ist mit einem Trockenanteil von 38%, Kolbenmais mit 55% optimal gereift (Bachthaler, 1992).

### Die Fruchtfolgegestaltung

Eine sinnvolle Fruchtfolge ist ein wichtiger betriebswirtschaftlicher Faktor eines landwirtschaftlichen Betriebes. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die jeweils von den Faktoren Klima, Bodenart, Bewirtschaftungsart, Bedarf und Tradition abhängig sind. Die Fruchtfolgegestaltung hat folgende Aufgaben:

- Erhaltung und Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit
- Vorbeugung gegen Krankheiten und Schädlingsbefall
- Umweltschutz
- Kostenersparnis durch geringeren Aufwand

Im integrierten Pflanzenbau sind verschiedene Fruchtfolgen gängig. In Tabelle 2.4 sind exemplarische einige aufgeführt.

Name	Folge
Fruchtwechsel	Blattfrucht Halmfrucht
Doppelfruchtwechsel	Blattfrucht Blattfrucht Halmfrucht Halmfrucht
Verbesserte Dreifelderwirtschaft	Blattfrucht Halmfrucht Halmfrucht
Überfruchtwechsel	Blattfrucht Blattfrucht Halmfrucht
Körnerfruchtfolge	Blattfrucht Halmfrucht Halmfrucht Halmfrucht

*Tabelle 2.4: Einteilung von Feldfrüchten (Bachthaler, 1992)*

Eine Verwendung von Erkenntnissen der Fruchtfolge in der multitemporalen Klassifikation als Zusatzinformation ist schwierig. Langzeitbeobachtungen und Befragungen der Landwirte können jedoch ein Schema der Fruchtfolge in bestimmten Regionen liefern.

### 2.1.3 Reflexion, Absorption und Streuung

In der Fernerkundung wird zwischen zwei grundsätzlichen Systemen, den aktiven und passiven Aufnahmesystemen unterschieden. Zu den aktiven zählen das Radar und der Laserscanner. Sie senden selbst elektromagnetische Strahlung aus, die von der Erdoberfläche reflektiert und in einem Detektor des Systems registriert wird. Passive Aufnahmesysteme verwenden natürlich auftretende Strahlung. Warme Körper und künstliche Strahlungsquellen, wie z.B. Straßenlampen, emittieren elektromagnetische Strahlung. Hauptsächlich wird die Sonne als Strahlungsquelle genutzt.

Die Sonne emittiert ein weites Spektrum an elektromagnetischer Strahlung, deren Bestrahlungsstärke mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Die elektromagnetische Bestrahlungsstärke, auch Solarkonstante genannt, variiert zwischen 1,31 und 1,40  $KW/m^2$  je nach Abstand zwischen Sonne und Erde. Die Materie hat die Eigenschaft Strahlung zu absorbieren und wieder abzugeben. Die verschiedenen Wellenlängen werden von verschiedenen Atomen unterschiedlich absorbiert. Trifft die Strahlung auf die Atmosphäre der Erde, dessen Hauptbestandteile Stickstoff, Sauerstoff, Wasserdampf und Kohlendioxid sind, werden bestimmte Wellenlängenbereiche zum Teil oder ganz absorbiert und gestreut. In Abbildung 2.3 ist die Durchlässigkeit der Atmosphäre für einen breiten Wellenlängenbereich dargestellt. Andere Wellenlängenbereiche sind für passive Sensoren im Allgemeinen nicht nutzbar. Die Ausschnitte des Spektrums, in denen die Strahlung die Erdoberfläche

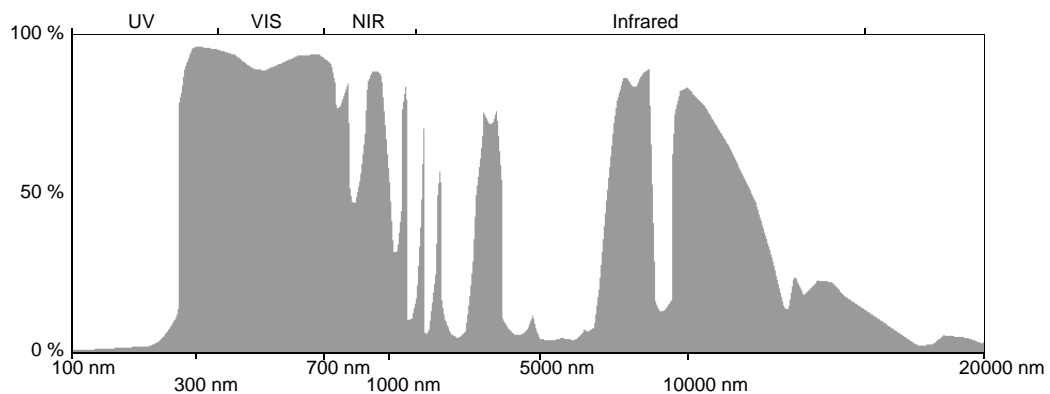


Abbildung 2.3: Durchlässigkeit der Atmosphäre „atmospheric window“ auf einer logarithmischen Skala

erreicht, werden atmosphärische Fenster genannt. Der sichtbare Bereich, im nachfolgenden VIS („Visible Light“) genannt, ist für das menschliche Auge wahrnehmbar. Der Nahinfrarotbereich (NIR) und Infrarotbereich wird in der Fernerkundung sehr häufig verwendet. Größere Wellenlängen werden zum Beispiel durch thermische Emissionen der Oberflächen hervorgerufen. Der elektromagnetische Strahlungsfluss  $\Phi_0$  trifft auf die Erdoberfläche, wo er zum Teil reflektiert  $\Phi_r$  und zum Teil absorbiert  $\Phi_a$ , sowie teilweise transmittiert  $\Phi_t$  wird. Somit gilt die Formel 2.1 der Strahlungsbilanz.

Strahlungsbilanz:

$$\Phi_0 = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t \quad (2.1)$$

Die Verteilung des reflektierten Strahlungsflusses kann entweder gerichtet oder diffus sein. Diffus kann noch weiter in vorwärts, rückwärts und indifferent („Lambertsche Reflexion“) unterteilt werden. Welche Art der Reflexion auftritt, ist von der Oberflächenstruktur, den Materialeigenschaften und von der inneren Struktur abhängig. Aus Untersuchungen von Deering (1992) geht hervor, daß Vegetation vorwärts diffus, Boden rückwärts diffus reflektiert. Die Reflexionsfunktion kann die Richtungsverteilung der einfallenden Strahlung beschreiben. Für weitere Informationen sei auf Kriebel (1976) verwiesen.

In der Fernerkundung wird jedoch die Bestrahlungsstärke  $E_B$  in der Bildebene des Aufnahmesystems gemessen. Die Abbildung 2.4 zeigt eine vereinfachte Aufnahmegeometrie. Das Gelände wird durch die Sonne unter einem bestimmten Zenitwinkel  $\Theta$  bestrahlt. Die unter dem Winkel  $\Theta$  einfallende Strahlstärke wird zum Teil reflektiert. Sie wird als spezifische Abstrahlung der Geländeoberfläche durch diffuse Reflexion ( $M_G$ ) bezeichnet. Das Aufnahmesystem empfängt dann die einfallende Bestrahlungsstärke  $E_B$ . Das Verhältnis zwischen Bestrahlungsstärke und spezifischer

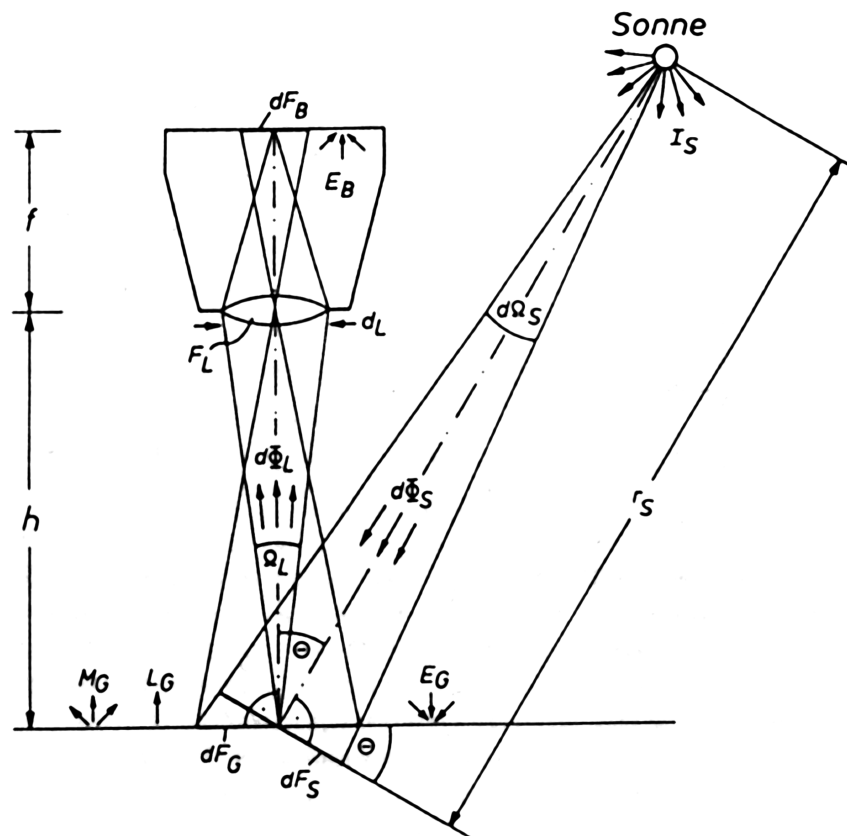


Abbildung 2.4: Aufnahmegeometrie eines photographischen Bildes

Abstrahlung der Oberfläche wird als Albedo  $p$  oder Reflexionsgrad bezeichnet.

Albedo:

$$p = \frac{M_G}{E_G} \quad (2.2)$$



Die Beziehung zwischen  $E_G$  und  $E_B$  für einen vollkommen diffusen Reflektor wird durch Formel 2.3 beschrieben.

$$E_B = \frac{d_L^2}{4f^2} \cdot E_G \cdot p \quad (2.3)$$

mit

- $E_B$  - Bestrahlungsstärke in der Bildebene
- $d_L$  - Blendendurchmesser
- $f$  - Brennweite der Kamera
- $E_G$  - Bestrahlungsstärke der Erdoberfläche
- $p$  - Albedo

Da im Normalfall keine Lambertsche Reflexion vorkommt, wird mit der gerichteten Strahldichte  $L_G(\Theta_r, \Phi_r)$  gerechnet. Der gerichtete Reflektionsgrad berechnet sich nach Formel 2.4.

$$p_r(\Theta_r, \Phi_r) = \frac{\pi \cdot L_G(\Theta_r, \Phi_r)}{E_G} \quad (2.4)$$

mit

- $\Theta_r$  - Meßzenitwinkel
- $\Phi_r$  - Meßazimutwinkel
- $L_G$  - Strahldichte in Richtung  $(\Theta_r, \Phi_r)$  in  $\frac{W}{m^2 sr}$
- $E_G$  - Bestrahlungsstärke in  $\frac{W}{m^2}$

Mit dem Aufnahmesystem wird die Strahlstärke eines Flächenelementes in der Bildebene gemessen. Dieses ist die Abbildung eines Flächenelementes der Erdoberfläche. Die Beziehung zur Strahldichte der Erdoberfläche berechnet sich nach der folgenden Formel.

$$E_B = \pi \cdot L_G \cdot \frac{d_L^2}{4f^2} \quad (2.5)$$

Zur Berechnung des Albedo müßte die einfallende Strahlungsstärke  $E_G$  gemessen werden. Im Normalfall ist das in der Fernerkundung nicht möglich. Diese einfache Modellbetrachtung beachtet nicht die Einflussgrößen Atmosphäre, Boden, Oberflächenstruktur und Hangneigung. Zum Vergleich siehe Kraus *et al.* (1990).

### 2.1.3.1 Reflexion am Boden

Um eine Differenzierung zwischen Boden- und Vegetationsreflexion vornehmen zu können, muss man wissen, wie die Reflexionseigenschaften des Bodens entstehen. Erde besteht aus verschiedenen Mineralien, organischen Anteilen und Wasser. Die Reflexionseigenschaften werden größtenteils von nachfolgenden Merkmalen bestimmt:

- Bodenfarbe
- Bodenfeuchtigkeit
- Oberflächenstruktur

Typische Reflexionsspektren verschiedener Böden sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

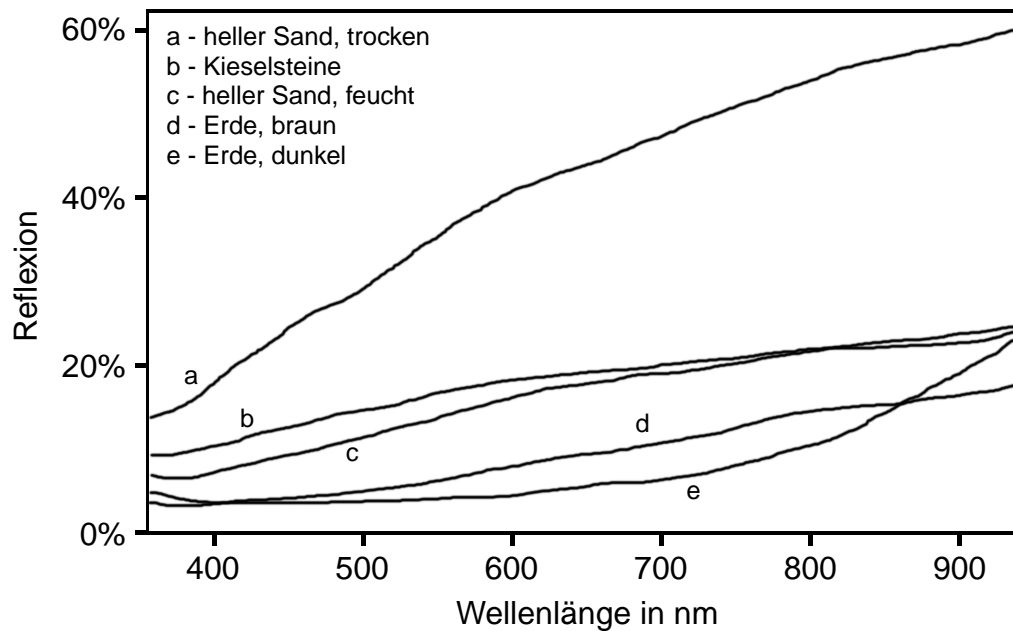


Abbildung 2.5: Typische Reflexionsspektren von Boden

Die Bodenfarbe wird durch die Zusammensetzung verschiedener Mineralien und organischen Anteilen bestimmt. Zum Beispiel ist eisenoxidhaltiger Boden rötlich. Je dunkler der Boden, desto niedriger ist sein Reflexionsvermögen.

Den größten Einfluss auf die Reflexion des Bodens hat das in ihm enthaltene Wasser. Die Bodenfeuchtigkeit ist von der Wasserspeicherfähigkeit, also der Mineralzusammensetzung und Teilchengröße abhängig. Schon das Abtrocknen der Oberfläche über den Tag hat eine Veränderung des Reflexionsgrades von über 30% zur Folge. Als Besonderheit treten die sogenannte Wasserabsorptionsbanden bei  $1,45 \mu\text{m}$ ,  $1,9 \mu\text{m}$  und  $2,5 \mu\text{m}$  auf. Hier nimmt mit steigendem Wassergehalt die Absorption stark zu. Bei einer Klassifikation der Bodenarten ist daher besonderes Augenmerk auf den momentanen Feuchtigkeitsgehalt zu legen.

Die Oberflächenstruktur ist von der Bearbeitungsart und der Verdichtung abhängig. Im optischen Bereich reflektieren glatte Böden stärker als rauhe, z.B. gepflügte, Böden. Bei multitemporalen Vergleichen des selben Feldes können nach Clevers (1991) die Bodenparameter auf Bodenanteil<sup>5</sup> und Bodenfeuchte reduziert werden.

<sup>5</sup>Bodenfläche, welche nicht von der Vegetation verdeckt wird

### 2.1.3.2 Reflexion an Pflanzen

Die spektrale Rückstrahlung von Pflanzen wird durch drei wesentliche Einflussfaktoren bestimmt.

1. phänologisch-physiologischer Zustand
2. Geometrie der Einstrahlungs- und Beobachtungsrichtung
3. atmosphärische Einflüsse

Um die Reflexionsvorgänge an Pflanzen genauestens analysieren zu können, ist die Kenntnis über den physiologischen Aufbau von Bedeutung. An dieser Stelle soll auf eine genauere Erleuterung verzichtet werden, da es den Umfang dieser Arbeit enorm vergrößern würde. Indessen sollen einige reflexionsbeeinflussende Faktoren beispielhaft genannt werden.

An haarigen und rauen Blattoberflächen (Stober, 1989) findet eine Abnahme der Reflexion im NIR statt. Wachstige Blätter reflektieren stärker über das ganze Spektrum. Im Inneren der Pflanze ist der Pigmentgehalt für die weitere Absorption verantwortlich. Chlorophyll A und Chlorophyll B sind bei grünen Pflanzen die bedeutendsten Pigmente. Sie sind für die Photosynthese zuständig und reagieren nur auf elektromagnetische Strahlung im VIS. Hier findet eine starke Absorption je nach Pigmentgehalt statt. Auffällig ist das lokale Maximum der Reflexion bei 560 nm (siehe Abbildung 3.1). In diesem Wellenlängenbereich ist die Absorption des Chlorophylls nicht ausgeprägt, was die grüne Farbe von Vegetation begründet. Damit ist ein direkter Zusammenhang der reflektierten Strahlung auf den Chlorophyllgehalt gegeben. Es kann somit auf die Pflanzenart, den Zustand und das Alter geschlossen werden. Weitere Pigmente, welche z.B. bei der Blüte entstehen, beeinflussen die Reflexion im VIS deutlich. Bei trockenen Pflanzenteilen, z.B. Holz, sind Absorptionsbande im nahen und mittleren Infrarotbereich zu beobachten. Weiterhin hat eine Zunahme der Zellgröße, und höhere Anzahl an Zellen, also stärkere Blattstärke, eine Zunahme im NIR zur Folge. (vgl. Schneider (1994))

Die Einstrahlungs- und Beobachtungsgeometrie des Aufnahmesystems beeinflusst die Reflexion dahingehend, welche Bestandteile der Pflanze direkt beschienen werden, was jedoch schwer analytisch zu beschreiben ist. Daher versucht man in der Fernerkundung Aufnahmen bei höherem Sonnenstand zu erhalten, um die Charakteristik der sonnenzugewandten Blattoberfläche zu erfassen. Problematisch ist hier die Aufnahmeorientierung, im Hinblick auf unebenes Gelände, wo die Hangneigung eine weitere wesentliche Einflussgröße darstellt. Kimes und Kirchner (1981) haben ein Modell entwickelt, mit dem die Bilddaten radiometrisch wegen Unebenheit des Geländes korrigiert werden können. Ebenso wirken sich atmosphärische Einflüsse grundsätzlich negativ auf die Interpretierbarkeit der Daten aus. Sie erhöhen das Rauschen und führen zu einer Verschleierung der spektralen Informationen. Wie Kapitel 2.1.2 zeigt, hat die zunehmende Entwicklung der Pflanze eine Veränderung der Struktur derselben zur Folge. Daraus ergibt sich ein unterschiedliches Reflexionsverhalten. Dies ist bei den Pflanzenarten in gewissen Grenzen verschieden und mit multitemporalen Aufnahmen deutlich zu machen. Weiterhin zeigt sich, dass Nährstoffmangel, Stress und klimatische Bedingungen indirekt das reflektierte Signal verändern können.

Um eine quantitative und qualitative Aussage über den Zustand des Bestandes treffen zu können, müssen einige Parameter bestimmt werden.

- Wuchshöhe
- Bodenbedeckungsgrad
- Reihenabstand
- Pflanzenschädigungen
- Bewässerung

Durch fernerkundliche Mittel sind diese Parameter jedoch nicht zu erfassen. Daher werden fernerkundlich erfassbare Eigenschaften der Oberfläche definiert:

- feuchte Biomasse
- trockene Biomasse
- Wassergehalt
- grüner Blattflächenindex (LAI)

(siehe Bach (1995))

Zur Bestimmung der Biomasse wird in der Fernerkundung häufig die Lage des Hauptwendepunktes<sup>6</sup> (HWP), auch Rotschulter genannt, verwendet. Die Position des Hauptwendepunktes bezeichnet der Übergang vom VIS in den NIR und korreliert mit allen allgemeinen Pflanzenparametern, die mit der Vitalität der Pflanze verbunden sind. Eine Näherungsformel 2.6 zur Berechnung wurde von Guyot und Baret (1991) gegeben.

$$HWP = 700 + 40 \cdot \frac{\left(\frac{R_{670} + R_{780}}{2}\right) - R_{700}}{R_{740} - R_{700}} \quad (2.6)$$

Um diesen Index verwenden zu können, müssen natürlich die entsprechenden Kanäle zur Verfügung stehen. Zusätzlich sollten die Bänder schmal genug sein (ca. 2-4 nm), um keine Verfälschung des Ergebnisses hervorzurufen. Weiterhin gibt es noch andere Ansätze zur Berechnung des Hauptwendepunktes.

Die Vitalität der Blattfläche wird im Allgemeinen durch den  $NDVI$ <sup>7</sup> dargestellt. Aus Untersuchungen (Bach (1995)) zeigte sich eine Korrelation von 0.98 zwischen diesen Parametern. Berechnet wird der NDVI nach folgender Formel 2.7.

$$NDVI = \frac{NIR - IR}{NIR + IR} \quad (2.7)$$

Da nahezu alle passiven, satellitengestützten Fernerkundungssysteme den Rot- und Nahinfrarotbereich erfassen, findet der NDVI weitgehende Anwendung.

<sup>6</sup>im Englischen - red edge

<sup>7</sup>Normalized Difference Vegetation Index

Der Wassergehalt hat entscheidende Bedeutung auf das Reflexionsvermögen der Pflanze. Er ist auch maßgeblicher Indikator für den Entwicklungsstand. So ist z.B. die Reifephase von Getreide durch eine starke Abnahme der Wasserkonzentration gekennzeichnet. Vegetationsspektren weisen bei  $1 \mu\text{m}$  eine Wasserabsorption auf, die bei feuchten Böden nicht zu Tage tritt. Es ist zu untersuchen, wie sich bei unterschiedlichen Pflanzen zu ihrem jeweiligen Entwicklungsstand die Reflexion bei  $1 \mu\text{m}$  verhält. Zu beachten ist, dass das Spektralband, in welchem dieses Merkmal auftritt, zwischen  $0,97$  und  $1,03 \mu\text{m}$  liegen muss.

## 2.2 Aufnahmesysteme

In dieser Arbeit wird Datenmaterial verwendet, welches von verschiedenen Aufnahmesystemen erfasst wurde. Diese sollen hier kurz in Bezug auf ihre Funktionsweise, technische Kenngrößen und Einsatzmöglichkeiten vorgestellt werden.

### 2.2.1 Feldspektrometer

Ein hochauflösendes Feldspektrometer wurde vom Institut für Biophysik der Universität Hannover entwickelt. Die spektrale Erfassung der Oberfläche erfolgt bei diesem Gerät durch jeweils einen Verlaufsinterferenzfilter im VIS und NIR, sowie durch 7 Einzelfilter im SWIR. Eine Filterscheibe wird mittels eines Präzisionsstrittmotors an einer Schlitzblende vorbeigedreht. Das eingefangenen Licht wird mit einem Si-Detektor im VIS und NIR und einer PbS-Photozelle im SWIR in elektrische Signale umgewandelt. Die Tabelle 2.5 zeigt die technische Daten.

Spektralbereich	400-2200 nm
Kanäle	58
Bandbreiten	VIS / 10nm
in den	NIR / 20nm
Wellenlängenbereichen	1200 / 35nm
	1300 / 39nm
	1530 / 74nm
	1650 / 81nm
	1800 / 101nm
	2000 / 62nm
	2200 / 123nm
Öffnungswinkel	15°
Detektoren	VIS,NIR / Si
	SWIR / PbS
Meßdauer	150-180s
Referenz	$BaSO_4$ zeitversetzt

Tabelle 2.5: Technische Daten der Feldspektrometers

Die Anwendung liegt in der Erfassung von Boden- und Vegetationsoberflächen durch statische Messungen. Das Spektrometer ist nicht als flugzeuggetragenes System ausgelegt.

### 2.2.2 Daedalusscanner

Dieser flugzeuggetragene Scanner, auch „Airborne Thematic Mapper“ genannt, ist ein opto-mechanischer Zeilenabtaster, der aus einem Spiegelabtastsystem und einem Spektrometer besteht. Ein quer zur Flugrichtung beweglicher Spiegel tastet das Gelände in Verbindung mit einer Aufnahmoptik zeilenförmig ab. Die Abbildungsgeometrie wird bestimmt durch das momentane Gesichtsfeld (IFOV), den Scanwinkel (FOV), die Flughöhe und die Flugzeugneigungen.

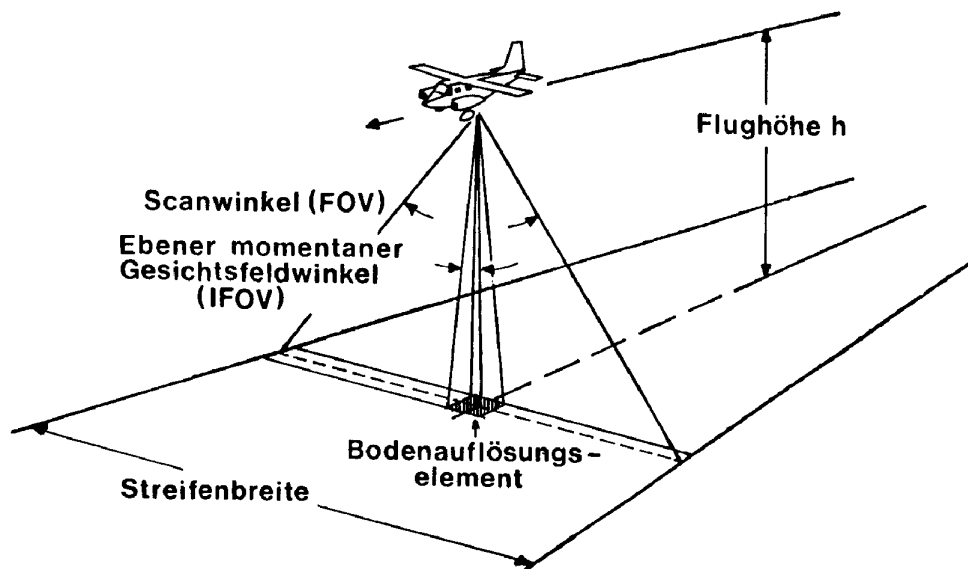


Abbildung 2.6: Bildfluggeometrie (Landauer und Voß, 1989)

Die Abbildung 2.6 zeigt die Geometrie einer Befliegung. Es ist zu erkennen, dass eine größere Flughöhe zu einer größeren Streifenbreite, sowie einer schlechteren Auflösung führt.

Die Tabelle 2.6 zeigt die bauartbedingten, geometrischen Eigenschaften des Daedalusscanners:

Mit Hilfe des Spektrometers wird die augenblicklich empfangene Strahlung in die verschiedenen Wellenlängenbereiche (Kanäle) unterteilt. Dies geschieht mit 3 dichroitischen Filtern, die das sichtbare Licht, Infrarot, mittleres Infrarot und thermisches Infrarot trennen. Diese 4 Bänder werden entsprechenden Detektoren zugeführt. Um eine weitere Bänderengung vornehmen zu können, sind vor diesen noch Bandpassfilter angebracht. Die Halbleiterdetektoren müssen mit flüssigem Stickstoff (77 Kelvin) gekühlt werden, um ein einwandfreies Arbeiten zu gewährleisten.

Aufnahmemodus	Weitwinkel	Normalwinkel
Scanwinkel	85.92	42.96
Streifenbreite (h=1000 m)	1860 m	787 m
Ebener momentaner Gesichtsfeldwinkel	2.5 mrad	1.25 mrad
Bodenauflösungselement im Fußpunkt (h=1000 m)	2.5 mal 2.5 m <sup>2</sup>	1.25 mal 1.25 m <sup>2</sup>
Zahl der Auflösungselemente pro Zeile	716	716
Rollwinkelausgleich	15°	15°
Scanrate [Zeilen/s]	12.5/25/50/100	12.5/25/50

*Tabelle 2.6: Geometrische Eigenschaften des Daedalusscanners*

Der Scanner besitzt die folgenden 11 Kanäle, welche in der Tabelle 2.7 dargestellt sind.

Kanal- Nummer	Wellenlängenbereich [nm]
1	420 - 450
2	450 - 520
3	520 - 600
4	605 - 625
5	630 - 690
6	695 - 750
7	760 - 900
8	910 - 1050
9	1550 - 1750
10	2080 - 2350
11	8500 - 13000

*Tabelle 2.7: Kanäle des Daedalusscanners*

Der Scanner wird hauptsächlich zur Datenaquisition in der Land- und Forstwirtschaft, Hydrologie, im Tagebau und zur kleinräumigen Kartierung verwendet.

### 2.2.3 Satellitensystem von RapidEye

Zur Zeit sind eine Reihe von Erderkundungssatelliten in verschiedenen Umlaufbahnen der Erde im Einsatz. Durch die rasante technologische Entwicklung sind manche Systeme in ihrer Auflösung, Übertragungsfähigkeit der Daten, Stabilität und zeitlichen Überdeckung veraltet. Neuere Systeme, wie die SpaceImaging-Satelliten, sind sehr teuer und liefern nicht die gewünschte zeitliche Überdeckung zu einem akzeptablen Preis. Daher hat sich die Firma RapidEye entschlossen, ein eigenes Satellitensystem zu betreiben.

Auf der Basis der von der Firma Surrey Satellite Technology Limited (SSTL) ent-

wickelten *Small Satellite Technology* Plattform sollen 4 Satelliten mit Kamera- und Kommunikationssystem in die Erdumlaufbahn gebracht werden. Es wurde eine sonnensynchrone Umlaufbahn mit den in der Tabelle 2.8 beschriebenen Parametern gewählt.

Umläufe pro Tag	14.89
Maximaler Sonnenschatten	35.5 min
Geschwindigkeit auf der Kreisbahn	7.558 km/s
Geschwindigkeit auf der Oberfläche	6.908 km/s
Horizonthöhe	2831 km
Auflösung im Nadir	6.5 m
Flughöhe	600 km
Inklination	97.79°
Exzentrizität	0°
Dauer eines Umlaufes	5801.24 s oder 96.69 min

Tabelle 2.8: Parameter und Orbitdaten des zukünftigen Satellitensystems der Firma *RapidEye*

Geplant wird für jeden Satelliten ein Aufnahmesystem mit 3 Kanälen im VIS, 2 Kanälen im NIR und einem panchromatischen Kanal.

## 2.3 Verwendete Programme

### 2.3.1 ERDAS IMAGINE 8.3 und 8.4

ERDAS IMAGINE ist ein Programm zur Visualisierung und Analyse geographischer Daten. In der Fernerkundung und Bearbeitung von Raster-GIS stellt ERDAS einen gewissen Standard dar. Es steht für die Systeme Windows NT und Unix zur Verfügung. Eine große Anzahl an Funktionen zur Raster und Vektorbearbeitung sind in das System integriert. Der große Funktionsumfang lässt vielfältige Möglichkeiten zu. Für diese Arbeit werden hauptsächlich die Funktionen der Bildverarbeitung, Klassifizierung, Basisfunktionen und der Modellmaker verwendet. Es wird *Area of Interests* (AOI) zur Markierung von Bildausschnitten benutzt. Die Subset-Funktion steht zur Separation von einzelnen oder mehreren Kanälen zur Verfügung. Mit dem Modellmaker wird die Funktion zur Berechnung des NDVI für das gesamte Bild erstellt. Mit den Funktionen zur unüberwachten Klassifikation wird gearbeitet und mit dem Expert-Classifier wird zur Modellerstellung verwendet.



### 2.3.2 GNUPLOT

GNUPLOT ist ein unter der GNU Public License stehendes, freies Visualisierungsprogramm. Es erlaubt beliebige Datensätze als Diagramme darzustellen.

Die Steuerung erfolgt interaktiv über Kommandozeileneingabe oder mit verschiedenen Verarbeitungsscripten, die Befehlsfolgen des Programmes enthalten. Damit können vielfältige Anpassungen der Diagramme vorgenommen werden. So sind 3D - Darstellung, Balkendiagramme und Liniendiagramme genauso möglich wie die Beschriftung der Achsen, Titeleinblendung und Legende.

# Kapitel 3

## Datenmaterial und Aufbereitung

Zur Untersuchung der Aufgabe stehen zwei Datensätze zu Verfügung. In diesem Kapitel soll die Datenakquisition und deren Weiterverarbeitung beschrieben werden. Außerdem sind aufgrund der Vergleichbarkeit der Datensätze einige Anpassungen vorgenommen worden, die hier beschrieben werden.

### 3.1 Vergleichsdaten

In der Dissertation von Dr. Schneider wurden spektrometrische Aufnahmen von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen auf einem Bauernhof in Garching (Bayern) 1990 und 1991 durchgeführt. Er hat über einen Zeitraum von einem Jahr Reflexions-signaturen (Spektren) mit dem in Hannover entwickelten Feldspektrometer (siehe Kapitel 2.2.1) gemessen. Diese Signaturen dienen im Nachfolgenden zum Vergleich mit Daedalusscanneraufnahmen der Firma RapidEye.

#### 3.1.1 Datenaufnahme

Die Messungen sollten im Zeitraum von Mitte März bis Ende September alle 10 bis 14 Tage durchgeführt werden. Aufgrund der ungünstigen Wetterlage konnten die Messungen in den Monaten März bis Juni so nicht eingehalten werden. Wegen der Veränderung der Einstrahlungsverhältnisse durch den Sonnenstand wurde nur in der Zeitspanne von 2 Stunden vor und 2 Stunden nach dem Sonnenhöchststand gearbeitet. Das Messsystem bestand aus einer, an einem Dachgepäckträger eines VW Busses montierten, 12 m langen Schiebeleiter. Diese wurde durch Verspannungen stabilisiert, um ein schnelles Wechseln der Position zu ermöglichen. Am oberen Ende des „Auslegers“ wurde das Spektrometer in einer Höhe von 10 m über dem Grund angebracht. Die Objektivöffnung zeigt in Nadirrichtung. Eine  $BaSO_4$ -Platte<sup>1</sup> wurde nach jeder Aufnahmeserie gemessen, um die einfallende Strahlung auf die Erdoberfläche zu erhalten. Dazu war vor dem Spektrometer eine Vorrichtung angebracht, die diese Platte vor das Spektrometer transportiert. Die

---

<sup>1</sup>nahezu optimaler, diffuser Reflektor

Dauer einer Messung betrug einschließlich des Positionswechsels 6-7 Minuten. Weiterhin war die Speicherkapazität des Aufnahmegerätes begrenzt. Dadurch wurde eine Sicherung von 22 Messungen auf Kassette notwendig, was in etwa 10 Minuten in Anspruch nahm. Eine statistische Absicherung der Messergebnisse kann nur über eine genügend große Anzahl der Messungen erfolgen. Durch das enge Zeitfenster und unerwarteten Problemen wurde die Anzahl jedoch limitiert. Die Messfläche stellt sich als Kreis dar und berechnet sich nach den Formeln 3.1 und 3.2

$$d = \tan\left(\frac{15^\circ}{2}\right) \cdot 10\text{m} \quad (3.1)$$

$$F = \Pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (3.2)$$

Daraus ergibt sich eine Fläche von  $5.4 \text{ m}^2$ . Dies entspricht in etwa der Auflösung der Bilddaten von RapidEye. Mit der Messung der Strahlstärke der Oberfläche und der Strahlstärke der Platte wurden Reflexionsfaktoren (Albedo) mit der Formel 2.2 berechnet.

Im Testgebiet wurden folgende Arten beobachtet:

- Sommergerste (Sorte „Cherie“)
- Wintergerste (Sorte „Danilo“)
- Winterroggen (Sorte „Danko“)
- Winterweizen (Sorte „Urban“)
- Ackerbohne (Sorte „Alfred“)
- Raps (Sorte „Liborius“)
- Mais (Sorte „Avisto“)

Da die Spektralsignaturen als Vergleich zur Auswertung der Bilddaten der Daedalusscannerbefliegung dienen soll, müssen die beobachteten Nutzpflanzen mit denen im Testgebiet Sachsen-Anhalt übereinstimmen. Aus diesem Grund werden die Spektren von Wintergerste, Winterroggen, Winterweizen, Raps und Mais zur weiteren Verwendung herangezogen. Ackerbohne und Sommergerste sind in den Bildern nur im geringen Maße vertreten und werden nicht weiter betrachtet. Weiterhin wurden Zusatzinformationen zu jeder Aufnahme protokolliert. Hierzu zählen Messhöhe, Messzeit und Datum, Bewölkung, Schädigungen, Bodenanteil und Entwicklungsstadium im EC-Code (Kapitel 2.1.1). Diese können zur Beurteilung der Aufnahmen herangezogen werden.

### 3.1.2 Spektralbandumwandlung

Die Messung von Reflexionen findet aus messtechnischen Gründen über einem Frequenzband und nicht für eine diskrete Frequenz statt. Das bedeutet, der Sensor

integriert die einfallende Energiemenge verschiedener Frequenzen. Wie im Kapitel 2.2.1 gezeigt wird, beträgt die Bandbreite im VIS und NIR 10 nm. Damit muss eine Anpassung der Werte auf die Bandbreiten des Daedalusscanners vorgenommen werden, um die entsprechenden Kanäle vergleichen zu können. Hier werden nur die 5 Kanäle, die im Satellitensystem eingesetzt werden sollen, verwendet. Die Tabelle 3.1 zeigt die zusammengefassten Bänder.

Daedalus Kanal	Band [nm]	Bänder [nm] Feldspektrometer
2	465-520	470,480,490,500,510,520
3	522-600	520,530,540,550,560,570,580,590,600
5	626-691	630,640,650,660,670,680,690
6	692-759	690,700,720,740,760
7	756-906	760,780,800,820,840,860,880,900

Tabelle 3.1: Umwandlung der Spektralkanäle

In den Daten von Dr. Schneider waren zu jeder Messung eines Feldstückes die Reflexionsfaktoren in allen Kanälen vorhanden. Nach dem Beispiel in der Tabelle 3.2 werden Mittelwerte (MW) aus den entsprechenden Bändern für die 5 Daedaluskanäle gebildet. Von einem Tag und einer Pflanzenart liegen mehrere Messungen vor. Aus den errechneten Mittelwerten werden wiederum Mittelwerte gebildet und zusätzlich die Standardabweichung (STD) und Varianz berechnet.

Beispiel (31.05. Mais):

Band [nm]	Messung 1 [%]	Messung 2 [%]	Messung 3 [%]	Messung 4 [%]			
630	0.19862	0.18409	0.18113	0.18366			
640	0.20092	0.18536	0.18408	0.18665			
650	0.20418	0.18837	0.18535	0.18924			
660	0.20655	0.19143	0.18837	0.191			
670	0.20942	0.1941	0.19098	0.19409			
680	0.21233	0.19679	0.19544	0.1968			
690	0.21929	0.20184	0.19999	0.20231			
626-691	0.20733	0.19171	0.18933	0.19196	MW	STD	Varianz
					0.19508	0.00825	0.04228

Tabelle 3.2: Berechnung der umgewandelten Kanäle am Beispiel von Mais zum Aufnahmezeitpunkt 31.05.

Nach diesem Muster werden für alle zu untersuchenden Pflanzen die Werte der entsprechenden Kanäle umgerechnet. Zusätzlich wurde der NDVI nach Formel 2.7 berechnet. Die Spektralbandverbreiterung stellt durch ihre Mittelwertbildung eine Glättung und somit einen Informationsverlust dar. In Abbildung 3.1 und 3.2 sind die Signaturen von Winterweizen vom 1. Juni vor und nach der Spektralbandumwandlung dargestellt.

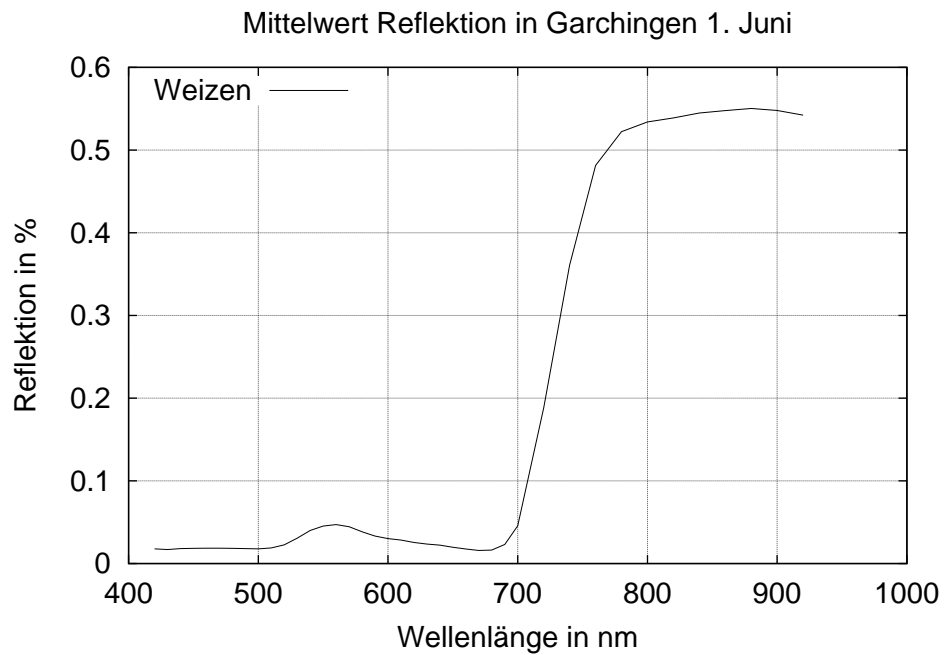


Abbildung 3.1: Winterweizen vor der Umwandlung

In Abbildung 3.1 ist der Verlauf des Spektrums von 420 nm bis 920 nm von Weizen dargestellt. Gut erkennbar ist das lokale Maximum bei 560 nm. Bei 700 nm ist der Beginn der Rotschulter zusehen, der bei 780 nm endet. Danach folgt die erhöhte Reflexion im Nahinfrarotbereich.

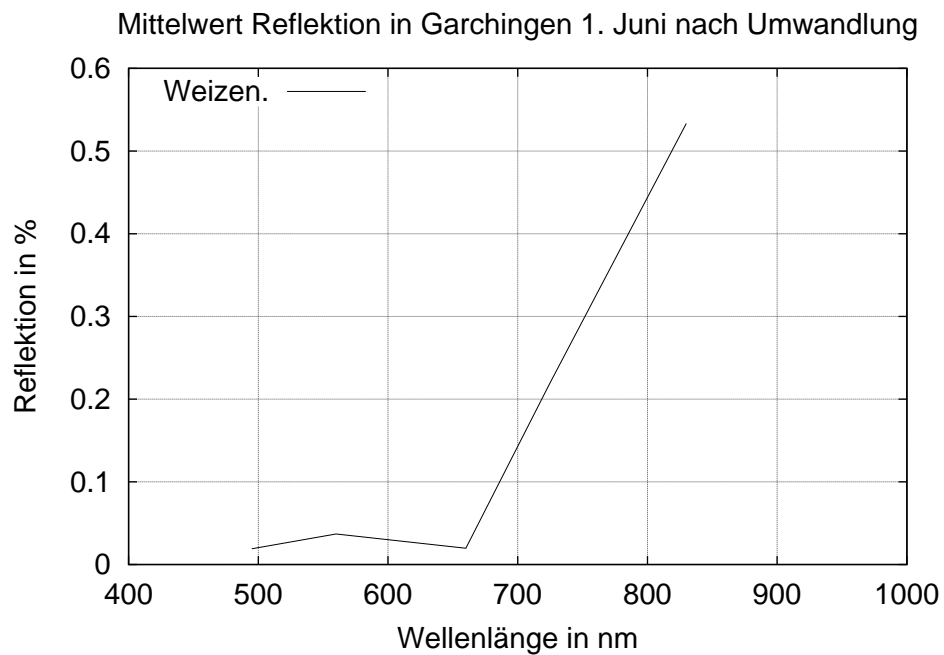


Abbildung 3.2: Winterweizen nach der Umwandlung

Abbildung 3.2 zeigt das angepasste Spektrum von Weizen. Die erhöhte Reflexion im Grünbereich ist auch hier deutlich zu erkennen. Die Rotschulter beginnt jetzt aber schon bei 660 nm, das die Folge des Informationsverlustes ist. Somit sollte bei der weiteren Analyse die Lage der Rotschulter als Kriterium nicht verwendet werden.

## 3.2 Bilddaten

### 3.2.1 Daedalusscannerbefliegung

Die Firma RapidEye benötigte Bilddaten zur Überprüfung ihres eigenen Klassifizierungsmodells. Da die Satelliten erst im Jahre 2002/2003 in den Orbit gebracht werden, musste gleichwertiges Bildmaterial für die entsprechenden Kanäle erzeugt werden. Daher wurde ein Flugzeuggetragener Daedalusscanner zur Datenaufnahme verwendet, da dieser die entsprechenden Kanäle beinhaltet. Auf landwirtschaftlichen Flächen eines Bauernhofes in Wulfen/Baasdorf (Sachsen-Anhalt) wurden Befliegungen zum 27. April, 11. Mai, 9. Juni und 1. August 2000 durchgeführt. Die Zeitpunkte wurden so gewählt, um Aufnahmen zu pflanzentypischen Entwicklungszeitpunkten zu erhalten.

Im Flugzeug waren der Daedalusscanner zur Bildaufnahme und ein CCNS (Computer Controlled Navigation System) zur Positions- und Lagebestimmung integriert. Letzteres ist insofern wichtig, um mit der Lage und den Neigungswinkeln eine korrekte Georeferenzierung zu ermöglichen (siehe Kapitel 2.2.2). Mit 5 Flugstreifen und einer Überdeckung von ca. 30% konnten die gesamten Referenzflächen befliegen werden. Beflogen wurde zu allen 4 Zeitpunkten zwischen 11 und 12 Uhr, um möglichst gleichbleibende Strahlungsverhältnisse zu erhalten.

Weiterhin wurden die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit gemessen. Zum Vergleich wurden die Schlaggrenzen mittels GPS eingemessen und die Fruchtarten mit entsprechenden Parametern (Bodenfeuchte, Zustand, Bodenart etc.) notiert. Diese Informationen wurden mit ARCINFO (GIS-System) in Geometrie- und Datenbankdateien integriert.

### 3.2.2 Kalibrierung, radiometrische Korrektion und Georeferenzierung

Die mit dem Daedalusscanner gewonnenen Werte, es handelt sich um Strahlstärken, mussten in der weiteren Prozessierung wegen unterschiedlicher Fehlereinflüsse korrigiert werden. Weiterhin wurden diese korrigierten Daten auf eine Referenzfläche gerechnet (Georeferenzierung), dabei radiometrisch angepasst und die 5 Bildstreifen zusammengefügt. Nachfolgender Ablauf wurde bei dem verwendeten Datenmaterial durch das *Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt* und der Firma *Joanneum Research* in Graz durchgeführt.

### Systemkorrekturen

Korrektur von Störzeilen: Automatische und manuelle Detektion von gestörten Bildzeilen und Interpolation der gestörten Pixelwerte in eine Zeile mittels kubischer Splines. Bei häufigen Störzeilen kann dies zur Unschärfe des Bildbereiches führen.

Korrektur der blickwinkelabhängigen Empfindlichkeit der Kanäle: Eine blickwinkelabhängige Empfindlichkeit des Sensors wurde im Vorfeld durch eine Labormessung bestimmt. Daraus ergaben sich Kalibrierwerte, die an die gemessenen Werte angebracht wurden.

### Radiometrische Korrekturen

Kalibrierung der Rohdaten im reflektierten Wellenlängenbereich: Die Kalibrierung des Scanners wurde im Labor vorgenommen. Es wurden Dunkelstromwerte, sowie Kalibrierfaktoren für die Absolutkalibrierung ermittelt. So konnte eine absolute Genauigkeit von 5-10% erreicht werden.

### Radiometrische Normierung

Durch die Panoramaverzerrung ist eine radiometrische Korrektur notwendig, die sich durch die unterschiedlichen Flächengrößen eines Pixels im Objektraum bei unterschiedlichen Aufnahmewinkeln ergibt. Dazu wurden zwei empirische Methoden eingesetzt.

1. additive Normierung
2. objektabhängige, lineare Normierung

Bei der additiven Normierung werden in den Kanälen Polynome 2. und 3. Grades empirisch ermittelt, die für alle Objekte die mittlere blickwinkelabhängige Funktion der Helligkeitswerte beschreibt. Sie dient der additiven Anpassung der Pixelwerte an den Nadir.

Bei der objektabhängigen linearen Normierung werden für Objekte Polynome 2. und 3. Grades ermittelt. Durch Regression wird ein linearer Zusammenhang zwischen der Helligkeit der Objekte im Nadir zu den unter verschiedenen Blickwinkeln hergestellt. Dieses Verfahren erfordert jedoch eine manuelle Bestimmung von gleichen Objekten über den gesamten Scanwinkelbereich, und somit Vorabwissen über die Oberflächenbeschaffenheit. Es ist deshalb nicht sehr praktikabel.

### Geometrische Bearbeitung

Aufbereitung der Fluglage- und Positionsdaten: Jeder Bildzeile werden 6 Parameter der äußeren Orientierung zugeordnet. Da die Scanfrequenz deutlich höher als die Aufnahme der Lage- und Positionsdaten ist, wurden für jede Scanzeile Werte linear interpoliert. Ellipsoidhöhen wurden auf Geoidhöhen umgerechnet.

Geokodierung der Bildstreifen: Für die Entzerrung wurde kein digitales Höhenmodell verwendet, da ein nahezu ebenes Gelände vorlag. Deshalb konnte mit einer mittleren Geländehöhe gerechnet werden. Die geometrische Korrektur erfolgte mit der sogenannten *parametrischen Methode* unter Verwendung der Kolinearitätsgleichungen

und dem Modell eines idealen Scanners für die innere Orientierung. Die Projektion und das Datum wurden als UTM (WGS84) mit Potsdamer Datum festgelegt.

Erstellung eines Bildstreifenverbundes (Mosaicking): Die einzelnen Bildstreifen wurden über manuell definierte Schnittkanten (Straßen, Feldgrenzen, etc..) geometrisch aneinandergesetzt. Durch die unterschiedlichen Sensor-Objekt-Sonne Geometrien in den Überlappungsbereichen können identische Punkte unterschiedliche Helligkeitswerte annehmen. Eine Möglichkeit zur radiometrischen Anpassung ist gegeben, wurde aber **nicht** durchgeführt.

Die Strahlstärken wurden jetzt noch in Strahldichten an der Erdoberfläche umgerechnet. Dies muß mit der Beziehung, wie sie in Formel 2.5 beschrieben wurde, geschehen sein. Leider konnte hierzu nichts genaueres in Erfahrung gebracht werden. Das Ergebnis sind geokodierte Luftbilder mit je 11 Kanälen zu 4 verschiedenen Zeitpunkten.

### 3.2.3 Extraktion von Signaturkurven

Die Extraktion der Signaturkurven aus den Bildern ist nur mittels der zusätzlichen Oberflächendaten möglich. Diese liegen als ArcView-Shape-Files und damit verknüpften digitale Tabellen vor. Die Vektordaten beinhalten die Schlaggrenzen (mit GPS eingemessen), die Tabellen die Anbaufrucht, Flächengröße etc.

Da das zukünftige Satellitensystem die Kanäle 2, 3, 5, 6 und 7 des Daedalusscanners verwenden wird, war eine Reduktion der Bilddaten auf diese Kanäle sinnvoll. Dies wurde mit der in ERDAS integrierten Funktion „Subset“ durchgeführt.

Für die einzelnen Fruchtarten wurden nun in ERDAS die entsprechenden Schläge mit dem Operator AOI markiert. Die Übernahme der Schlaggrenzen mit den Vektordaten in den Shapefiles war nicht praktikabel, da an den Schlagrändern ein Mischsignal aus der Signatur der Fruchtart und dem sogenannten „Knick“ (Gräben, Bäume, Straßen) zu Verfälschungen der zu extrahierenden Signaturen geführt hätte. Daraufhin konnten die Mittelwerte und Standardabweichungen für die markierten Bereiche in allen Kanälen für alle Fruchtarten berechnet werden. Da die Bilddaten nicht die absoluten Strahldichten widerspiegeln, mussten die Mittelwerte aller Kanäle korrigiert werden. Dazu lagen die Kalibrierfaktoren aus der Prozessierung der **radiometrischen Korrektur** vor.

Kanal	Tag 117	Tag 131	Tag 160	Tag 213
2	0,228	0,477	0,477	0,241
3	0,438	0,445	0,445	0,445
5	0,509	0,514	0,514	0,516
6	0,530	0,535	0,535	0,537
7	0,808	0,813	0,813	0,815

*Tabelle 3.3: Faktoren zur Absolutkalibrierung*

Die Mittelwerte und Standardabweichungen wurden mit den entsprechenden Faktoren in der Tabelle 3.3 multipliziert. Diese Daten liegen jetzt als Excel-Datei vor.



Daraus kann auch hier der NDVI gerechnet werden.

Die Umrechnung der Strahldichten auf Reflexionsfaktoren, wie im Datensatz von Dr. Schneider, war nicht möglich, da die Strahldichten der einfallenden Strahlung nicht gemessen wurde. Für die im Kapitel 4 durchgeführte Trennbarkeitsanalyse hat dies aber keinen Einfluß, da nur die relativen Beziehungen der Reflexionswerte zwischen den unterschiedlichen Pflanzen von Interesse sind.

# Kapitel 4

## Trennbarkeitsanalyse

Um ein Modell zur überwachten Klassifizierung aufstellen zu können, müssen Kriterien zur Trennung der unterschiedlichen Oberflächen bekannt sein. Diesen Ansatz verfolgte Dr. Schneider in seiner Dissertation. In Anlehnung an diese Arbeit wird auch in diesem Kapitel so vorgegangen. Es werden reflexionsspezifische Charakteristiken, die sich ausreichend abzeichnen, gesucht und anschließend in ein Modell mit dem Expert-Classifier implementiert. Dazu werden die weiterverarbeiteten Daten der Dissertation, wie in Abschnitt 3.1.2 erläutert, nochmals auf ihre Trennbarkeit analysiert. Die daraus entstehenden Ergebnisse dienen zur Verifizierung der Trennbarkeitsanalyse mit den Bilddaten. Soweit dies möglich ist, werden die im Vergleich übereinstimmenden Merkmale für das Modell verwendet.

### 4.1 Multitemporaler Ansatz

Unter „Multitemporal“ versteht man die Verwendung von mehreren Luft- oder Satellitenbildern der selben Oberfläche zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die sich in ihrer Entwicklung verändernde Vegetation reflektiert über die phänologischen Stadien in unterschiedlichem Maße. Vegetationsdauer und Zeitpunkte der wesentlichen Veränderungen tragen als Kriterium zur klassifizierenden Oberflächenart bei. Aufnahmezeitpunkte, in denen spektrale Trennungen möglich sind, stellen eine wesentliche Voraussetzung für optimale Klassifikationsergebnisse dar.

### 4.2 Vergleichsdaten

An dieser Stelle wird auf die Trennbarkeit mit Hilfe der Daten der Dissertation von Dr. Schneider eingegangen. Die von ihm durchgeführte Trennbarkeitsanalyse kann hier nicht übernommen werden, da wesentliche Informationen durch die Spektralbandumwandlung verlorengegangen sind. Daher muss die Analyse nochmals unabhängig durchgeführt werden. Dabei soll die Untersuchung auf die Nutzpflanzen *Winterweizen*, *Wintergerste*, *Winterroggen*, *Winterraps* und *Mais* beschränkt werden, da diese Oberflächen auch in den Bilddaten wiederzufinden sind, was einen späteren Vergleich erlaubt.

### 4.2.1 EC Stadien und Vergleichszeitpunkte

Als Erstes sollen die Entwicklungsstadien der beobachteten Pflanzen in ihrem zeitlichen Verlauf betrachtet werden. In der Abbildung 4.1 sind zu den entsprechenden Zeitpunkten der Aufnahmen in Garching der EC-Code des Stadiums der Pflanzen dargestellt. Ersichtlich ist, dass überwinterte Pflanzen mit einem fortgeschrittenen Stadium beginnen. Auch der Entwicklungsvorsprung von Raps im Frühjahr vor den Getreidesorten ist zu erkennen. Weizen entwickelt sich langsamer als Gerste und Roggen. Bei Mais wird der späte Saatzeitpunkt deutlich.

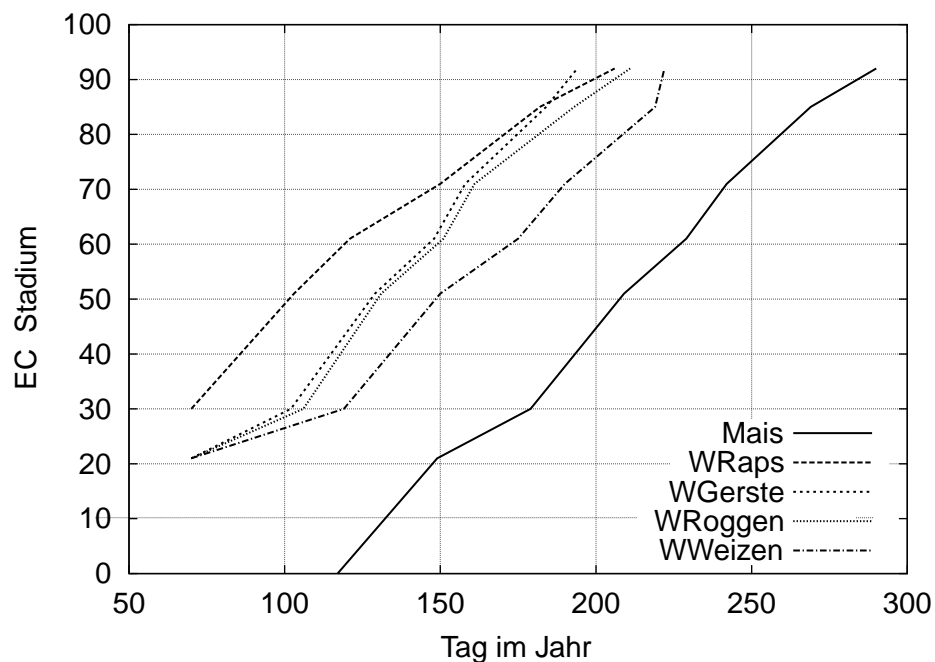


Abbildung 4.1: EC-Stadien der Pflanzen in Garching

Das zugrundeliegende Datenmaterial wurde als Zusatzinformation während der Aufnahmen protokolliert. Das Stadium wurde durch die Begutachtung des Bauern ermittelt.

Im nächsten Schritt ist die spektrale Trennung zu den einzelnen Zeitpunkten zu prüfen. Durch den begrenzten Zeitrahmen beim Aufnahmevorgang konnten nicht alle Arten zu ein und demselben Tag gemacht werden. In Abstimmung mit den vier Zeitpunkten der Daedalusscannerbefliegung vom 27. April (Tag 117), 11. Mai (Tag 131), 9. Juni (Tag 160) und 1. August (Tag 213) müssen äquivalente Zeitpunkte in den Vergleichsdaten gefunden werden. Dabei ist darauf zu achten, dass für alle fünf Pflanzenarten Beobachtungen heranzuziehen sind, was jedoch **nicht** möglich ist. So liegt nur genügend Datenmaterial für die Tage 117, 160 und 213, welches nur um wenige Tage abweicht, vor. Auf die Analyse des Tages 131 muss deshalb verzichtet werden.

Tabelle 4.1 gibt die entsprechenden Vergleichszeitpunkte wieder. Wie ersichtlich ist, sind die Aufnahmezeitpunkte der Vergleichsdaten für den Tag 160 um 5-9 Tage zu

---

Pflanze	Tag 117	Tag 160	Tag 213
Winterroggen	121	151	215
Winterweizen	121	155	215
Winterraps	120	151	206
Wintergerste	121	155	196
Mais	-	151	219

*Tabelle 4.1: Vergleichszeitpunkte zu den Bildaufnahmen*

früh. Das dürfte aber in Hinblick auf Schwankungen bei Klima, Aussaatzeitpunkt und Pflege nicht stark ins Gewicht fallen. Abweichungen zum Tag 213 sind nahezu irrelevant, da zu diesem Zeitpunkt die Getreidesorten und der Raps schon abgeerntet waren.

## 4.2.2 Analyse

Hier werden anhand der Spektralsignaturen mit zugehörigen Standardabweichungen zu den genannten Zeitpunkten die Trennbarkeiten untersucht. Zu jedem der 3 betrachteten Tage sind die entsprechenden Abbildungen 4.2 - 4.4 dargestellt. Die NDVI sind in der Abbildung 4.5 visualisiert. Durch Vergleiche werden dabei folgende Schlüsse gezogen:

- Tag 117:** Mais war zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorhanden. Es kann im Allgemeinen ein Bodensignal angenommen werden, da der Boden für die Aussaat vorbereitet sein sollte. In den Kanälen 495 nm, 560 nm und 660 nm können die Klasse Raps, Roggen von Gerste, Weizen getrennt werden. Die spektrale Differenz ist jedoch sehr gering und somit nicht gut geeignet. Raps zeichnet sich, wie in Abbildung 4.1 ersichtlich, durch seinen Entwicklungsvorsprung aus. Damit erreicht er eine größere Biomasse und Bodenüberdeckung, was zu einem höheren Reflexionssignal im NIR führt, das in Abbildung 4.2 ersichtlich ist. Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben ist, entwickelt sich die Gerste bei ungünstigeren Bedingungen besser als Weizen. Damit ist wahrscheinlich das leicht höhere Signal bei 725 nm und 830 nm zu erklären. Die Trennung des Weizens von der Gerste kann jedoch nur bei 725 nm erfolgen. Eine Separation des Roggens von Gerste und Weizen ist durch die erhöhte Standardabweichung nicht möglich. Bei der Betrachtung des NDVI zeigt der Roggen einen deutlich kleineren Wert im Vergleich zu den anderen Pflanzen. Hier ist eine Trennung möglich.

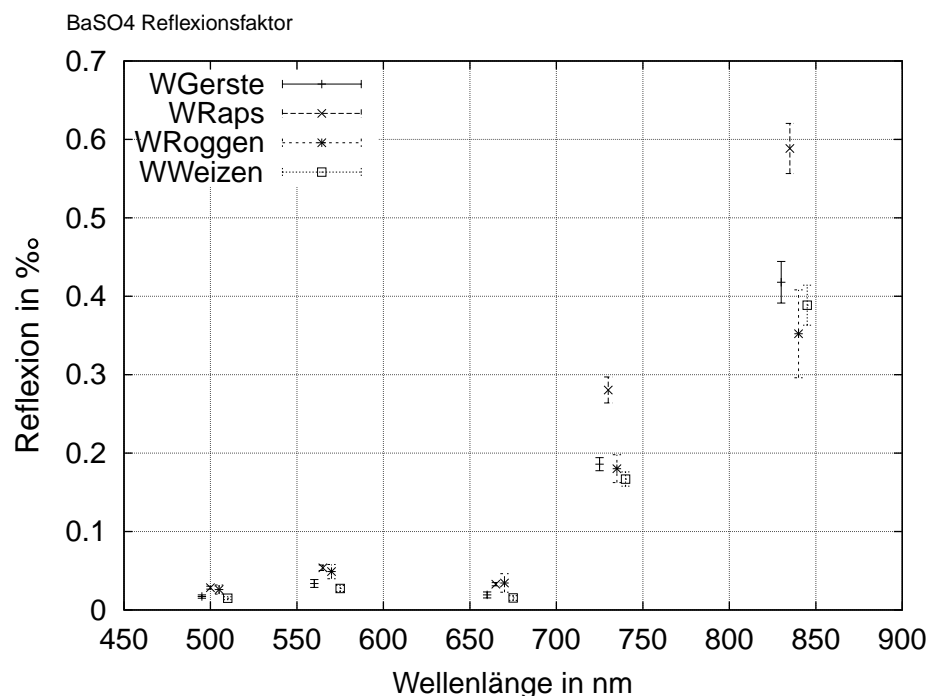


Abbildung 4.2: Reflexionsspektren zum Tag 117 - Vergleichsdaten

- Tag 160:** Zu diesem Zeitpunkt wird der Mais erstmalig beobachtet. Jedoch ist ein sehr ausgeprägtes Bodensignal erkennbar, obwohl ein EC-Stadium von 20 erreicht worden ist. Der Grund liegt im relativ großen Reihenabstand von 60-80 cm (siehe Kapitel 2.1.2). Die Spektralsignatur ist durch ein deutlich höheres Signal im VIS und ein tieferes Signal bei 830 nm Wellenlänge gekennzeichnet. Der NDVI-Wert liegt nahe bei null. Raps und Roggen zeichnen sich auch zu diesem Zeitpunkt durch ein geringfügig erhöhtes Signal im VIS zu Gerste und Weizen aus. Jedoch ist hier wiederum durch die geringe Differenz eine Trennung nicht sinnvoll. Roggen und Gerste sind im Kanal 725 nm von Raps, Weizen und Mais trennbar. Bei 830 nm können Roggen und Gerste von Raps und Weizen sowie von Mais eindeutig getrennt werden. Im NDVI zeigt sich der Roggen wieder mit geringeren Werten, Weizen hebt sich durch einen sehr hohen Wert ab.

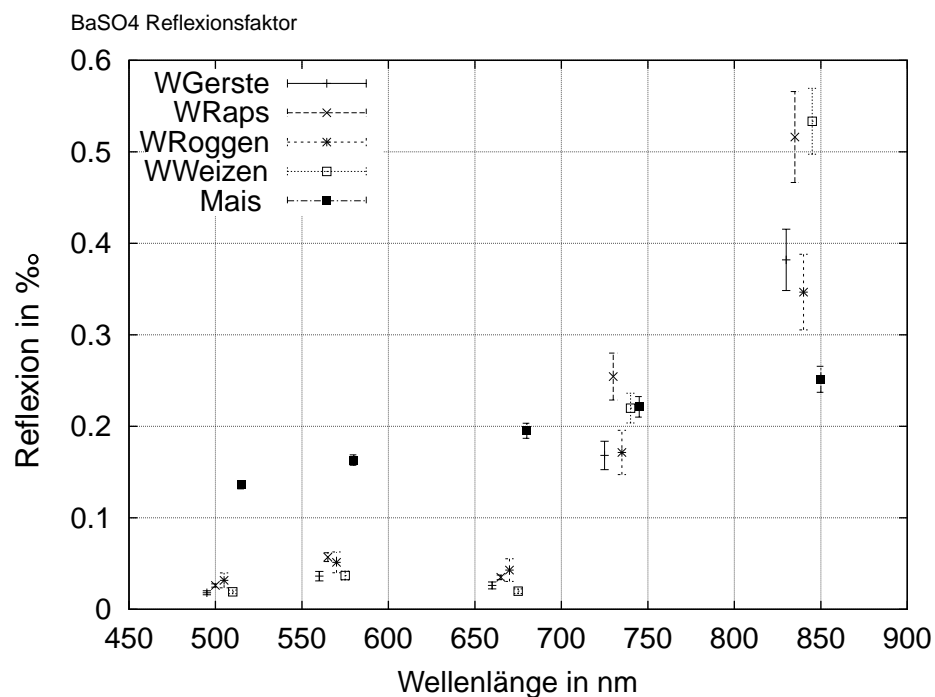


Abbildung 4.3: Reflexionsspektren zum Tag 160 - Vergleichsdaten

- Tag 213:** Gerste, Roggen und Raps sind geerntet. In Abbildung 4.4 ist ein Bodensignal für diese Oberflächen zu sehen. Die Zusatzinformationen weisen die Oberfläche als „Stoppeln“ aus, d.h. es wurden keine weiteren Bodenbearbeitungsmaßnahmen durchgeführt. Sie sind untereinander nicht spektral zu trennen. Weizen reflektiert im VIS und NIR deutlich geringer als diese drei Oberflächen. Da die Informationen nicht den genauen Status wiedergeben, wird hier ein sehr trockener Weizen (Totreife) angenommen. Mais reflektiert im VIS noch geringer als Weizen, im NIR jedoch höher. Dies war zu erwarten, da Mais sich an diesem Tag im EC-Stadium 50 befindet und damit wie vitale Vegetation reflektiert. Im NDVI zeigt der Mais einen hohen Wert, Roggen, Gerste, Raps und Weizen zeigen mit 0.1 ein typisches Bodensignal.

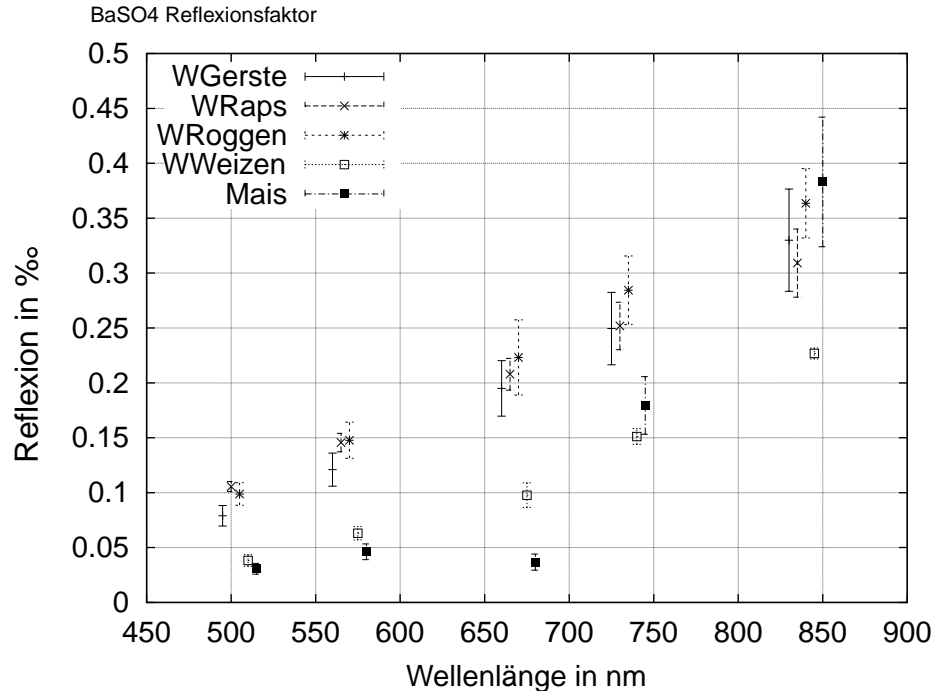


Abbildung 4.4: Reflexionsspektren zum Tag 213 - Vergleichsdaten

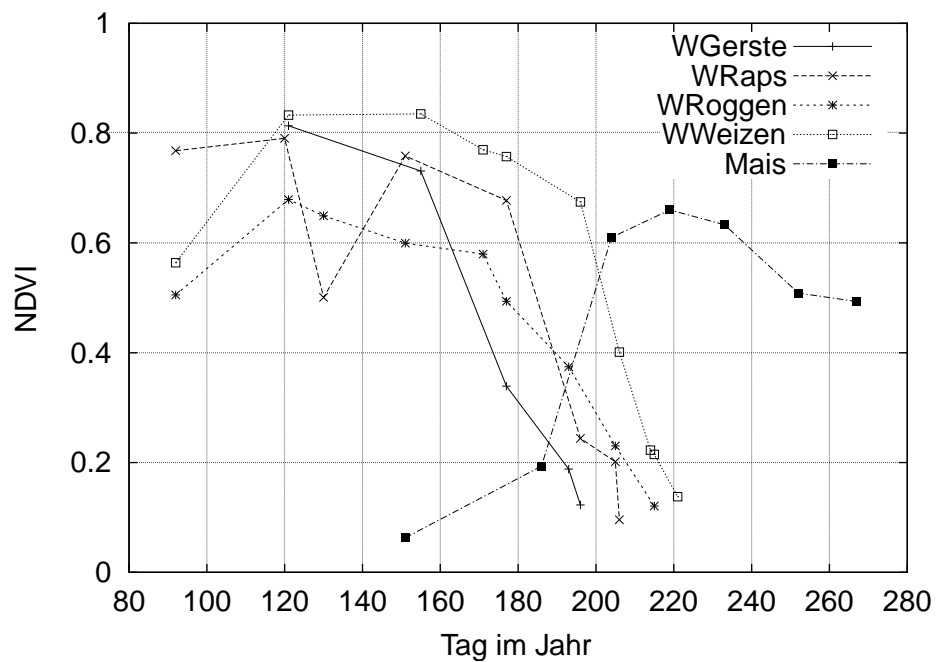


Abbildung 4.5: NDVI - Vergleichsdaten

### 4.2.3 Bewertung

Eine Trennung der 5 untersuchten Pflanzen zu nur einem Zeitpunkt ist **nicht** möglich. Die Differenzen in den einzelnen Kanälen unter Einbeziehung der Standardabweichungen sind zu gering, beziehungsweise die Standardabweichungen zu groß. Auch durch Kombinationen von Gruppenzugehörigkeiten ist kein gegenseitiger Ausschluss möglich. Ein Ausschlussverfahren mit multitemporalen Signaturen ist also hier der Ansatz zur Trennung.

Die Trennung ist nach folgendem Schema möglich:

1. Maisflächen können durch ein Bodensignal am Tag 117 (geringer NDVI) beziehungsweise ein Vegetationssignal zum Tag 213 (großer NDVI) identifiziert werden.
2. Raps kann ebenfalls im Frühjahr durch starke Reflexion bei 725 nm separiert werden.
3. Weizen kann am Tag 160 bei 725 nm und 830 nm von Roggen und Gerste getrennt werden. Voraussetzung ist das Ausblenden der Raps- und Maisflächen durch Schritt 1 und 2.
4. Roggen- und Gersteflächen sind jetzt nur noch durch den differierenden NDVI-Wert am Tag 117 zu unterscheiden.

Die Trennbarkeit ist also auch mit den verschlechterten Daten, sowie der geringeren Anzahl von Kanäle möglich. Es konnten die Ergebnisse, welche in der Dissertation erzielt wurden, bestätigt werden.



## 4.3 Bilddaten

In Kapitel 3.2.3 wird beschrieben, wie die Spektralsignaturen zu den 4 Zeitpunkten der Bildaufnahmen gewonnen werden. Somit stehen für 10 verschiedene Oberflächenarten Signaturen zu diesen Zeitpunkten zur Verfügung. An dieser Stelle wird aber nur auf die Unterscheidung der 5 Pflanzenarten, die Dr. Schneider untersucht hat, eingegangen.

### 4.3.1 Analyse

Auch hier soll eine Analyse der Signaturen auf spektrale Trennbarkeit durchgeführt werden. Die Abbildungen 4.6 - 4.10 stellen die Spektralsignaturen als Mittelwert mit Standardabweichung und den NDVI der betrachteten 5 Nutzpflanzen dar.

- Tag 117:** In Abbildung 4.6 ist Mais auch hier durch ein Bodensignal gekennzeichnet. Im VIS reflektiert er bedeutend höher als die übrigen Pflanzen. Jedoch ist der Mais durch die hohe Standardabweichung von Raps nicht eindeutig zu trennen. Im NIR ist eine Trennung bei 830 nm durch das deutlich geringere Signal möglich. Raps reflektiert im VIS stärker als Gerste, Weizen und Roggen. Eine eindeutige Trennung scheint bei 560 nm und 660 nm sinnvoll. Die 2 Bänder im NIR sind durch hohe Standardabweichungen auffällig. Tendenziell reflektieren dort Raps und Roggen stärker als Weizen und Gerste. Eine Trennbarkeit ist nur bei 725 nm zwischen Raps und Gerste ersichtlich. Die Abbildung 4.10 zeigt den NDVI der 5 Fruchtarten über die 4 beobachteten Zeitpunkte. Mais kann hier als Bodensignal interpretiert werden. Der geringere Wert von Raps scheint zur Trennung von den Getreidearten möglich zu sein.

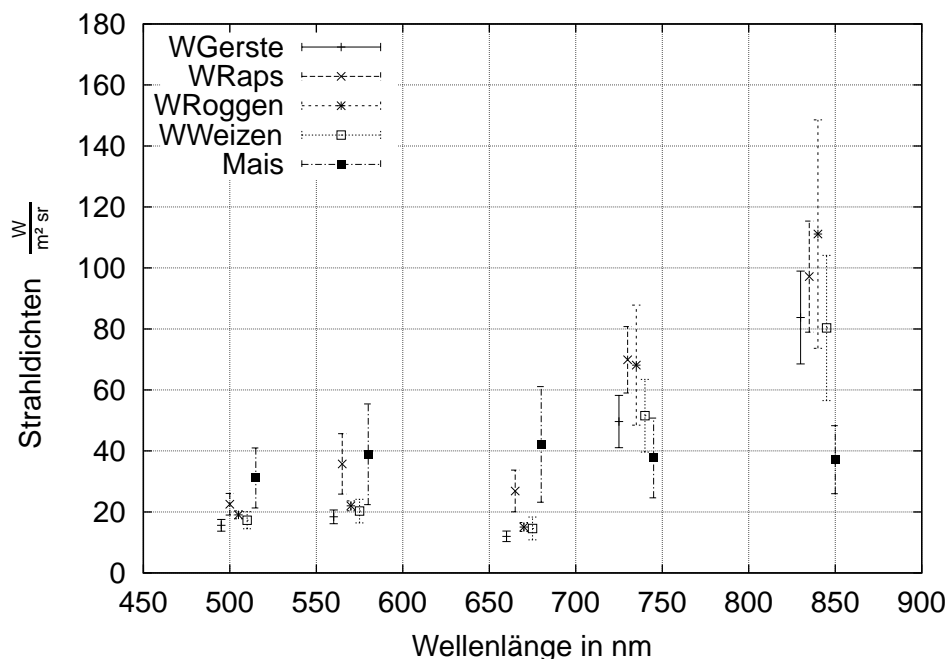


Abbildung 4.6: Reflexionsspektren zum Tag 117 - Bilddaten

- **Tag 131:** Die Abbildung 4.7 zeigt ein ähnliche Reflexionsverhalten wie am Tag 117. Raps zeigt aber im VIS und bei 725 nm eine noch stärkere Reflexion. Hier ist seine Trennung von Gerste, Roggen, Weizen und Mais allein bei 725 nm möglich. Ansonsten sind in diesem kurzen Zeitraum nur sehr geringe Veränderungen im Reflexionsverhalten aufgetreten. Bei Mais ist ein Rückgang der Standardabweichung zu beobachten, das auf die abgeschlossene Saatbettvorbereitung und die dadurch homogene Oberfläche zurückzuführen ist. Im NDVI ist auch hier die Trennbarkeit wie am Tag 117 möglich.

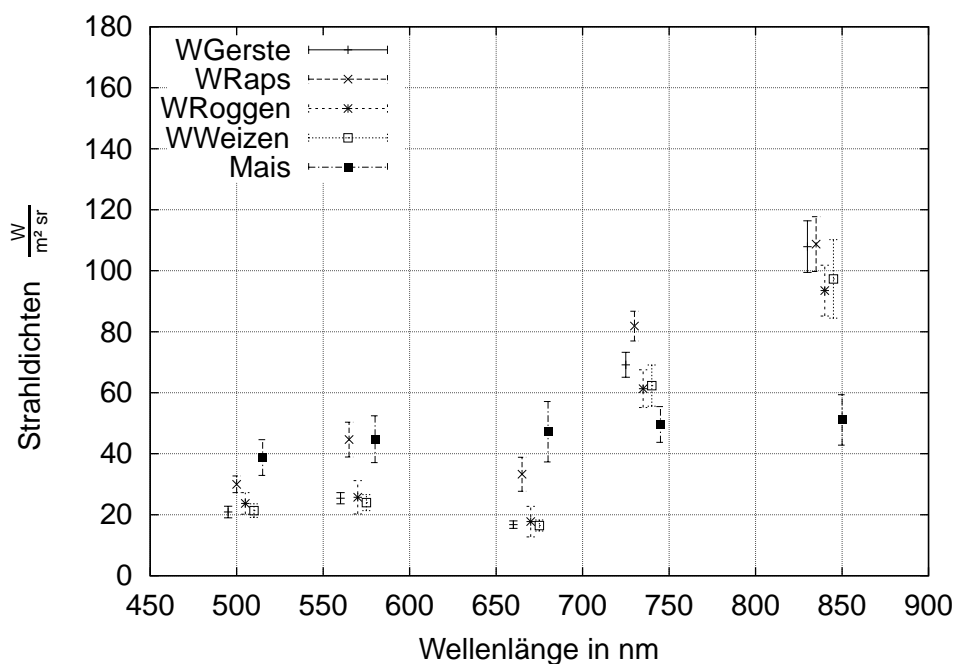


Abbildung 4.7: Reflexionsspektren zum Tag 131 - Bilddaten

- Tag 160:** Mais zeigt in Abbildung 4.8 ein deutliches Vegetationssignal. Trennbarkeit ist nur bei 830 nm durch eine deutlich geringere Reflexion zu erkennen. Roggen und Weizen sind in ihren Signaturen sehr ähnlich. Gerste ist besonders auffällig. Die Signatur ist nicht als Bodensignal, aber auch nicht als Vegetationssignal erkennbar. Ein Zustand der Reife, eventuell auch Totreife ist anzunehmen. Gerade im VIS ist die Reflexion deutlich höher, als die der anderen dargestellten Pflanzenspektren. Bei 725 nm sind Gerste und Raps als Klasse trennbar. Roggen und Weizen reflektieren erneut sehr ähnlich. Raps reflektiert außer bei 830 nm stärker als Roggen und Weizen. Mit Ausnahme von diesen sind also zu diesem Zeitpunkt alle Pflanzen zu trennen. Im NDVI liegen die Werte der untersuchten Nutzpflanzen dicht beieinander. Die Gerste zeichnet sich aber im Verhältnis zu Weizen, Roggen und Raps durch einen geringen Wert aus.

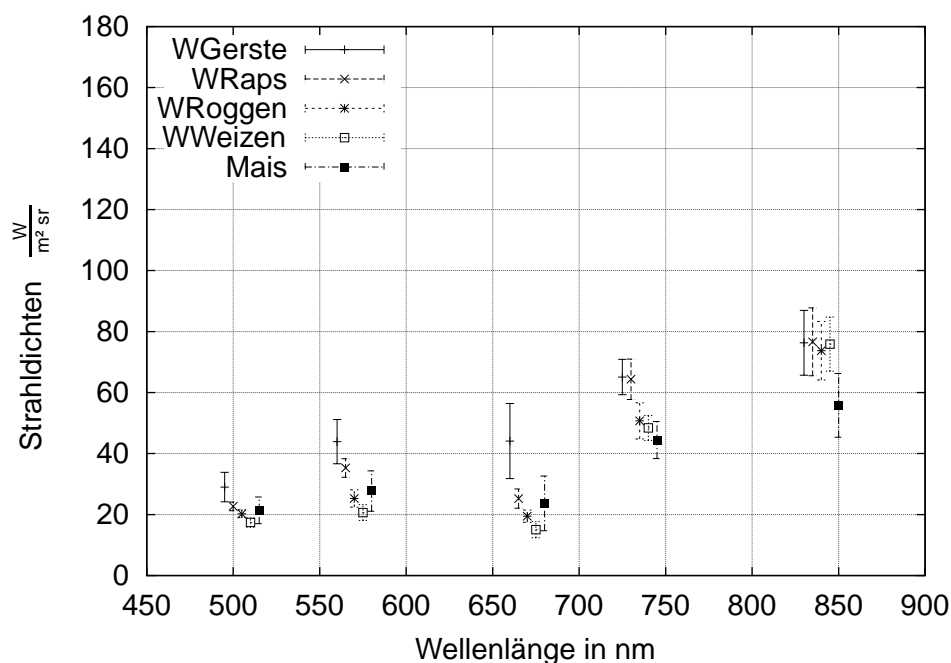


Abbildung 4.8: Reflexionsspektren zum Tag 160 - Bilddaten

- Tag 213:** Mais zeigt ein deutliches Vegetationssignal. Die Abbildung 4.9 zeigt ein deutlich geringeres Signal im VIS. Raps, Gerste, Roggen und Weizen zeigen typische Bodensignale. Diese differieren untereinander aber bis zu 100%. Die hohen Standardabweichungen lassen keine direkte Separation zu. Die Reihenfolge von der stärksten zur geringsten Reflexion geht von Roggen über Gerste, über Raps zu Weizen. Eine sinnvolle Trennung ist nur zwischen Weizen und Roggen möglich. Der Grund der geringeren Reflexion von Weizen kann seine Todreife, gegenüber den Stoppeln oder blanken Bodens von Roggen, sein. Auch im NDVI zeigt sich die Differenz zwischen vitaler Vegetation von Mais zu dem Boden- oder Stoppelsignal der Getreidearten und Raps.

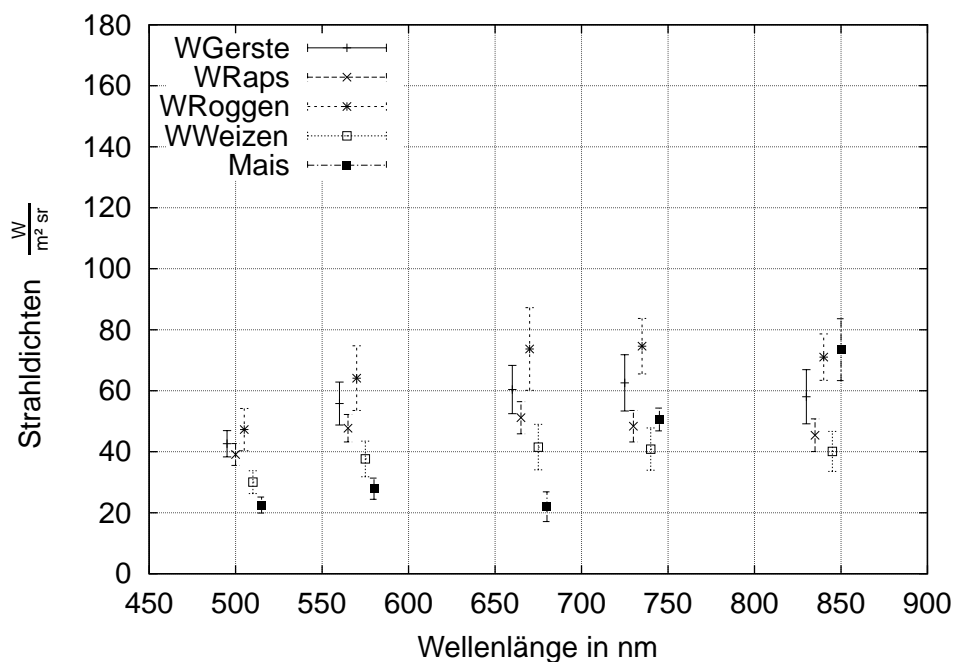


Abbildung 4.9: Reflexionsspektren zum Tag 213 - Bilddaten

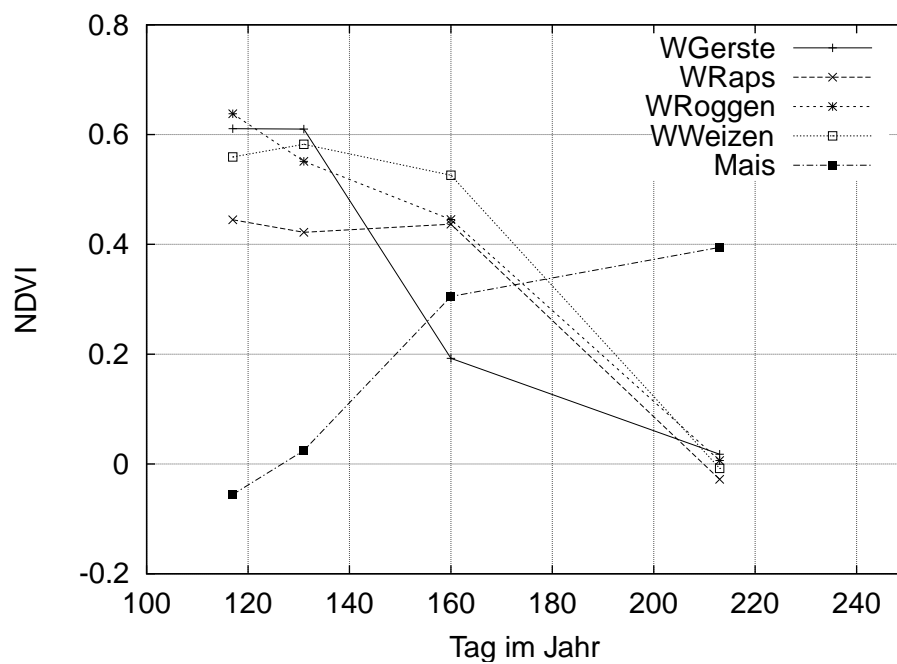


Abbildung 4.10: NDVI - Bilddaten

### 4.3.2 Bewertung

Ebenso wie bei den Vergleichsdaten ist auch mit den Bilddaten eine monotemporale Trennung **nicht** möglich. Die Standardabweichungen sind recht groß, spektrale Unterschiede zu gering. Wieder kann nur ein multitemporaler Ansatz die verschiedenen Oberflächen trennen.

Folgendes Schema dient zur Verdeutlichung:

1. Ein Bodensignal am Tag 117 (NDVI sehr klein) beziehungsweise ein Vegetationssignal zum Tag 213 (NDVI deutlich größer) identifizieren den Mais.
2. Raps kann ebenfalls im Frühjahr durch das hohe Signal bei 560 nm und 660 nm separiert werden. Dazu müssen die Maisflächen aber schon klassifiziert worden sein.
3. Gerste sollte zum Tag 160 durch das hohe Signal bei 560 nm und 660 nm separiert werden.
4. Weizen und Roggen können nur zum Tag 213 durch die stark unterschiedliche Reflexion in allen Kanälen unterschieden werden. Voraussetzung ist wiederum das Ausblenden der Raps-, Gerste- und Maisflächen durch die Schritte 1, 2 und 3.

## 4.4 Vergleich

Um eine Übertragbarkeit spektraler Kriterien zu gewährleisten, ist ein Vergleich der Kriterien in beiden Datensätzen vorzunehmen. Als Grundlage hierfür dienen die Trennbarkeitsanalysen in den vorangegangenen Unterkapiteln. Die Analyse der Bilddaten soll die Analyse der Vergleichsdaten bestätigen. Diese Wahl basiert auf der Überlegung, daß die Aufnahmen von Dr. Schneider ein besseres Spiegelbild der Signaturkurven darstellen. Einflüsse der Atmosphäre sind minimal. Erkennbar ist dies an den geringeren Standardabweichungen. Explizit zu den 3 vergleichbaren Tagen sollen die Gemeinsamkeiten der spektralen Signaturen analysiert werden. Die darin gefundenen Kriterien sollen **verifizierte Kriterien** genannt werden. Mit ihnen soll ein Ablaufschema zur Trennung aufgestellt werden.

- **Tag 117:** Da Mais in den Vergleichsdaten zu diesem Zeitpunkt nicht beobachtet wurde, wird er auch hier nicht betrachtet. Die Klassenbildung Raps, Roggen und Weizen, Gerste im VIS kann nicht bestätigt werden. Roggen reflektiert zu gering. Die erhöhte Reflexion von Raps im VIS ist aber in beiden Datensätzen erkennbar. Die hohen Reflexionen im NIR bei Raps treten nicht auf, jedoch kann die Trennbarkeit von Raps und Gerste bei 725 nm bestätigt werden. Im NDVI zeigt sich, dass Raps zu niedrige und Roggen zu hohe Werte aufweist.

- **Tag 160:** Mais zeigt im Gegensatz zu den Vergleichssignaturen zu diesem Zeitpunkt schon ein Vegetationssignal. Selbst einen Monat später ist noch ein Bodensignal im Spektrum der Vergleichsdaten zu beobachten. Der Grund kann eine frühere Aussaat oder ein geringerer Reihenabstand und somit eine frühere Bodenüberdeckung sein. Trotzdem ist ein geringes Signal bei 830 nm gleich. Gerste zeigt in den Bilddaten typische Werte für die Totreife bzw. geerntete Fläche, was sich in erhöhten Reflexionswerten im VIS ausprägt. In den Vergleichsdaten kann dieses Bild erst mit dem Tag 177 nachvollzogen werden. Die Vermutung liegt Nahe, dies auf Klima- und Witterungsbedingungen zurückzuführen. Die Gruppentrennung von Gerste und Roggen sowie Weizen und Raps im NIR kann nicht bestätigt werden. Vielmehr ist nur eine Trennbarkeit von Roggen und Raps bei 725 nm in beiden Datensätzen zu beobachten. Das Verhalten im NDVI kann nicht bestätigt werden.
- **Tag 213:** In beiden spektralen Signaturen ist ein Bodensignal, bzw. Totreife für das Getreide und den Raps zu beobachten. Auch das Vegetationssignal von Mais zeichnet sich deutlich ab. Ebenfalls ist die starke Reflexion von Roggen und die geringe Reflexion von Weizen in allen Kanälen zu sehen. Der Unterschied beträgt in beiden Datensätzen 80-100%. Die Werte im NDVI können hier bestätigt werden. In beiden Datensätzen ist ein großer Wert von Mais und ein Wert nahe null von Weizen, Raps, Roggen und Gerste zu sehen.

Die zu diesen 3 Tagen möglichen Trennbarkeiten dienen nun zur Erstellung einer Trennungsvorschrift. Sie sollte für diese 5 Fruchtarten allgemein gültig und somit übertragbar sein. Da nur 2 vergleichbare Datensätze zur Verfügung stehen, ist das aber nicht mit Sicherheit belegt. Mit Hilfe der „verifizierten Kriterien“ kann jetzt eine Trennungsvorschrift erarbeitet werden.

1. Ein Bodensignal am Tag 117 (NDVI sehr klein) beziehungsweise ein Vegetationssignal zum Tag 213 (NDVI deutlich größer) identifizieren den Mais.
2. Raps kann im Frühjahr durch das hohe Signal bei 560 nm und 660 nm erkannt werden. Da nicht auszuschließen ist, dass Roggen so stark reflektiert, ist eine weitere Betrachtung am Tag 160 bei 725 nm durch erhöhtes Signal von Raps noch notwendig.
3. Gerste sollte zum Tag 160 durch das hohe Signal bei 560 nm und 660 nm separiert werden. In den Vergleichsdatendaten kann das aber erst ab Tag 177 nachgewiesen werden. Hier ist noch eine genauere Untersuchung mit mehreren Datensätzen notwendig.
4. Weizen und Roggen können nur zum Tag 213 durch die stark unterschiedliche Signalstärke in allen Kanälen unterschieden werden. Voraussetzung ist das Ausblenden der Raps-, Gerste- und Maisflächen durch Schritt 1, 2 und 3.

## 4.5 Trennbarkeit aller untersuchten Oberflächen in den Bilddaten

Im Testgebiet dieser Diplomarbeit sind 10 verschiedene Fruchtarten vorhanden. Es soll in dieser Arbeit untersucht werden, ob und wie eine Separation dieser Fruchtarten möglich ist. Ein Klassifizierungsmodell als überwachte Klassifizierung soll damit aufgestellt werden. Die in Kapitel 4.4 gewonnenen Erkenntnisse dienen als Basis, um eine gewisse Übertragbarkeit der Analyse auf andere Flächen zu gewährleisten.

### 4.5.1 Analyse

Bei der Betrachtung der Bilddaten ist eine teilweise optische Unterscheidung der Flächen möglich. Daher wurden Ausschnitte der entsprechenden Feldfrüchte in allen 4 Zeitpunkten zum Vergleich zusammengestellt. Die einzelnen Flächen haben eine Größe von  $200 \cdot 200$  m. Damit sind Strukturen erkennbar, die auch als Texturen bezeichnet werden. Darunter kann zum Beispiel das homogene, streifige oder marmorisierte Aussehen einer Oberfläche verstanden werden. Texturen können somit ebenfalls als Indikator einer Unterscheidung dienen. Eine Kontrastverstärkung wurde zur besseren Sichtbarkeit durchgeführt. Außerdem musste eine RGB zu CMYK Farbraumtransformation durchgeführt werden, um die Bilddaten Druckerkonform zu erhalten.

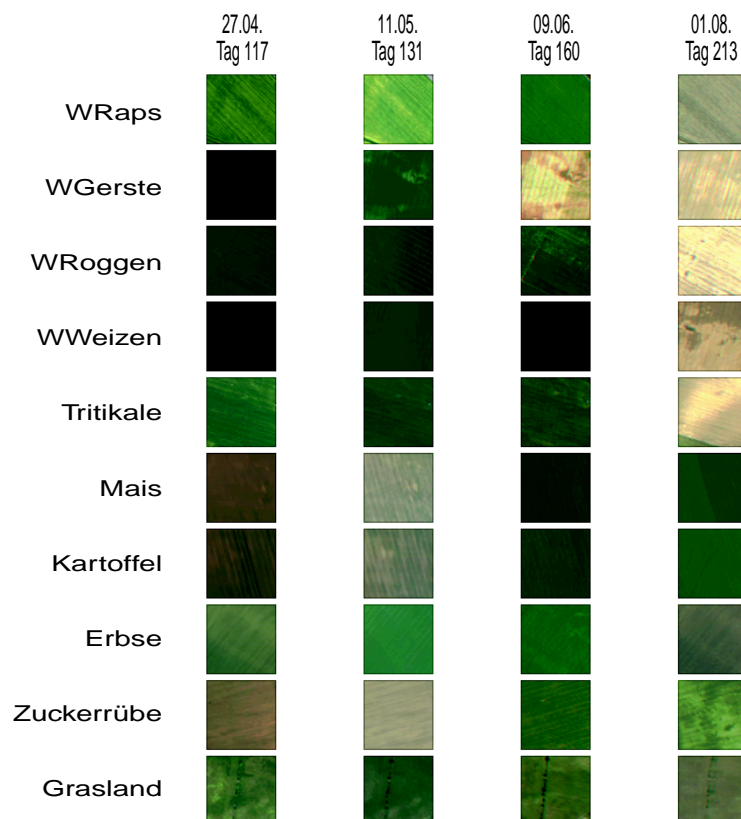


Abbildung 4.11: Zusammenstellung von Bildausschnitten der untersuchten Oberflächen als Echtfarbenbild

Die Abbildung 4.11 zeigt Bildausschnitte mit den Kanälen Rot, Grün und Blau (495 nm, 560 nm, 660 nm). Auffällig sind das Gelbwerden von Raps zum Tag 131, die Bodenoberflächen von Erbse, Kartoffel und Zuckerrübe im Frühjahr, die frühe Reife von Gerste zum Tag 160, die Stoppeln von Roggen, Gerste und Triticale zum Spätsommer und der ockerfarbene Weizen am Tag 213. Bei den Texturen ist mit Ausnahme von Kartoffel zum Spätsommer und der Klasse Grasland über den gesamten Zeitraum ein streifiges Verhalten zu beobachten. Die Bildausschnitte sind in Abbildung 4.12 als Falschfarbenbild CIR (Rot = 830 nm, Grün = 660 nm, Blau = 560 nm) dargestellt. Eine gute farbliche Differenzierung ist auch hier möglich. Auffallend ist wieder die Gerste zum Tag 160. Die Fläche ist recht inhomogen, was auf eine eventuelle Schädigung zurückzuführen ist. Raps zeigt in der Zeit seiner Blüte ein gut zu unterscheidendes Bild. Ein stark rötliches Bild der Erbse zum Tag 131 und der Kartoffel zum Tag 213 sind ebenfalls auffällig. In den Texturen sind homogene Flächen von Triticale im Frühjahr, von Raps zu seine Blüte und der Kartoffel zum Spätsommer zu erkennen. Ein NDVI-Bild wurde in Abbildung 4.13 realisiert. Weiße Flächen zeichnen sich durch hohe Vitalität, d.h. starke kräftiger Vegetation aus. Dunkle Flächen charakterisieren Boden, Wasser oder abgestorbene Biomasse. Hier zeigt sich eine mögliche Stratifizierung<sup>1</sup> in ein- und zweijährige Pflanzen. Die Einteilung wird in Kapitel 2.1.2 beschrieben.

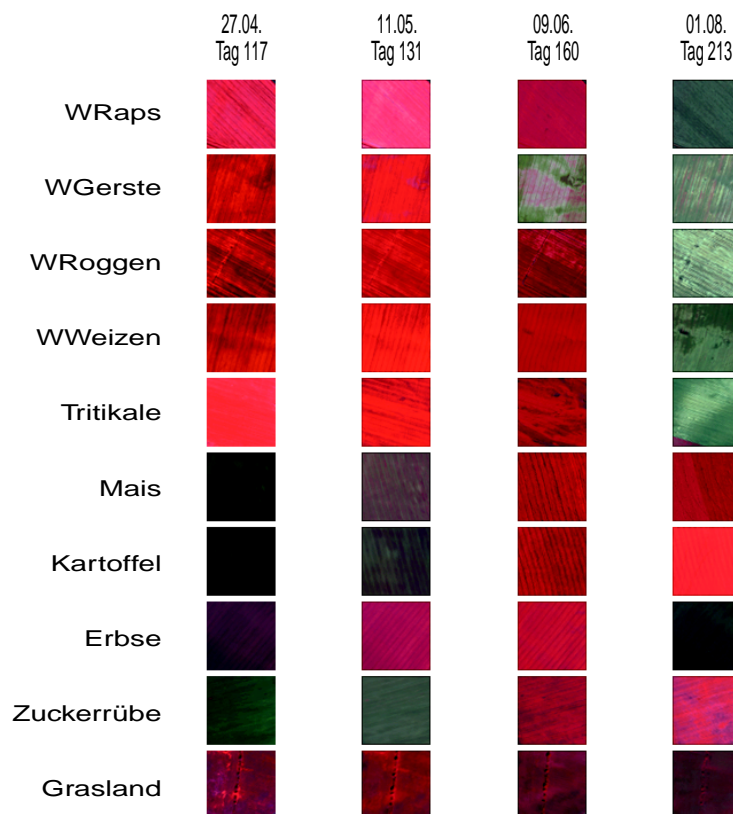


Abbildung 4.12: Zusammenstellung von Bildausschnitten der untersuchten Oberflächen als Falschfarbenbild (CIR)

<sup>1</sup>Klassenbildung nach Objekteigenschaften



#### 4.5. Trennbarkeit aller untersuchten Oberflächen in den Bilddaten

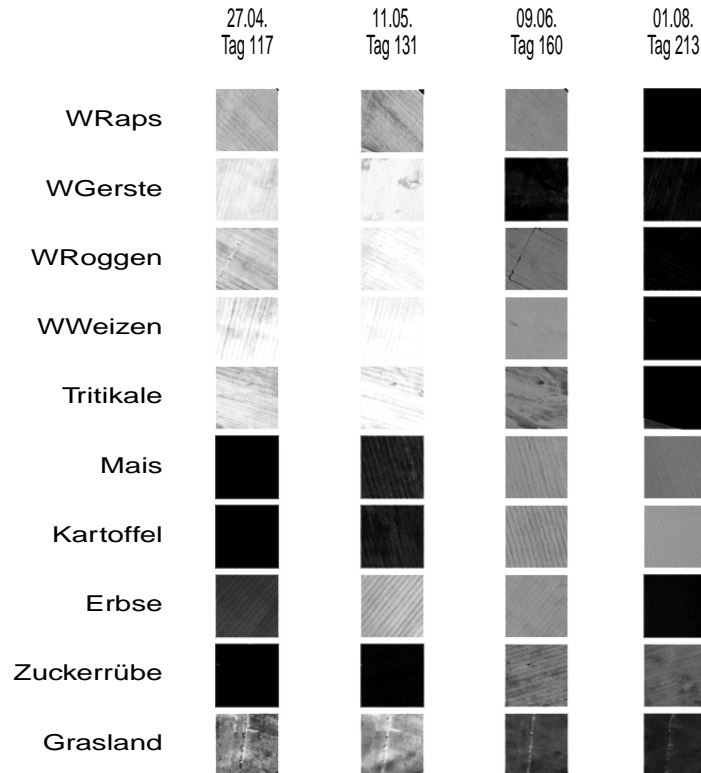


Abbildung 4.13: Zusammenstellung von Bildausschnitten der untersuchten Oberflächen als NDVI-Bild

Da die Klasseneinteilung in ein- und zweijährige Pflanzen möglich ist, muß die Unterscheidung einzelner Arten innerhalb dieser Klassen untersucht werden. In Kapitel 5 wird noch explizit auf die Klassentrennung eingegangen. Dort werden auch die Zusatzklassen GRASLAND und SONSTIGES beschrieben. Die Trennung innerhalb der Klassen erfolgt durch die Einbindung der Erkenntnisse aus dem Vergleich. Dazu stellen die Abbildungen 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 die Spektren der zusätzlichen Vegetationsoberflächen dar. In Verbindung mit den Abbildungen 4.6 - 4.10 in Abschnitt 4.3.1 kann die Trennbarkeit grafisch untersucht werden.

- Tag 117:** Die zweijährigen Pflanzen zeigen ein deutliches Bodensignal. Erbse reflektiert geringfügig stärker und hat zudem eine größere Standardabweichung. Eine Trennung scheint nur bei 830 nm von Kartoffel und Erbse möglich. Triticale als zusätzliche einjährige Frucht kann nicht getrennt werden. Es ist jedoch ein erhöhte Standardabweichung erkennbar. In Abbildung 4.11 ist für Triticale ein helleres Bild zu erkennen. Dies scheint nur für den gewählten Ausschnitt zuzutreffen. Die leicht erhöhte Reflexion bei 560 nm kann die Ursache sein. Im NDVI sind die Werte der einjährigen Pflanzen nahezu gleich, die Triticale zeigt keine Trennbarkeit.

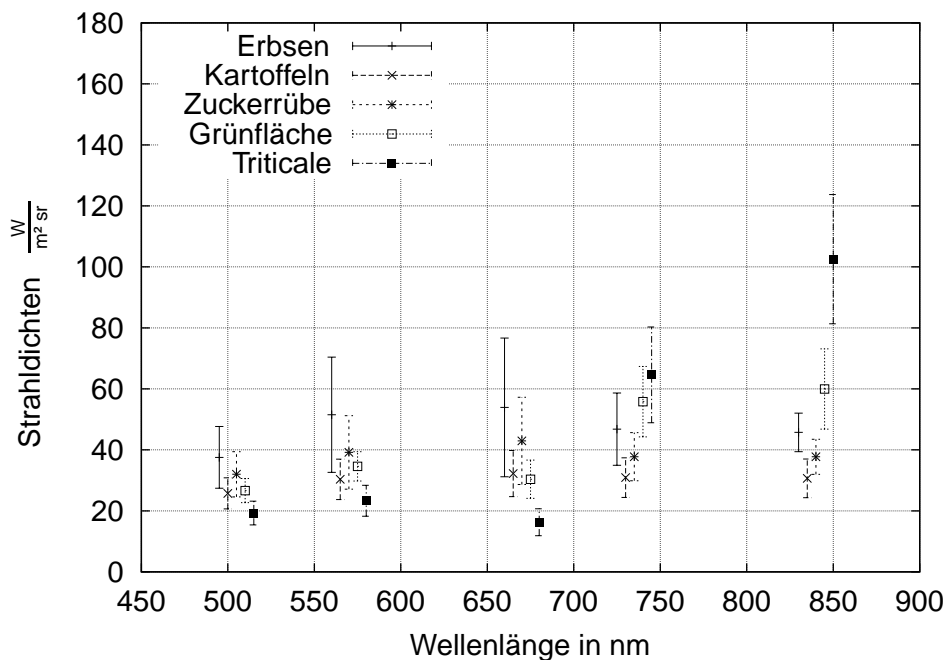


Abbildung 4.14: Zusätzliche Reflexionsspektren zum Tag 117 - Bilddaten

- Tag 131:** Die Erbse zeigt zu diesem Zeitpunkt ein leichtes Vegetationssignal. Damit reflektiert sie im VIS geringer und im NIR stärker als Kartoffel, Mais und Zuckerrübe. Eine eindeutige Trennung ist aber auch hier nicht möglich. Die weiteren zweijährigen Pflanzen zeigen ein Bodensignal mit sich überlappenden Standardabweichungen. Triticale zeigt ein nahezu identisches Reflexionsverhalten wie Roggen und Weizen. Auch in den Bildausschnitten ist keine Unterscheidung möglich. Im NDVI ist der Wert der Erbse deutlich größer als die der anderen einjährigen Pflanzen. Triticale ist wiederum nicht trennbar.
- Tag 160:** Im VIS reflektieren alle zweijährigen Fruchtarten nahezu identisch. Im NIR zeigt nur der Mais ein geringeres Signal. Trotzdem ist dessen Separation schwierig. Für Triticale gilt das Gleiche wie am Tag 131. Das Spektrum ähnelt dem von Roggen und Weizen. Auch die Bildausschnitte geben keinen

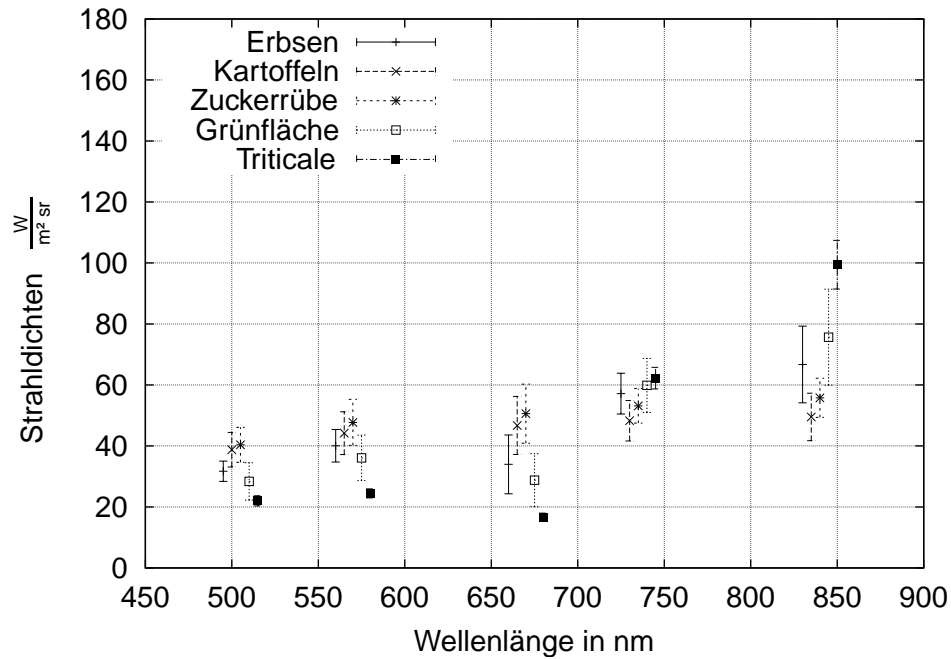


Abbildung 4.15: Zusätzliche Reflexionsspektren zum Tag 131 - Bilddaten

weiteren Anhaltspunkt. Im NDVI zeigt der Mais einen geringeren Wert. Bei Betrachtung der Bildausschnitte kann das aber nicht nachvollzogen werden. Es scheint, dass durch lokale Unterschiede der Flächen recht deutliche Abweichungen zeigen können. Triticale ist nicht trennbar.

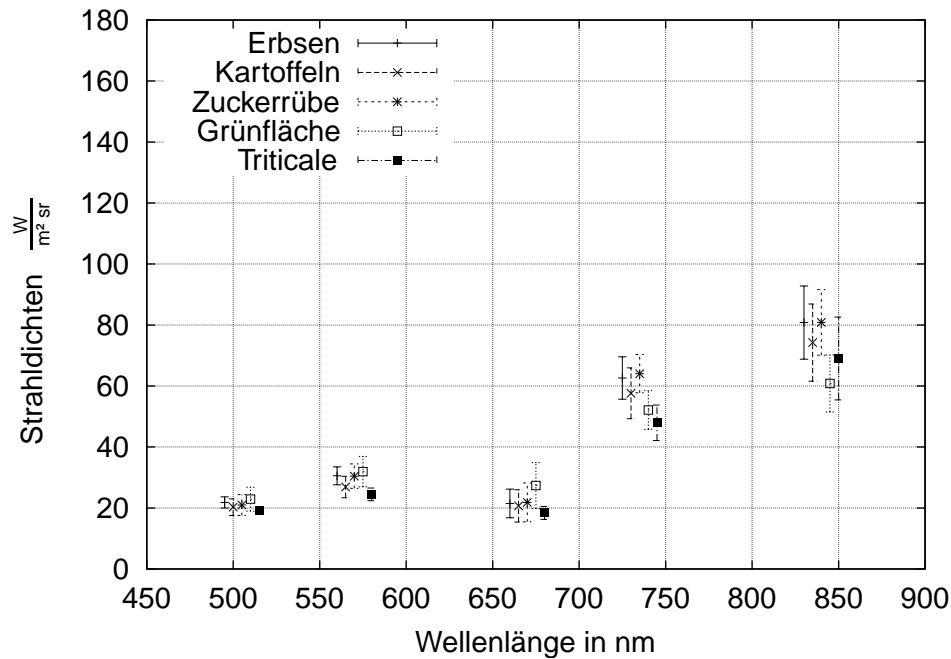


Abbildung 4.16: Zusätzliche Reflexionsspektren zum Tag 160 - Bilddaten

- Tag 213:** Hier zeigen Kartoffel, Mais und Zuckerrübe ein deutliches Vegetationssignal. Die Erbse hingegen ist schon geerntet, was durch ein ausgeprägtes Bodensignal erkennbar ist. Eine Trennung ist besonders bei 830 nm leicht möglich. Mais und Erbse sind durch ein geringeres Signal von Kartoffel und Zuckerrübe bei 725 nm trennbar. Die Zuckerrübe reflektiert in allen Kanälen geringfügig stärker als Kartoffel, besonders aber bei 560 nm. Triticale zeigt jetzt eine abgeerntete Oberfläche. Trennung ist hier nicht möglich. Im NDVI zeigt die Erbse als einzige einjährige Fruchtart einen NDVI von null.

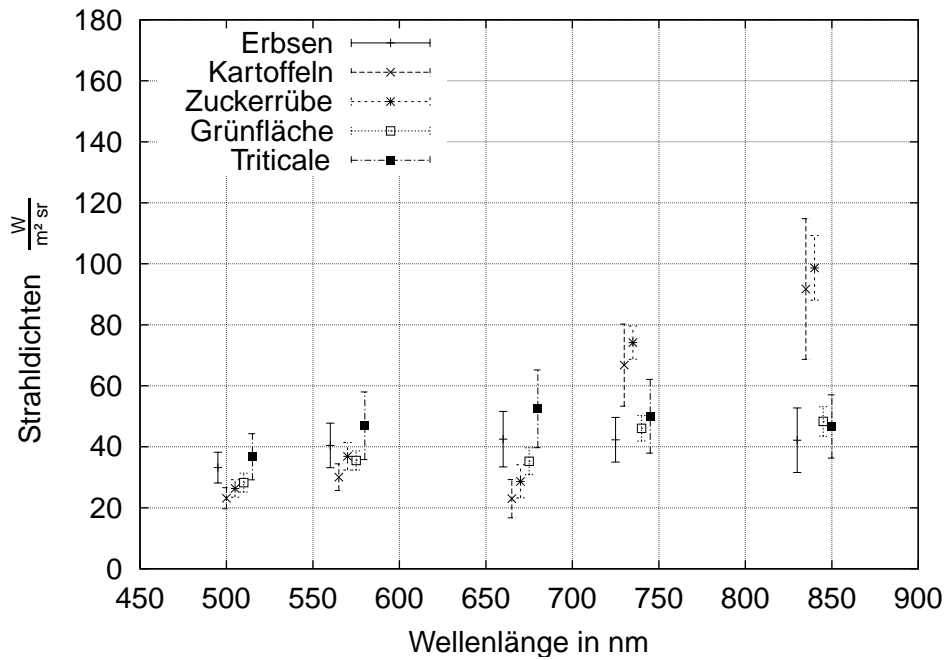


Abbildung 4.17: Zusätzliche Reflexionsspektren zum Tag 213 - Bilddaten

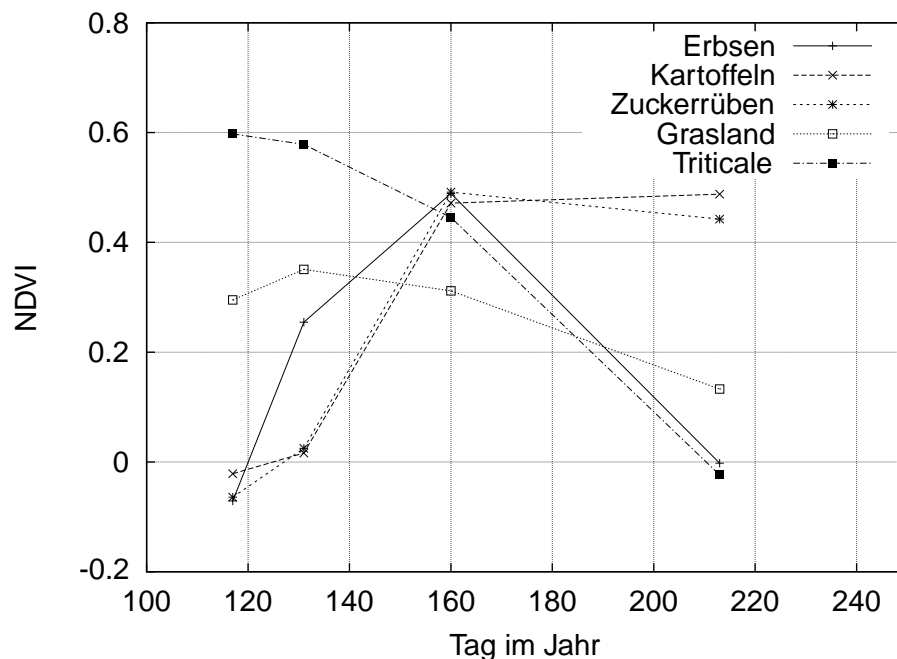


Abbildung 4.18: Zusätzliche NDVI - Bilddaten

### 4.5.2 Bewertung

Die Trennung der 10 unterschiedlichen Oberflächen erfordert eine Vortrennung nach einjährigen und zweijährigen Pflanzen, sowie nach Grasland. Dies ist durch die Verwendung des NDVI möglich, der gut die Unterschiede zwischen Boden und Vegetationsoberfläche herausstellt. Die Betrachtung des NDVI zum Frühling und Spätsommer sollte ausreichen. Einjährige Pflanzen (Erbse, Kartoffel, Mais und Zuckerrübe) haben einen NDVI nahe null am Tag 117 und einen großen NDVI ( $>0.5$ ) am Tag 213. Nur die Erbse stellt durch ihre frühe Reife eine Ausnahme dar. Die zweijährigen Pflanzen verhalten sich genau umgekehrt. Grasland, Wiesen und Weiden zeichnen sich durch einen NDVI im mittleren Bereich über das ganze Jahr hinweg aus.

Die Trennung der einjährigen Pflanzen kann dann nach folgendem Schema verlaufen:

1. Die Erbse ist zum Tag 213 abgeerntet und somit durch eine NDVI nahe null identifizierbar.
2. Mais kann durch das geringere Reflexionssignal bei 725 nm am Tag 312 separiert werden. Dazu ist der Ausschluss von Erbse notwendig.
3. Die Trennung von Kartoffel und Zuckerrübe scheint nur bei 560 nm möglich. In der Abbildung 4.13 scheint eine Trennung im NDVI ebenfalls sinnvoll.

Die Trennung der zweijährigen Pflanzen läuft nach dem Schema, wie sie im Abschnitt 4.4 beschrieben sind. Die Integration von Triticale kann nach Ausschluss von Raps durch das leicht erhöhte Signal bei 560 nm am Tag 117 getrennt werden. Trotzdem ist hier nur eine schlechte Trennbarkeit zu erwarten, da als Kreuzung von Roggen und Weizen die Spektralsignaturen der Triticale zu ähnlich sind.

# Kapitel 5

## Klassifikation

### 5.1 Grundlegendes

Bei der Klassifikation wird zwischen zwei Hauptverfahren, der „Unüberwachten Klassifikation“ und der „Überwachten Klassifikation“ unterschieden. Jede dieser Verfahren hat Vor- und Nachteile. In dieser Arbeit wird versucht, mit Hilfe der überwachten Klassifikation eine Oberflächenerkennung zu erreichen. Dazu sollen an dieser Stelle kurz mögliche Verfahren genannt werden. Sie wurden von Lang, S. und Blaschke, T. (1998) und Albertz (1991) ausführlich beschrieben.

#### **Minimum distance Klassifikation**

Bei dieser Klassifikation wird als Signatur der Mittelwert je Spektralbereich und Klasse als Punkt in einem mehrdimensionalen Merkmalsraum herangezogen. Für jedes zu klassifizierende Pixel wird nun die meist euklidische Distanz zu allen Mittelwerten bestimmt und das Pixel nach der minimalen Distanz thematisch klassifiziert. Vorteile sind, dass jedes Pixel klassifiziert und der Rechenaufwand minimal ist.

#### **Maximum-Likelihood Klassifikation**

Im Gegensatz zur Minimum distance Klassifikation geht bei der Maximum-Likelihood Klassifikation die multivariante Streuungsinformation als Richtungsdivergenz im Merkmalsraum in die Klassifikation ein. Es wird ein statistisches Ähnlichkeitsmaß berechnet, das von der mehrdimensionalen Verteilung der „Punktwolke“ jedes Trainingsgebietes abhängig ist. Während der Rechenaufwand dieser Technik hoch ist, sind auch die Klassifikationsergebnisse in der Regel gut. Zusätzlich besteht die Möglichkeit statistischer Qualitätsaussagen hinsichtlich der Klassifikation jedes einzelnen Pixels aufgrund der bekannten Verteilungseigenschaften, die aus der mehrdimensionalen Stichprobe der Trainingsgebiete geschätzt werden. Somit können bewusst Qualitätsentscheidungen getroffen werden, wie etwa Pixel mit weniger als 95% Sicherheit als „nicht klassifiziert“ zu identifizieren. Ebenso können auch a-priori Wahrscheinlichkeiten, etwa aufgrund der vorab bekannten Anteile einzelner Klassen innerhalb des Untersuchungsgebietes, festgelegt werden.

### Parallelepiped - Klassifikation

Die Zuordnung eines Pixels zu einer Klasse wird aufgrund von größer und/oder kleiner Vergleichen in allen Kanälen durchgeführt. Wenn das Pixel in allen Spektralbereichen in das Signaturenintervall einer Kategorie fällt, wird es dieser Klasse zugeordnet. Als Signatur wird daher die Unter- und Obergrenze eines Werteintervalls benötigt. Dieses kann einfach durch Minimum und Maximum der Pixelwerte im Trainingsgebiet, oder aus Streuungswerten mit Bezug auf den Mittelwert, etwa in Form von  $\pm 2$  Standardabweichungen vom Mittelwert, ermittelt werden.

### Hierarchische Klassifikation

Die Zuordnung eines Pixels erfolgt hier über mehrere Schritte. In jedem Schritt wird meist nur zwischen zwei bis drei Klassen unterschieden, die wiederum in ihre Einzelklassen zerlegt werden. Dies ist ein sehr flexibles Verfahren, erfordert jedoch ein hohes Maß an Strukturierung und Übersicht. Der Vorteil des Klassifizierungsansatzes liegt in der gezielten Kanal- und Komponentenauswahl für jeden Iterationsschritt. Der Arbeitsaufwand zur Erstellung des Modells ist jedoch höher als bei den oben genannten Methoden.

## 5.2 Der ERDAS IMAGINE - Expert Classifier

Mit dem *Expert Classifier* wurde in dieser Arbeit ein Modell zu überwachten Klassifikation durch eine Kombination nach der Methode der *Hierarchischen Klassifikation* und *Parallelepiped-Klassifikation* erstellt. Seine Einsatzmöglichkeit und Funktionsweise soll kurz erläutert werden. Der *Expert Classifier* ist ein Zusatzmodul des Programmsystems ERDAS Imagine. Er erlaubt eine regelbasierte Klassifikation von multispektralen und multitemporalen Bildern. Basierend auf einer hierarchischen Regelfestlegung oder eines Entscheidungsbaumes können die Klassifikationsregeln definiert werden. Die Abstraktion erfolgt durch benutzerdefinierte Variablen, die Rasterbilder, Vektordaten, Landschaftsmodelle und einfache Variablen beinhalten können. Der Expert Classifier besteht aus zwei Teilen: dem Knowledge Engineer und dem Knowledge Classifier. Der Knowledge Engineer dient zur Festlegung der Ausgabeklassen, Regeln und Variablen. Mehrere Regeln und Hypothesen können zu einem Entscheidungsbaum zusammengeführt werden. Abbildung 5.1 zeigt ein schematisches Beispiel.

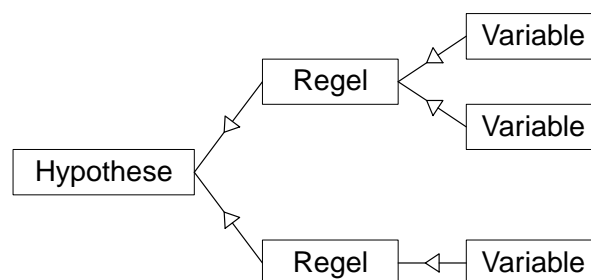


Abbildung 5.1: Entscheidungsbaum

Durch Festlegung von Wahrscheinlichkeiten für jede Regel werden a-priori Informationen integriert und Sicherheiten unterschiedlicher Variablen assoziiert. Die Berechnung der Konfidenzwerte für die Regeln und Hypothesen erfolgt nach dem in Abbildung 5.2 dargestellten Schema. Die Formel 5.1 beschreibt die Berechnung der Konfidenzwerte entlang des Zweiges, die Formel 5.2 quer zum Zweig.

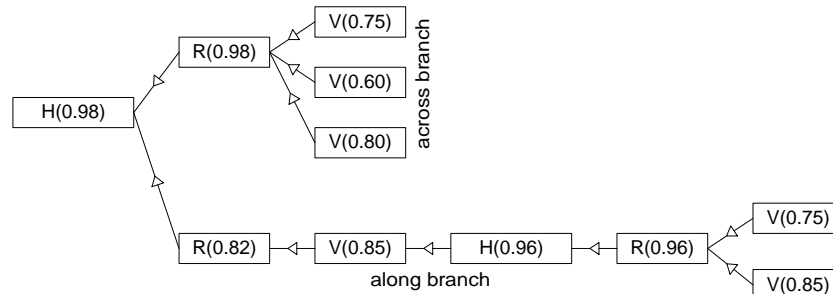


Abbildung 5.2: Wahrscheinlichkeiten im Modell

Along branch

$$\prod_{i=0}^n c_i \quad (5.1)$$

Across branch

$$1 - \left( \prod_{i=0}^n (1 - c_i) \right) \quad (5.2)$$

mit

- $c_i$  - Wahrscheinlichkeit
- $\prod c_i$  - Produkt der Wahrscheinlichkeiten
- $n$  - Anzahl der Knoten

Der Knowledge Classifier dient als Eingabemaske (Interface) für Einstellungen der Ausgabeklassen, Variablen und Bilddaten. Er wurde so konzipiert, dass er auch für Laien leicht zu bedienen ist.

## 5.3 Modellbildung

Die Klassifikation, der zu unterscheidenden Vegetationsarten, ist in zwei Modelle unterteilt, um die Übersichtlichkeit, Strukturierung und Fehlerfindung zu erleichtern. Das erste Modell trennt die als Ackerland genutzten Flächen von den bebauten Fläche, den Waldgebieten, Wiesen, Parks, Straßen, Wasserflächen und Gräben. Eine weitere Unterteilung in einjährige und zweijährige Pflanzen (siehe Kapitel 2.1.2) findet ebenfalls statt. Im eigentlichen Separationsmodell werden die einzelnen Pflanzenarten unterteilt.



### 5.3.1 Modell zur Grobtrennung

Die Einteilung in Klassen (Stratifizierung) zur Vortrennung ist eine gute Möglichkeit zur Vereinfachung des Modells. Dadurch wird eine bessere Strukturierung, eine leichtere Erweiterbarkeit und Anpassbarkeit erreicht. Ebenfalls ist die Implementierung und Optimierung leichter durchzuführen. Im Grobmodell sollte eine geringe Anzahl von Kenngrößen verwendet werden. Dazu findet der NDVI Verwendung.

Die Abbildung 5.3 stellt das mit dem Knowledge Classifier implementierte Modell dar.

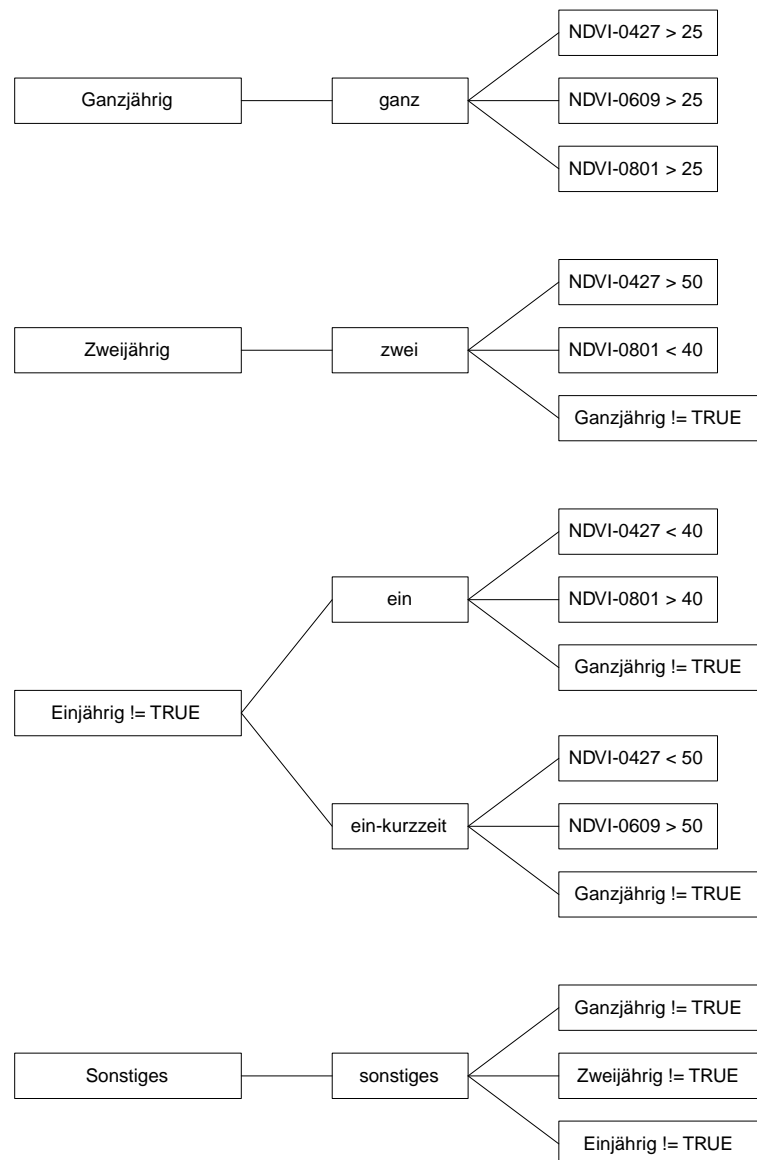


Abbildung 5.3: Modell zur Grobtrennung

Im Grobmodell wird eine Vorunterteilung in die folgenden Klassen vorgenommen:

1. EINJÄHRIG
2. ZWEIJÄHRIG
3. GANZJÄHRIG
4. SONSTIGES

Die Klasse *GANZJÄHRIG* beinhaltet Flächen wie Wiesen, Weiden, Wälder, Parks, städtische Grünanlagen, bewachsene Gräben und Hecken. *ZWEIJÄHRIG* schließt die in dieser Arbeit zu untersuchenden Pflanzenarten Winterweizen, Winterroggen, Wintergerste, Winterraps und Triticale sowie alle weiteren Nutzpflanzen, welche im Frühjahr deutlich grün sind, ein. Zur Klasse *EINJÄHRIG* gehören Kartoffel, Mais, Erbse und Zuckerrübe. Die Klasse *SONSTIGES* beinhaltet die nicht zugeordneten Oberflächen, wozu hauptsächlich Wasserflächen, Dach- und Straßenflächen gehören. Alle Kriterien der Trennung beruhen auf den Werten des NDVI zu den Zeitpunkten 27. April, 9. Juni und 1. August.

Die Eigenschaften, der in der Klasse *GANZJÄHRIG* auftretenden Pflanzen, besteht darin, dass zu allen Zeitpunkten ein Vegetationssignal zu identifizieren ist. Ab einem NDVI von größer 0.1 kann man von einer geringen Vegetation ausgehen. Somit wurde als Kriterium für die Zeitpunkte 27. April, 9. Juni und 1. August ein NDVI größer 25 angegeben.

Die Klasse *ZWEIJÄHRIG* hat als Besonderheit einen hohen NDVI im Frühjahr und einen geringen NDVI im Herbst. In den Versuchen mit dem Modell hat sich gezeigt, dass ein Schwellwert des NDVI zum Tag 117 mit größer 0.2 und zum Tag 213 mit kleiner 0.15 ausreicht. Durch eine „schärfere“ Anpassung der Schwellwerte werden jedoch natürliche Varianzen der Signaturen nicht mehr genügend abgefangen. Somit ergeben sich die Werte zu 50 und 40 als Kriterium. Zusätzlich wird die Klasse *GANZJÄHRIG* ausgeschlossen.

Die Erbse stellt in der Klasse *EINJÄHRIG* eine Sonderrolle dar. Sie hat wegen ihrer frühzeitigen Ernte schon zum 1. August ein Bodensignal. Daher wurde die zusätzliche Regel *ein-kurzzeit* eingeführt. Mit einem NDVI kleiner 0.2 im Frühjahr und einem NDVI größer 0.2 zum 9. Juni konnte die Regel die Erbsenflächen richtig zuordnen. Die allgemeine Regel beinhaltet einen NDVI kleiner 0.15 im Frühling und einen NDVI größer 0.15 im Spätsommer.

Dieses einfache Modell ist nicht nur für diese spezielle Anwendung verwendbar. Sollen Wald- und Wiesenflächen genauer untersucht werden oder sind Wasser-, Straßen-, Wohn- und Industrieflächen von Interesse kann dieses Grobmodell eine Vorklassifizierung durchführen. Auch zur Extraktion von Feldgrenzen ist ein Einsatz denkbar.

### 5.3.2 Modell zur Feintrennung

Die Trennung der unterschiedlichen Fruchtarten ist das Ziel dieser Arbeit. Zur Aufstellung der Unterscheidungskriterien werden die Erkenntnisse aus Kapitel 4 verwendet. Auf Grundlage des Vergleiches sollen für die 5 Pflanzenarten, die in beiden

Datensätzen vorkommen, nur die „verifizierten Kriterien“ eingehen. Diese sollten zwar die 5 Arten untereinander trennen, durch die zusätzlichen Oberflächen sind jedoch weitere Kriterien zu verwenden. Die Abbildung 5.4 zeigt das implementierte Modell.

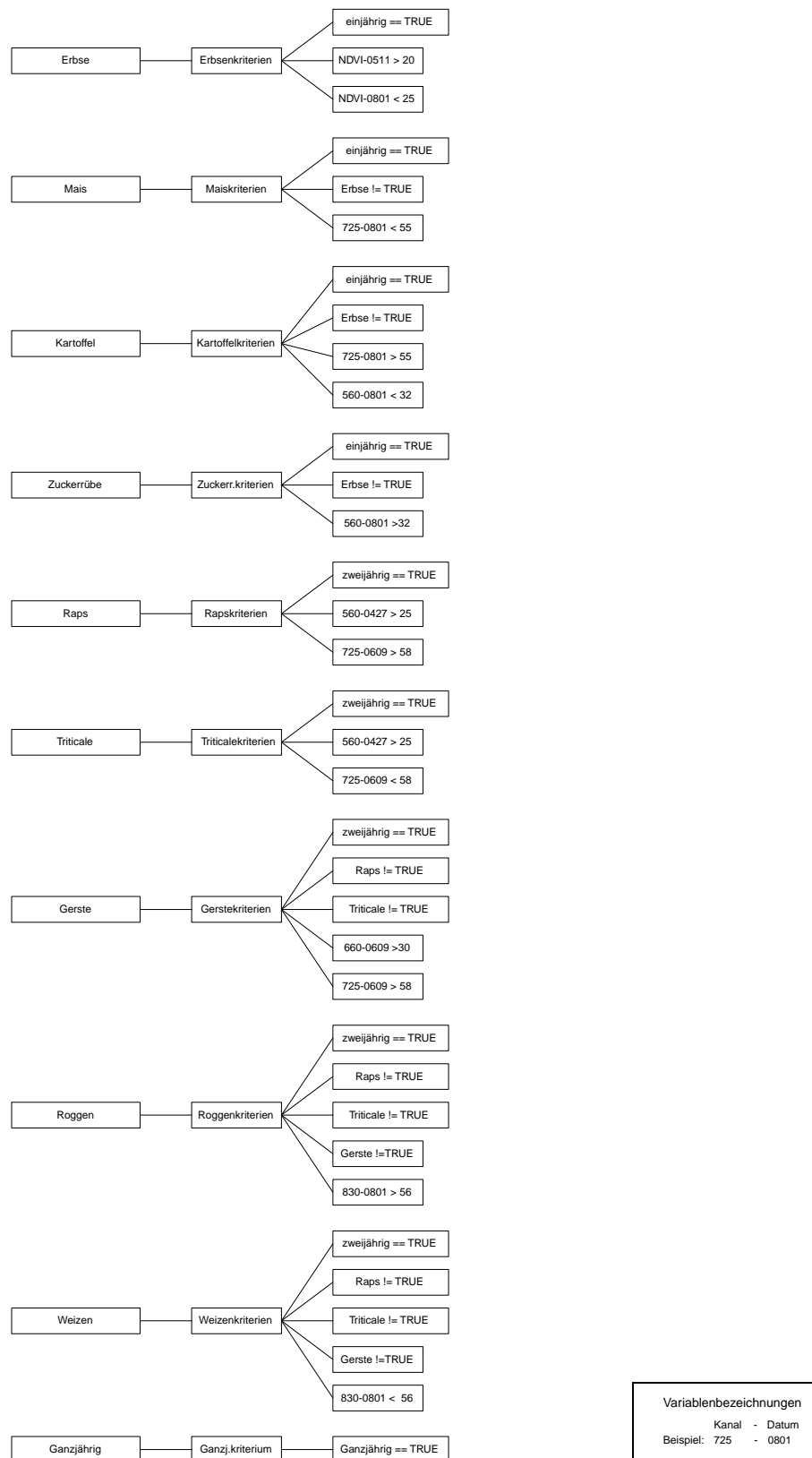


Abbildung 5.4: Modell zur Feintrennung

Alle einjährigen Pflanzen besitzen das Kriterium (Variable) *einjährig*==*TRUE*, zweijährige Pflanzen *zweijährig*==*TRUE*. Diese Kriterien beinhalten das Ergebnis aus dem Grobmodell. Wie zu erkennen ist, kann die Erbse immer noch durch den NDVI separiert werden. Um eine höhere Sicherheit zu erreichen, werden die NDVI zu 2 Zeitpunkten verwendet. Ansonsten verläuft die Trennung nach dem Schema aus der Bewertung in Kapitel 4.5.2. Die Gruppe der zweijährigen Pflanzen wird, wie in Kapitel 4.4 beschrieben, getrennt. Bei Triticale als zusätzliche Pflanze ist nur die leicht erhöhte Reflexion im Frühjahr bei 560 nm als Kriterium verwendbar. Es sei darauf hingewiesen, dass für die Ausschlusskriterien (False/True Kriterien) Wahrscheinlichkeiten von 0.95 angegeben werden. Die Wahrscheinlichkeiten der zusätzlichen Kriterien wird mit 0.5 festgelegt. Eine Optimierung dieser Werte kann das Modell sicherlich noch geringfügig verbessern, sollte aber nicht Gegenstand dieser Arbeit sein.

Die Schwierigkeit der Abgrenzungsproblematik liegt bei der Wahl der Schwellwerte. Es wird versucht, diese durch Sichtung der dargestellten Spektralsignaturen zu erhalten. Durch mehrfaches rechnen des Modells mit leicht veränderten Werten und Überprüfung des Ergebnisses wird iterativ die Feinanpassung vorgenommen. Daraus ergeben sich die in der Abbildung 5.4 dargestellten Werte.

Die Zielsetzung der Übertragbarkeit und Automation von Klassifizierungsmodellen ist noch nicht gegeben. Aus diesem Grund soll versucht werden, die Schwellwerte aus den bekannten Flächen in den verwendeten Kombinationen durch eine unüberwachte Klassifikation zu erhalten. Dies geschieht wie folgt:

1. Extraktion und Übertragung des zu untersuchenden Kanals an dem entsprechenden Tag in ein neues Bild mit der Subset-Funktion von ERDAS.
2. Auswahl der AOI zweier Fruchtarten, dessen Kriterien in diesem Kanal zur Unterscheidung dient.
3. Durchführung der unüberwachten Klassifikation mit zwei Klassen im AOI.
4. Entnahme des Schwellwertes aus der Klassifikationsstatistik.

Damit können neue Schwellwerte berechnet werden. Tabelle 5.1 zeigt die Ergebnisse in Gegenüberstellung mit der manuelle Anpassung.

Mit diesen Werten wird das Modell neu gerechnet. Die Ergebnisse der Klassifikation mit den manuellen Schwellwerten und mit der „automatischen“ Extraktion der Schwellwerte sind in Kapitel 6.1 beschrieben.

Kombination	Tag	Kanal	Schwellwert	
			manuell	„automatisch“
Mais Kartoffel	213	725	55	<b>62</b>
Kartoffel Zucker	213	560	32	<b>33</b>
Raps Triticale	160	725	58	<b>57</b>
Roggen Weizen	213	830	56	<b>52</b>
Gerste Roggen	160	660	30	<b>36</b>
Gerste Weizen	160	660	30	<b>29</b>
Triticale Roggen	117	560	25	<b>26</b>
Triticale Weizen	117	560	25	<b>23</b>

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Schwellwertextraktion

## 5.4 Maximum-Likelihood

Als gängiges Verfahren wird häufig in der überwachten Klassifikation nach der *Maximum-Likelihood* Methode gearbeitet. Zum Vergleich mit den Ergebnissen der in dieser Arbeit entwickelten Methode wird auch hier mit den Bilddaten eine Klassifikation nach diesem Verfahren durchgeführt. Die Methode liefert nur vernünftige Ergebnisse, wenn die Pixelwerte einer Klasse in den Kanälen **normalverteilt** sind. Dazu werden für jede Oberflächen Histogramme erstellt und auf ihre Normalverteilung geprüft. Die Normalverteilung kann bestätigt werden.

Zur weiteren Verarbeitung müssen die 4 Bilder mit je 5 Kanälen zu einem Bild mit 20 Kanälen zusammengeführt werden. Mit der Subset-Funktion in ERDAS ist dies leicht möglich. Das Verfahren ist in 4 Schritte unterteilt:

1. Auswahl und Bewertung der Trainingsgebiete je Klasse.
2. Bestimmung der spektralen Signaturen der Klassen.
3. Klassifikation des gesamten Untersuchungsgebietes.
4. Qualitätsanalyse und Nachbearbeitung des Ergebnisses

Benötigt werden Trainingsgebiete, aus denen spektrale Signaturen extrahiert werden können. Sämtliche Signaturen sind mehrdimensional, also als Vektoren, zu interpretieren. Bei der Auswahl dieser Gebiet ist darauf zu achten, möglichst oberflächentypische und homogene Flächen zu verwenden. Hier werden einzelne Schläge verwendet, die nach optischem Augenschein diese Kriterien erfüllen. Mit dem Signatureneditor

werden für alle 10 zu klassifizierenden Oberflächenarten Spektralsignaturen aus den gewählten Trainingsgebieten extrahiert. Im Klassifikationsprozess finden die Signaturen und das Bild mit den 20 Kanälen Eingang. Mit der Wahl eines Ausgabebildes wird die Klassifikation automatisch durchgeführt. Das Ergebnis ist wieder ein farbiges Bild, in welchem jeder Klasse eine Farbe zugeordnet ist. Da sich die Auswahl der Trainingsgebiete entscheidend auf das Ergebnis auswirkt, wird mit verschiedene Kombinationen der Trainingsgebiete eine Klassifikation vorgenommen. Durch den Vergleich zu den Referenzdaten werden die Signaturen gewählt, die die höchste Genauigkeit der Klassifikation ergeben. Die Ergebnisse sind in Kapitel 6.1 aufgeführt.

# Kapitel 6

## Klassifikationsergebnisse

### 6.1 Genauigkeiten der Modelle

Das Ergebnis der Klassifikationsmodelle sind georeferenzierte Farbbilder. Jeder Klasse ist eine Farbe zugeordnet, die im Knowledge Classifier der Klasse angegeben werden kann. Für die 2 Modelle entstanden somit auch 2 Ausgabebilder. In diesen Bildern können jetzt die prozentualen Genauigkeiten der Erkennung der untersuchten Oberflächen untersucht werden. Dazu wird für jeden AOI die Gesamtzahl der Pixel und die Pixel zu jeder Klasse berechnet. Mit Formel 6.1 berechnet man die prozentuale Genauigkeit.

$$\text{Prozentuale Genauigkeit} = \frac{\text{Pixel einer Klasse}}{\text{Gesamtzahl Pixel}} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

Das Grobmodell beinhaltet 4 Ausgabeklassen. Die AOI der einjährigen beziehungsweise zweijährigen Pflanzen werden zusammengefasst und damit die statistische Auswertung durchgeführt. Es ergeben sich in Tabelle 6.1 dargestellten Ergebnisse.

als Pixelanzahl	Einjährig	Zweijährig	Ganzjährig	Sonstiges	Gesamt
Einjährig	678648	304	1024	3308	683284
Zweijährig	2315	672608	4877	171	679971
Ganzjährig	10913	8652	35898	4522	59985
in Prozent					
Einjährig	<b>99,321</b>	0,044	0,150	0,484	
Zweijährig	0,340	<b>98,917</b>	0,717	0,025	
Ganzjährig	18,193	14,424	<b>59,845</b>	7,538	

Tabelle 6.1: Ergebnisse des ersten Modells

Die Zeilen stellen die untersuchten AOI dar, die Spalten die Ergebnisse der jeweiligen Klassen in diesen AOI. Die Diagonalelemente im ersten Block der Tabelle 6.1 bezeichnet die zu dieser Klasse richtig erkannten Pixel. Im zweiten Block ist der prozentuale Anteil zur Gesamtanzahl dargestellt. Mit einer richtigen Erkennung von ca. 99% bei den Klassen *EINJÄHRIG* und *ZWEIJÄHRIG* wurde ein sehr gutes

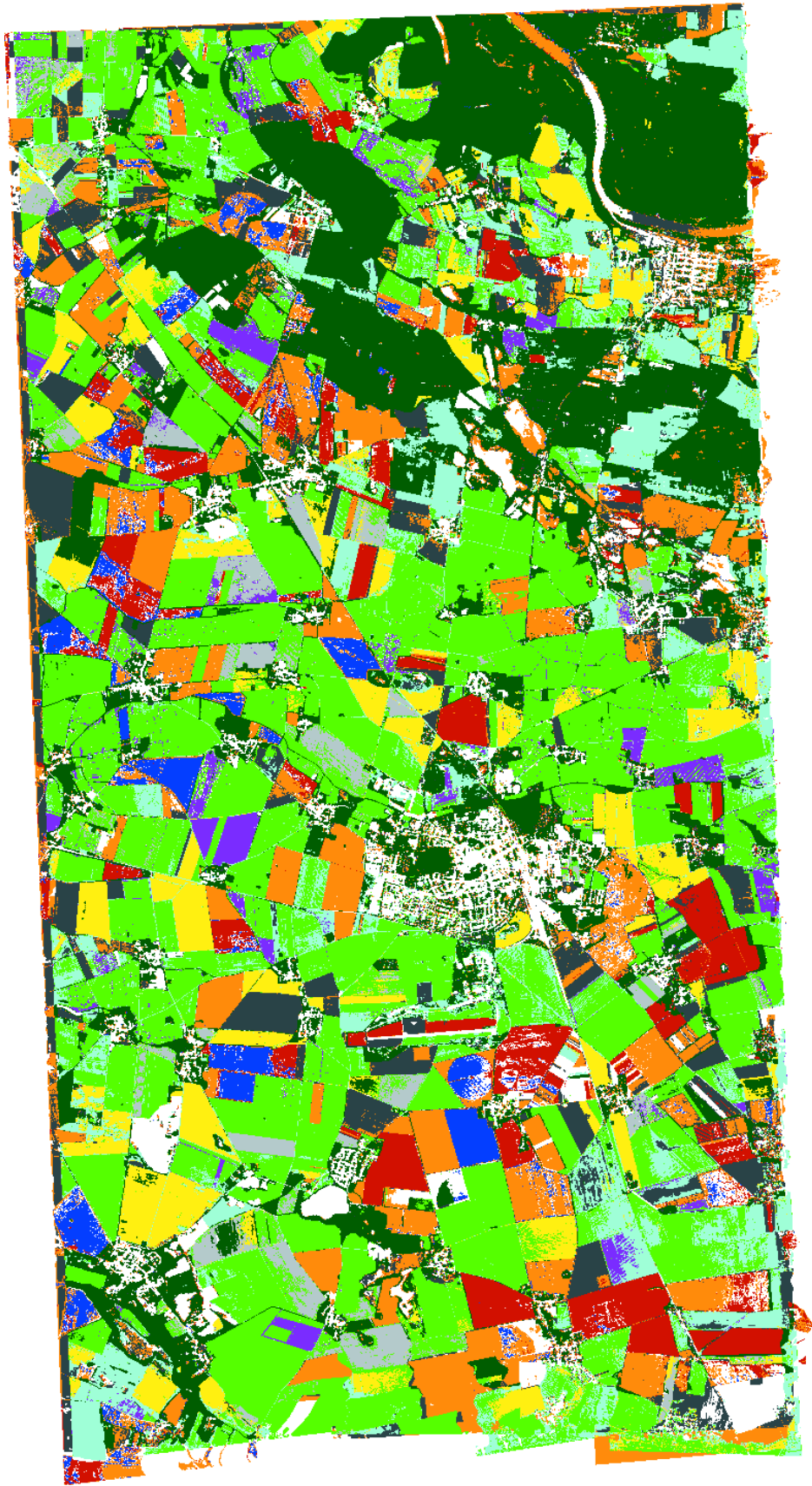
Ergebnis erreicht. In der Klasse *GANZJÄHRIG*, die als Referenzflächen die Stilllegungsflächen darstellen, konnte nur eine Genauigkeit von ca. 60% erreicht werden. So wird ca 18% als *EINJÄHRIG* und ca. 14% als *ZWEIJÄHRIG* klassifiziert.

Das Ergebnis des Grobmodells geht nun in die Klassifikation ein. Das Feintrennungsmodell ergibt ein Ausgabebild mit 10 Farben für die klassifizierten Fruchtarten und *Weiß* für unklassifizierte Pixel. Die Abbildung 6.1 zeigt die Farbzugeordnungen zu den Fruchtarten. Die Abbildung 6.2 stellt das Klassifikationsergebnis für das gesamte Aufnahmegebiet als Farbgrafik dar.

	Erbse		Wintergerste
	Mais		Winterweizen
	Kartoffel		Winterroggen
	Zuckerrübe		Ganzjährig
	Raps		Sonstiges
	Tritikale		

Abbildung 6.1: Farbzugeordnungen im Ausgabebild





*Abbildung 6.2: Klassifikationsergebnis des Feinmodells*

Wie im ersten Modell wird auch hier die statistische Berechnung (Zählung) durchgeführt. Aus dieser Berechnung ergeben sich damit  $10 \cdot 11 = 110$  Werte, die in den Tabellen 6.2 und 6.3 dargestellt sind. Sie stellen die Genauigkeit in Prozent dar.

	unklassifiziert	Erbse	Mais	Kartoffel	Zucker
Erbse	1,195	<b>87,139</b>	10,293	0,154	1,159
Mais	3,571	0,069	<b>91,307</b>	4,825	0,166
Kartoffel	8,456	1,806	19,596	<b>62,953</b>	7,086
Zucker	15,055	0,019	0,427	8,920	<b>75,351</b>
Raps	0,003	0,491	0,047	0,001	0
Triticale	2,846	0,062	0	0	0
Gerste	0,758	0,002	0,001	0	0
Roggen	0,661	1,168	0,007	0	0
Weizen	0,424	0,108	0,001	0	0
Ganzjährig	6,707	8,852	8,939	0,055	0,310

Tabelle 6.2: Ergebnisse des Feinmodells - Teil 1

Unter den einjährigen Pflanzen ist eine Genauigkeit von ca. 90% von Erbse und Mais erreicht worden. Trotz einem recht großen Anteil unklassifizierter Pixel bei der Zuckerrübe und der Kartoffel sind 75% bzw. 62% richtig erkannt worden. Dies weist darauf hin, dass das Modell noch nicht optimal implementiert ist. Außerdem scheint die Trennung von Kartoffel und Mais zu Gunsten von Mais zu verlaufen.

	Raps	Triticale	Gerste	Roggen	Weizen	Ganzjährig
Erbse	0,002	0,002	0	0	0	0,0544
Mais	0	0	0	0	0	0,061
Kartoffel	0	0,027	0	0	0,0027	0,074
Zucker	0,002	0,007	0	0,001	0,001	0,217
Raps	<b>82,069</b>	10,153	0	0,001	7,102	0,133
Triticale	0,219	<b>24,881</b>	0,004	17,281	53,912	0,794
Gerste	4,095	1,860	<b>73,115</b>	10,065	9,641	0,463
Roggen	0,007	0,594	0,005	<b>93,625</b>	3,598	0,335
Weizen	0,150	8,168	0	1,273	<b>89,405</b>	0,471
Ganzjährig	0,107	12,756	0	0	0,098	<b>62,175</b>

Tabelle 6.3: Ergebnisse des Feinmodells - Teil 2

Bei den zweijährigen Pflanzen wurden nur Roggen und Weizen mit ca 90% gut erkannt. Weniger optimal sind die Werte von Raps und Gerste. Letzteres ist teilweise als Roggen und Weizen fehlinterpretiert. Die Triticale als Mischform wurde größtenteils als Weizen oder Roggen klassifiziert. Die Klasse *GANZJÄHRIG* wurde wie im Grobmodell zu ca. 60% richtig erkannt. Hauptfehleranteile liegen bei Erbse, Mais und vor allem bei Triticale. Der Grund könnte das Aufgehen von verlorenem Saatgut des Vorjahres sein.

Als ein Maß für die Gesamtgenauigkeit einer Klassifikation bietet sich der „Cohen's Kappa Index“ an. Dazu wird eine beliebige Anzahl an zufälligen Punkten im Klassifikationsbild gewählt. Mit Hilfe der Referenzdaten der Flächen wird wiederum eine Errormatrix gebildet. Die Elemente der Matrix beinhalten die Zuordnungen der Klassenwerte der Pixel. In den Diagonalelementen stehen somit die Anzahl der richtig klassifizierten Pixel. Der Index berechnet sich dann mit Formel 6.2.

$$Kappa - Index = \frac{d - q}{N - q} \quad (6.2)$$

mit

- d - Summe der Punkte in der Diagonalen der Errormatrix
- N - Gesamtzahl der Punkte
- q - Anzahl der erwarteten Punkte in der Diagonalen

Die Variable q berechnet sich nach:

$$q = \frac{\sum (\sum Zeile \cdot \sum Spalte)}{N} \quad (6.3)$$

Die Berechnung des Kappa-Index ist als Funktion in ERDAS integriert. Für das Ergebnis des Feinmodells werden 50 Punkte automatisch gewählt. Mit Hilfe der Referenzdaten werden zu den Punkten die tatsächlichen Klassen zugeordnet und das Ergebnis berechnet. Es ergibt sich eine Gesamtgenauigkeit der Klassifikation von 60%.

Weiterhin ist die Frage zu stellen, ob die Genauigkeit der Klassifikation schlag<sup>1</sup>- oder regionsabhängig ist. Mit Hilfe von Bodendaten könnten Zusammenhänge entdeckt werden. Ebenfalls wäre eine Karte von Korrekturwerten einer Atmosphärenkorrektur zum Vergleich interessant. Die Abbildung 6.3 zeigt die schlagweise Genauigkeit in Prozent. Auffällig ist eine Häufung geringer Klassifikationsgenauigkeit im nördlichen Bildausschnitt.

---

<sup>1</sup>zusammenhängende Fläche einer Fruchtart

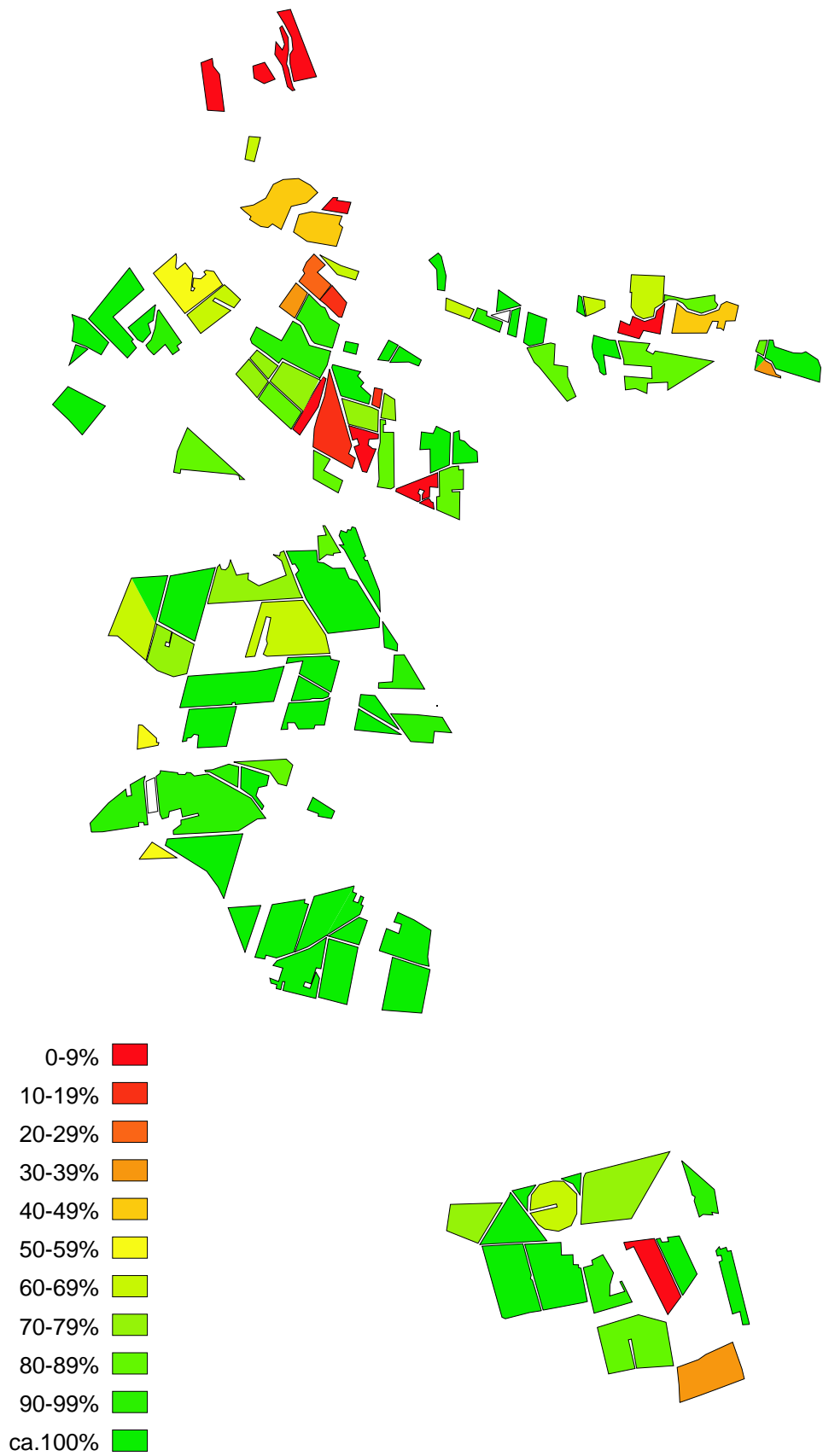


Abbildung 6.3: Schlagweise Genauigkeit in Prozent

Das Ergebnis des Feinmodells soll mit den Ergebnissen der überwachten Klassifikation mit der **Maximum-Likelihood**-Methode verglichen werden. Ebenfalls wird eine Errormatrix aufgestellt. Da jedes Pixel einer Klasse zugeordnet ist, wird die Spalte *unklassifiziert* mit null angesetzt. Die Tabellen 6.4 und 6.5 stellen die Errormatrix dar.

	unklassifiziert	Erbse	Mais	Kartoffel	Zucker
Erbse	0	<b>31,933</b>	2,118	0,057	0
Mais	0	0	<b>59,203</b>	4,646	30,385
Kartoffel	0	0,001	8,738	<b>34,134</b>	53,188
Zucker	0	0	10,526	24,141	<b>62,078</b>
Raps	0	0,0262	0	0,014	0,007
Triticale	0	0	0,001	0,001	0
Gerste	0	0	0	0	0
Roggen	0	0	0	0	0
Weizen	0	0	0	0,002	0,001
Ganzjährig	0	1,739	0,043	0	2,951

Tabelle 6.4: Ergebnisse mit der Maximum-Likelihood Klassifikation - Teil 1

	Raps	Triticale	Gerste	Roggen	Weizen	Ganzjährig
Erbse	1,204	0	0	1,186	0	63,502
Mais	0,007	0	0	0,034	0,001	5,723
Kartoffel	0,013	0	0	0,829	0,020	3,078
Zucker	0,001	0	0	0,001	0	3,254
Raps	<b>97,992</b>	0,004	0,008	0	0,055	1,893
Triticale	2,334	<b>24,303</b>	0,021	42,994	29,016	1,329
Gerste	0,963	0,886	<b>86,530</b>	4,298	3,136	4,187
Roggen	0,010	0,488	0,008	<b>96,134</b>	3,068	0,293
Weizen	0,007	7,080	0,100	10,082	<b>79,757</b>	2,970
Ganzjährig	0,210	0,008	0	0,380	0,113	<b>94,555</b>

Tabelle 6.5: Ergebnisse mit der Maximum-Likelihood Klassifikation - Teil 2

Auffällig ist die recht ungenaue Klassifizierung der einjährigen Pflanzen. Die Erbsenflächen wurden hauptsächlich der Klasse *GANZJÄHRIG* zugeordnet. Mais und Kartoffel sind zum Großteil als Zuckerrübe klassifiziert, die Zuckerrübe als Mais und Kartoffel erkannt worden. Die zweijährigen Pflanzen wurden mit Ausnahme der Triticale gut erkannt. Erstaunlich ist die sehr gute Erkennung der Stilllegungsflächen, also der Klasse *GANZJÄHRIG*.

Mit den automatisch extrahierten Schwellwerten wird das Feinmodell nochmals durchgerechnet. Weiterhin soll versucht werden durch Nachbearbeitung des Ergebnisses des Feinmodells mit einem Nachbarschaftsalgorithmus eine Verbesserung zu erzielen. Dazu wird eine 7 x 7 Pixel große Gleitmatrix über das Bild bewegt. Die Neuordnung eines Pixels erfolgt einfach durch die **Majorität** (Mehrheit) der in

den 49 Matrixpixeln vorhandenen Klassenzuordnungen. Dies führt zur Eliminierung von kleineren Störbereichen innerhalb eines Schlags. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.6 zusammengestellt. Die Verbesserung des Feinmodelles mit der Gleitmatrix liegt

	Feinmodell [%]	Feinmodell mit Gleitmatrix [%]	Automatische Schwellwerte [%]	Maximum Likelihood [%]
Erbse	87,139	88,217	87,139	31,933
Mais	91,307	93,740	99,532	59,203
Kartoffel	62,953	65,960	54,481	34,134
Zucker	75,351	80,057	60,156	62,078
Raps	82,069	84,479	83,794	97,992
Triticale	24,881	25,367	24,522	24,303
Gerste	73,115	75,684	63,481	86,530
Roggen	93,625	95,854	95,875	96,134
Weizen	89,405	90,913	85,442	79,757
Ganzjährig	62,175	63,628	62,176	94,555

Tabelle 6.6: Zusammenstellung der Ergebnisse

in einer Größenordnung von 1-5%. Die Ergebnisse des Feinmodells mit den extrahierten Schwellwerten sind im Durchschnitt ungenauer. Besonders die Zuckerrübe, die Kartoffel und die Gerste sind schlechter erkannt. Das zeigt, dass die spektrale Trennbarkeit durch die unüberwachte Klassifikation in den beobachteten Kanälen nicht optimal ist. Eine starke Verbesserung zeigt sich nur bei Mais.

## 6.2 Vorgehensweise und Ergebnisse der Firma RapidEye

Um eine gewisse Bewertung vornehmen zu können, sollen die erhaltenen Ergebnisse mit denen der Firma RapidEye verglichen werden. Im Gegensatz zu dieser Arbeit arbeitet die Firma zu Testzwecken mit einer Kombination aus unüberwachter und überwachter Klassifizierung. Dabei dienen ebenfalls alle Bilder zu den 4 Zeitpunkten als Ausgangsmaterial. Zu den hier untersuchten landwirtschaftlichen Flächen wurden zusätzlich Sommerweizen, Sommergerste, Gemüse, nachwachsende Rohstoffe, Grünland und Stilllegungsflächen beobachtet. Die Stilllegungsflächen stellen in dieser Arbeit die Klasse *GANZJÄHRIG* dar. Es ist zu vermuten, das Grünland im Trennungsmodell als diese Klasse erkannt wird. Eine nähere Untersuchung wurde jedoch nicht durchgeführt. Die unüberwachte Klassifikation wurde dahingehend erweitert, dass a-priori Informationen über Häufigkeiten der vorkommenden Fruchtarten eingehen. Ebenfalls wurde das **Tasseled Cap Verfahren**, eine Art Hauptkomponentenanalyse, eingesetzt. Damit konnten Einflüsse unterschiedlicher Feuchtigkeiten reduziert werden. Zu diesem Verfahren soll auf Crist und Cicone (1984) verwiesen werden. Die Klassifikation wurde mit einer Klassenanzahl von 50 und 100 durchgeführt. Danach wurden mit Hilfe der Referenzdaten (Ground Truth) diese den 15 eigentlichen Klassen zugeordnet, was in etwa einer überwachten Klassi-

fizierung durch Trainingsgebiete entspricht. Zur Untersuchung der Genauigkeitssteigerung wurde das Modell mit allen Kombinationen durchgerechnet. In Anlehnung an das von dieser Arbeit durchgeführte Verfahren wurden auch Ergebnisse **ohne Tasseled Cap** und **ohne a-priori Häufigkeiten** durchgeführt. Eine Gegenüberstellung findet sich in Tabelle 6.7.

	100 Klassen [%]	50 Klassen [%]	Modell dieser Arbeit [%]
Winterweizen	91	88	89
Sommerweizen	100	100	
Winterroggen	100	83	94
Triticale	80	73	25
Wintergerste	100	100	73
Sommergerste	50	17	
Winterraps	100	100	82
Mais	52	60	91
Erbsen	75	50	97
Kartoffeln	56		63
Zuckerrüben	91	91	75
Gemüse	100	100	
Stillegung	62	63	62
Nachw. Rohstoffe	50		
Grünland	100	100	

Tabelle 6.7: Gegenüberstellung der Ergebnisse von RapidEye

Im Vergleich sind sehr gute Ergebnisse bei Wintergerste, Winterraps, Triticale und Zuckerrübe erreicht worden. Das geht aber eindeutig zu Lasten von Mais und Erbse. Bei den Stilllegungsflächen ist ein vergleichbares Ergebnis erzielt worden. Die Problemfruchtarten bei der Klassifikation der Firma RapidEye sind nachwachsende Rohstoffe, Triticale, Kartoffeln und Sommergerste, was durch telefonische Rücksprache in Erfahrung gebracht wurde. Dies konnte mit dieser Arbeit bestätigt werden.

## 6.3 Diskussion und Vorschläge für ein Expertensystem

Die Ergebnisse zeigen eine gute Erkennung der untersuchten Fruchtarten. Die Schwierigkeit oder Herausforderung ist die Abgrenzungsproblematik, ab welchem Grad ähnliche Pixel einer Klasse zugewiesen werden. Dabei werden die Reflexionswerte durch diverse Parameter beeinflusst. Diese sollten in einem Expertensystem<sup>2</sup> beachtet und modelliert werden. Eine mögliche Lösung wird nachfolgend beschrieben.

<sup>2</sup>nach Straß, 1986: Ein Expertensystem ist ein Wissensbasiertes System, welches das Wissen eines qualifizierten Experten für ein bestimmtes Gebiet modelliert und benutzt, um komplexe Probleme eines bestimmten Typs aus dem Gebiet zu lösen.

Wie gezeigt wurde, ist eine Differenzierung landwirtschaftlicher Feldfrüchte mit multitemporalen Bilddaten des RapidEye-Satellitensystems bis zu einem gewissen Grad möglich. Da die Kriterien des Klassifizierungsmodells aus Trainingsgebieten in den Bildern entnommen wurden, ist ein manuelles Eingreifen im Klassifikationsprozess unumgänglich. Ebenfalls müssen Referenzdaten im Untersuchungsgebiet vorliegen. Das Ziel der Klassifizierung von Oberflächen mit satellitengestützten Bilddaten ist jedoch eine weitgehende Automatisierung, die großflächig und kostengünstig durchgeführt werden kann. Die Übertragbarkeit auf andere Gebiete muss ebenfalls gegeben sein. Dabei soll eine akzeptable Genauigkeit für die gestellte Anwendung erreicht werden.

Es stellen sich folgende Fragen:

1. Wie ist eine automatische Erfassung und Geokodierung der Bilddaten möglich?
2. Welche radiometrischen Korrekturverfahren können zur Bildverbesserung angebracht werden?
3. Welche physikalischen und biologischen Einflüsse können modelliert werden?
4. Wie kann die Abgrenzungsproblematik automatisch durchgeführt werden?
5. Zu welchen Zeitpunkten müssen Aufnahmen vorhanden sein?
6. Welche Zusatzinformation dienen zur Verbesserung des Ergebnisses und wie können diese integriert werden?

Die automatische Erfassung und Geokodierung stellt durch die Computertechnologie kein wesentliches Problem dar. Dabei werden Paßpunkte auf der Erdoberfläche oder Geometrieparameter des Aufnahmesystems zur Oberfläche benötigt. Eine Kalibrierung des Satellitensystems kann über entsprechende Referenzmessungen erfolgen. Sie dienen zur Korrektur gerätespezifischer Abweichungen des Aufnahmesystems. Die radiometrischen Korrekturen müssen im speziellen betrachtet werden, da sie die gemessenen Reflexionen maßgeblich beeinflussen. Das geometrische Verhältnis zwischen Aufnahmesystem, Erdoberfläche und Sonne muss durch entsprechende Korrekturen normiert werden. Dies wurde kurz in Kapitel 2.1.3 beschrieben. Ebenfalls muß die Panoramaverzerrung sowie die Hangneigung beachtet werden. Dazu sei auf Kraus *et al.* (1990) verwiesen. Problematischer ist eine Atmosphärenkorrektur, die durch die unterschiedliche Länge des Strahlungsweges und durch Absorptions- und Streuprozesse in der Atmosphäre hervorgerufen wird. Verschiedene Ansätze und Lösungen auf diesem Gebiet sind verfügbar (siehe Bach (1995)).

Die Zeitpunkte der Aufnahmen stellen eine weitere zentrale Rolle dar. Wie gezeigt wurde, ist eine Trennbarkeit der zweijährigen Nutzpflanzen gerade im Frühjahr (April bis Mai), der einjährigen Pflanzen im Spätsommer (Anfang August) gut möglich. Die Besonderheiten einzelner Fruchtarten, wie das Blühen von Raps im Mai oder die frühe Reife von Gerste Ende Juni bis Anfang Juli, kann für die Klassifikation ausgenutzt werden. Hier sind entsprechende Bilddaten aufzunehmen.

Der Einfluß des Klimas, welches die Zeitspanne der Entwicklung der Pflanzen beeinflusst, sollte aber berücksichtigt werden. So ist davon auszugehen, daß zum Beispiel im Süden Deutschlands die Pflanzen einen Entwicklungsvorsprung von bis zu



2 Wochen haben können. Die Zeitpunkte der Daedalusscanneraufnahmen waren gut gewählt. Wünschenswert wären eventuell noch Aufnahmen zu einem späteren Zeitpunkt, z.B. zum Beginn des Herbstes. Eine Untersuchung des Spektralverhaltens der einjährigen Pflanzen und deren Trennbarkeiten könnte interessante Ergebnisse liefern.

Die Zeitpunktwahl ist jedoch immer durch das zur Verfügung stehende Satellitensystem beschränkt. Die Konzeption erfordert die Möglichkeit von Aufnahmen der selben Oberfläche mit einem Abstand von höchstens 2 Wochen, um die erforderlichen Bilddaten zu erhalten.

Ein günstiger Ansatz für ein Expertensystem ist eine Normierung des Reflexionsverhaltens der verschiedenen Fruchtarten. Es muß untersucht werden, wie sich die Einflüsse wie Niederschlag, Bodenart, Klima, Nährstoffversorgung, Schädigungen und Krankheiten in Bezug auf die Spektralsignaturen verhalten. Dies erfordert eine umfangreiche Datenerhebung.

Ein Vorschlag wäre der Aufbau einer umfassenden Datenbank, in der zu gemessenen Reflexionssignaturen die Fruchtart, Entwicklungsstadien, Zeitpunkt, Ort, Bodenart, Überdeckung und Feuchtigkeit, Schädigungen und Krankheiten protokolliert werden. Aus diesen Daten sollten Korrelationen zu den Spektren herstellbar sein. Daraus könnten funktionale Zusammenhänge hergestellt werden, die Basis eines rechnerischen Modells sind. Die Einflußgrößen können nun aus Datenbanken entnommen werden. Beispielsweise liegen deutschlandweit Bodenkarten bei den Landesvermessungsämtern und Niederschlagsdaten beim Deutschen Wetterdienst vor.

Ein weiterführender Ansatz zu Verbesserung der Ergebnisse sind a-priori Informationen der Anbauhäufigkeiten bestimmter Fruchtarten. Beispielsweise ist im Norden Deutschlands die Anbauwahrscheinlichkeit von Wein oder Hopfen nahe Null, in Bayern dagegen recht hoch. Ebenfalls ist die Fruchtfolgebetrachtung eine Möglichkeit Fruchtarten auf bestimmten Schlägen auszuschließen. Dazu sind jedoch Klassifizierungen aus dem Vorjahr notwendig. Ist im Vorjahr auf dem untersuchten Schlag Weizen angebaut worden, kann mit großer Wahrscheinlichkeit ein nochmaliger Anbau von Weizen ausgeschlossen werden.

Führt die Klassifikation zu einem Ergebnis, das auf allen Flächen eine Genauigkeit von über 50% erreicht, können weitergehende Bildverarbeitungsansätze eingesetzt werden. Felder werden durch Hecken, Straßen, Baumreihen und Gräben abgegrenzt. Diese können durch Kantenextraktionsalgorithmen bestimmt werden. Durch Vektorisierung ist eine Möglichkeit gegeben, die Schläge als einheitliche Flächen darzustellen. Durch einen Majoritätsfilter, also der Zuordnung der mehrheitlich vorkommenden Nutzpflanze einer Fläche, ist eine theoretisch hundertprozentige Klassifikation möglich. Mit dieser Information können jetzt Schädigungen, Krankheiten oder Nährstoffmangel innerhalb des Feldbestandes aufgedeckt werden, indem nur die Veränderungen in der Spektralsignatur einer Fruchtart betrachtet werden.

# Kapitel 7

## Zusammenfassung

Diese Arbeit ist ein Beitrag zur Untersuchung der spektralen Trennbarkeit von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen anhand multitemporaler und multispektraler Fernerkundungsdaten. Auf Grundlage von multitemporalen und multispektralen Daedalusscannerdaten der Firma RapidEye und multitemporalen Spektralsignaturen (Schneider, 1994) als Vergleichssignaturen konnte der Zusammenhang zwischen der phänologischen Entwicklung von Pflanzen und deren spektralen Reflexionsverhalten analysiert und das Datenmaterial hinsichtlich seines Informationsgehaltes beurteilt werden.

Aus der Erarbeitung der Grundlagen konnte als Ergebnis der Zusammenhang zwischen der Landwirtschaft und der Fernerkundung hergestellt werden. Die Physiologie der Pflanzen und Einflüsse auf diese wurden im Kontext zu deren Reflexionsverhalten erarbeitet. Mit Hilfe von Referenzdaten (Ground Truth) wurden multitemporale Spektralsignaturen aus Daedalusscannerdaten extrahiert. Die Vergleichssignaturen wurden aufgrund ihrer hohen Spektralaufösung an diese angepasst.

Ziel der Trennbarkeitsanalyse war es, diejenigen spektralen Unterschiede zu finden, die eine Unterscheidung der beobachteten Nutzpflanzen ermöglicht. Dazu wurden Trennbarkeitsanalysen der Signaturen unabhängig voneinander durchgeführt.

Bei der multitemporalen Analyse wurden die Nutzpflanzen auf Grund ihres spektralen Verhaltens zu unterschiedlichen Zeitpunkten in Klassen unterteilt (Kapitel 4.2.2 und 4.3.1). Unter Verwendung dieser Klasseneinteilungen und eines Ausschlussverfahrens war es anschließend möglich, sowohl in den Daten von Dr. Schneider, wie auch in den Spektralsignaturen aus den Scannerdaten eine weitgehende Trennung aller betrachteten Nutzpflanzen durchzuführen. Eine eindeutige Trennung der verschiedenen Nutzpflanzen anhand der Spektralsignaturen nur eines Beobachtungszeitpunktes (monotemporal) war nicht möglich. Ziel des Vergleiches beider multitemporaler Spektralsignaturen war es, spektrale Kenngrößen zu finden, die möglichst unabhängig von lokalen Einflüssen sind. Die gefundenen Kenngrößen haben die Eigenschaft, scheinbar unabhängig vom Klima, der Bodenart oder der Atmosphäre zum Zeitpunkt der Aufnahmen zu sein. So war zum Beispiel die Blüte von Raps im Mai oder die frühe Reife von Wintergerste im Spektrum beider Datensätze zu erkennen.

---

Die gefundenen Erkenntnisse aus der Trennbarkeitsanalyse wurden anhand eines vom Diplomanden implementierten Klassifikationsmodell überprüft. Auf Basis einer überwachten Klassifikation nach der hierarchischen und parallelepiped Methode wurden zwei Modelle erstellt, die zur Klassifikation der Daedalusscannerdaten dienten. Ein Grobmodell, welches Wald- und Wiesenflächen, bebaute und landwirtschaftliche Flächen klassifizieren kann, diente zur Vortrennung. Die landwirtschaftlichen Flächen konnten in diesem Modell in einjährige und zweijährige Pflanzen unterteilt werden. Dabei ergab sich eine Genauigkeit der Klassifikation dieser Flächen von circa 99%.

Die Ergebnisse des Grobmodells fanden Eingang zur Trennung der landwirtschaftlichen Nutzpflanzen im Feinmodell. Die Schwierigkeit lag dabei in der Wahl der Schwellwerte in den entsprechenden Kanälen. Es wurden Werte aus den Differenzen der Spektralsignaturen verschiedener Nutzpflanzen verwendet, sowie Schwellwerte die aus einer unüberwachten Klassifikation mit Trainingsgebieten entnommen wurden. Zur Überprüfung des Feinmodells wurde eine überwachte Klassifikation mit der Maximum-Likelihood-Methode durchgeführt. Die Wahl der Trainingsgebiete erwies sich als schwierig, da Schläge gleicher Nutzungsart große spektrale Streuungen zeigten.

Die Ergebnisse wurden in Kapitel 6 gegenübergestellt und diskutiert. Die Klassifikation von Triticale, Kartoffel und Stilllegungsflächen (ganzjährige Vegetation) erwies sich im Allgemeinen als problematisch. Im Feinmodell konnten nur Genauigkeiten zwischen 25% und 63% erreicht werden. Die höchsten Genauigkeiten mit circa 90% wurden bei Winterroggen, Winterweizen, Mais und Erbse erzielt.

Die Ergebnisse des Feinmodells mit Schwellwerten aus der unüberwachten Klassifikation zeigten nur geringe Abweichungen zu denen mit manuell ermittelten Schwellwerten erzielten. Die Ergebnisse der Maximum-Likelihood-Methode zeigten im Gegensatz zu denen des Feinmodells, besonders bei den einjährigen Nutzpflanzen, wesentlich schlechtere Klassifikationsergebnisse. Vermutlich liegt dabei das Problem in der Wahl der Trainingsgebiete.

Ein Versuch das Ergebnisbild des Feinmodells mit Hilfe einer Gleitmatrix mit Majoritätskriterium zu verbessern, ergab eine zusätzliche Genauigkeitssteigerung von 1-5% der Klassifizierung der Nutzpflanzen.

In einem anschließenden Ausblick wurde unter Verwendung der erarbeiteten Grundlagen und der Erkenntnisse der Trennbarkeitsanalyse ein Expertensystem vorgeschlagen, welches die Integration von Sekundärinformationen ermöglicht. Dazu wurden zentrale Fragestellungen diskutiert und Lösungsansätze aufgezeigt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit den verfügbaren multitemporalen Daten eine Lösung des Trennbarkeitsproblems erarbeitet werden konnte. Der Lösungsansatz besitzt jedoch noch Potential weiterer Genauigkeitssteigerungen. Auf die Verwendung von Ground Truth-Daten konnte noch nicht verzichtet werden. Somit ist das zentrale Problem der weitgehenden Automation noch nicht gelöst und bedarf weiterer Untersuchungen.

# Literaturverzeichnis

- Albertz, J. (1991). *Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Eine Einführung in die Fernerkundung*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Bach, H. (1995). *Die Bestimmung hydrologischer und landwirtschaftlicher Oberflächenparameter aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten*. Birkenhauer, München, GEOBUCH-Verlag.
- Bachthaler, G. (1992). *Pflanzliche Erzeugung-Die Landwirtschaft-Lehrbuch für Landwirtschaftsschulen*. Verlagsgesellschaft mbH, München, 10. Auflage.
- Clevers, J. (1991). *A framework for monitoring crop growth by combining directional and spectral remote sensing information*. *Remote Sens. Environ.* Remote Sens. Environ., 50 Auflage.
- Crist, E. und Cicone, C. (1984). *A Physically Based Transformation of TM Data. The TM Tasseled Cap.- IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Ge-22, h.6, 256- 263 Auflage.
- Deering, D. (1992). *Prairie Grassland Bidirectional Reflectance Measured by Different Instruments at the FIFE Site*, number D17 in 97.
- Guyot, G. und Baret, F. (1991). *Potentials and limits of vegetation indices*. *Envir.*35.
- Kimes, D. und Kirchner, J. (1981). *Modelling the Effects of Various Radiant Transfers in Mountainous Terrain on Sensor Response*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, ge-19/2 Auflage.
- Kraus, K., Jansa, J., und Schneider, W. (1990). *Fernerkundung Band2 - Auswertung photographischer und digitaler Bilder*. Dümmler, Bonn, 6. Auflage.
- Kriebel, K. (1976). *On the determination of the atmospheric air light as a normally underestimated perturbation signal*. *Atmosph. Env.* 10.
- Landauer, G. und Voß, H.-H. (1989). *Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung*. Oberpfaffenhofen.
- Lang, S. und Blaschke, T. (1998). <http://www.sbg.ac.at/geo/student/fernerkundung/>.
- Schneider, D. T. (1994). *Möglichkeiten und Grenzen der spektralen Trennbarkeit ackerbaulicher Oberflächentypen - eine Abschätzung anhand spektroskopischer Untersuchungen über die Vegetationsperiode*. Mangstl, München, 4. Auflage.

Stober, F. (1989). *Reflexionsspektren von unterschiedlich gefärbten Pflanzengeweben*. Diplomarbeit am Botanischen Inst. der Uni. Karlsruhe.

Zadoks, J., Chang, T., und Konzak, C. (1974). *A decimal code for the growth stages of cereals*. Weed Research.

# Anhang A

## Inhalt der beiliegenden Datenträger

## A.1 Gesamtinhalt

In den Tabellen A.1 und A.2 sind die Inhalte der Datenträger unter Angabe des Dateipfades zusammengestellt und mit kurzen Anmerkungen erläutert.

*Tabelle A.1: Grobe Inhaltsangabe des beiliegenden Datenträgers Nr.1*

<b>Dateipfad des Datenträgers</b>	<b>Inhalt</b>
\Bilddaten	Originalbilddaten der Firma RapidEye vom 27. April und 11. Mai
\DiplArbeit	Die Diplomarbeit im Postscript-Format und PDF-Format.
\Schneider	Rohdaten der Dissertation von Dr. Schneider und Datenbankprogramm
\Schneider-Excel	Bearbeitete Rohdaten
\Bilder-Excel	Extrahiere Spektralsignaturen und sonstige Dateien

*Tabelle A.2: Grobe Inhaltsangabe des beiliegenden Datenträgers Nr.2*

<b>Dateipfad des Datenträgers</b>	<b>Inhalt</b>
\Bilddaten	Originalbilddaten der Firma RapidEye vom 9. Juni und 1. August
\DiplArbeit-Tex	Die Diplomarbeit im Latex-Format mit Bildern
\ERDAS-Modelle	Die in ERDAS implementierten Modelle und sonstige Dateien
\Ground-Truth	Referenzdaten für die Bilddaten als ArcInfo-Dateien
\Vortrag	Powerpoint-Vorlage des Vortrages zur Diplomarbeit im März 2001

# Dank

Einen herzlichen Dank an Dipl.-Ing. Peter Lohmann und Dipl.-Ing. Kian Pakzad für ihre Betreuung und fachlichen Ratschläge bei der Bearbeitung, sowie den Mitarbeitern der Firma RapidEye für ihre Unterstützung.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern für ihre liebevolle Unterstützung während meiner gesamten Studienzzeit.

Meinen Freunden Mark, Markus und Sabrina, danke ich für ihre Geduld bei der Beseitigung sprachlicher und optischer Fehlleistungen.