

**Aus dem Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde**

**Holger Lilienthal**

**Entwicklung eines bodengestützten  
Fernerkundungssystems für die Landwirtschaft**

Manuskript, zu finden in [www.fal.de](http://www.fal.de)

Published as: Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 254

**Braunschweig  
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)  
2003**

**Sonderheft 254**  
**Special Issue**



**Landbauforschung**  
Völkensrode  
**FAL Agricultural Research**

**Entwicklung eines bodengestützten  
Fernerkundungssystems für die Landwirtschaft**

**Holger Lilienthal**



## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abbildungsverzeichnis .....	III
Tabellenverzeichnis .....	V
<b>1</b> <b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b> <b>GRUNDLAGEN DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN FERNERKUNDUNG</b> .....	<b>8</b>
2.1 <i>Reflexionseigenschaften von Böden</i> .....	8
2.2 <i>Reflexionseigenschaften von Einzelpflanzen</i> .....	13
2.3 <i>Reflexionseigenschaften von Pflanzenbeständen</i> .....	21
<b>3</b> <b>MATERIAL UND METHODEN</b> .....	<b>26</b>
3.1 <i>Standortbeschreibung</i> .....	26
3.2 <i>Das Aufnahmesystem LASSIE</i> .....	30
3.2.1 <i>Komponentenauswahl</i> .....	31
3.2.1.1 <i>Sensoreinheit</i> .....	33
3.2.1.2 <i>Positionierungseinheit</i> .....	36
3.2.1.3 <i>Einheit zur Datenerfassung</i> .....	37
3.2.1.4 <i>Archiv- und Auswerteeinheit</i> .....	39
3.2.2 <i>Geometrische Eigenschaften</i> .....	40
3.2.3 <i>Spektrale Eigenschaften</i> .....	44
3.2.4 <i>Standortwahl</i> .....	51
3.3 <i>Bildverarbeitung</i> .....	58
3.3.1 <i>Geometrische Korrektur</i> .....	58
3.3.1.1 <i>Nahbereichsphotogrammetrie</i> .....	58
3.3.1.2 <i>Feldvermessung</i> .....	63
3.3.2 <i>Radiometrische Korrektur</i> .....	64
3.3.2.1 <i>Reflexionsnormierung</i> .....	64
3.3.2.2 <i>Kamerakalibrierung</i> .....	67

<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE.....</b>	<b>71</b>
4.1	<i>Eigenschaften und Leistungen des LASSIE-Systems.....</i>	<i>71</i>
4.1.1	<i>Geometrie .....</i>	<i>71</i>
4.1.2	<i>Radiometrie .....</i>	<i>79</i>
4.1.3	<i>Aufnahme dynamischer Karten.....</i>	<i>83</i>
4.2	<i>Informationsgehalt bodennaher Fernerkundung.....</i>	<i>85</i>
4.3	<i>Fallstudien mit bodennaher Fernerkundung .....</i>	<i>88</i>
4.3.1	<i>Bewässerung.....</i>	<i>88</i>
4.3.2	<i>Pflanzenschutzschaden .....</i>	<i>90</i>
4.3.3	<i>Düngeunterschiede, Düngeschaden.....</i>	<i>91</i>
4.3.4	<i>Phänologie.....</i>	<i>92</i>
<b>5</b>	<b>DISKUSSION.....</b>	<b>94</b>
5.1	<i>Vergleich bodennaher mit operationeller Fernerkundung .....</i>	<i>94</i>
5.2	<i>Geometrische Eigenschaften von LASSIE Aufnahmen .....</i>	<i>98</i>
5.3	<i>Radiometrische Eigenschaften von LASSIE Aufnahmen .....</i>	<i>103</i>
5.4	<i>Informationsgehalt von LASSIE Aufnahmen .....</i>	<i>105</i>
5.5	<i>Systembetrieb.....</i>	<i>107</i>
5.6	<i>Anwendungsfelder für LASSIE .....</i>	<i>111</i>
5.6.1	<i>Landwirtschaftliches Versuchswesen .....</i>	<i>111</i>
5.6.2	<i>Einsatz von Produktionsmitteln in der landwirtschaftlichen Praxis.....</i>	<i>112</i>
5.6.3	<i>Nutzer außerhalb der Landwirtschaft.....</i>	<i>115</i>
5.7	<i>Ökonomische Aspekte von LASSIE.....</i>	<i>116</i>
5.7.1	<i>Ökonomische Aspekte für Anwendungen im landwirtschaftlichen Versuchswesen .....</i>	<i>117</i>
5.7.2	<i>Ökonomische Aspekte für außerbetriebliche Nutzer.....</i>	<i>118</i>
5.7.3	<i>Ökonomische Aspekte für den betrieblichen Einsatz von Produktionsmittel und Synergieeffekte.....</i>	<i>120</i>
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>122</b>
<b>7</b>	<b>LITERATUR .....</b>	<b>126</b>
<b>8</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>134</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1:	Anzahl der verfügbaren Satellitenbilder für die Region Braunschweig.....	3
Abb. 1-2:	Vergleich der tatsächlichen und potentiellen Sonnenscheindauer für die Region Braunschweig.....	4
Abb. 2-1:	Spektralkurven von drei organischen Böden .....	9
Abb. 2-2:	Effekt der Bodenfeuchte auf die Reflexion eines schluffigen Lehms.....	10
Abb. 2-3:	Einfluss der Korngröße auf die Bodenreflexion .....	11
Abb. 2-4:	Reflexionskurve eines Tabakblattes .....	13
Abb. 2-5:	Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsspektren eines Pflanzenblattes .....	14
Abb. 2-6:	Spektrum des spezifischen Absorptionskoeffizienten von Chlorophyll a+b .....	15
Abb. 2-7:	Reflexionsspektren von weißen (chlorophyllfreien) und grünen Geranienblättern .....	16
Abb. 2-8:	Schematische Darstellung der Interaktion einfallender Strahlung mit einem Blatt .....	17
Abb. 2-9:	Veränderung der Reflexion eines Soja-Blattes nach Infiltration von Medien mit verschiedenen Brechungsindizes .....	18
Abb. 2-10:	Der „Wood-Effekt“ im Infrarotbild .....	18
Abb. 2-11:	Effekt der Dehydratation auf die Reflexionssignatur von Bohnenblättern .....	19
Abb. 2-12:	Schematische Darstellung der Reflexionseigenschaften eines Pflanzenbestandes über die Vegetationsperiode bis zur Abreife .....	21
Abb. 2-13:	Schematische Darstellung der Reflexion, Transmission und Absorption von sichtbarem und infrarotem Licht in einem Pflanzenbestand .....	22
Abb. 2-14:	Einfluss des Blattflächenindex (LAI) auf die Reflexionssignatur von Pflanzenbeständen.....	23
Abb. 2-15:	Der Vegetationsindex (NDVI) in Abhängigkeit von LAI und Bedeckungsgrad .....	24
Abb. 3-1:	Übersichtskarte zum Versuchsfeld „Südfeld“.....	26
Abb. 3-2:	Naturräumliche Gliederung des Stadtgebietes von Braunschweig .....	27
Abb. 3-3:	Klimadiagramm nach WALTER/LIETH für den Standort Braunschweig .....	29
Abb. 3-4:	Komponenten für ein bodennahes Fernerkundungssystem.....	30
Abb. 3-5:	Schematische Darstellung der Komplementär-Farbfilteranordnung einer 1-CCD-Chip Kamera....	35
Abb. 3-6:	Strahlengang einer 3 CCD-Kamera .....	36
Abb. 3-7:	Geöffneter Schwenk-/Neigekopf mit LASSIE- $\alpha$ System.....	37
Abb. 3-8:	Aufbau eines Videoservers .....	38
Abb. 3-9:	Der Webserver als graphische Benutzeroberfläche zur Steuerung, Konfiguration und Internetpräsentation eines Videoservers .....	39
Abb. 3-10:	Bildschirmfoto der Videosever Steuersoftware Seetec .....	40
Abb. 3-11:	Geometrische Aufnahmesituation.....	41
Abb. 3-12:	Einfluss des Einfallswinkels $\theta$ auf die Pixelgröße .....	41
Abb. 3-13:	Abhängigkeit des Verzerrungsfaktors vom Einfallswinkel .....	42
Abb. 3-14:	Radialer Versatz durch Höhenunterschiede .....	43
Abb. 3-15:	Spektrale Empfindlichkeiten und Filterverläufe des LASSIE- $\beta$ Systems.....	44
Abb. 3-16:	Darstellung der spektralen Bandbreiten des LASSIE- $\beta$ System.....	45

Abb. 3-17:	Effekt des Sonnenstandes auf den Schattenwurf von Pflanzreihen .....	46
Abb. 3-18:	Verschiedene Arten der Reflexion.....	47
Abb. 3-19:	Reflexionsunterschiede eines offenen Bodens und eines Sojabestandes durch unterschiedliche Beleuchtungsrichtung .....	48
Abb. 3-20:	Schwefelmangel in Raps .....	48
Abb. 3-21:	Bidirektioneller Reflexionsfaktor (BRF) für einen gepflügten Acker und ein Weizenfeld .....	49
Abb. 3-22:	Aufnahme des „Südfeldes“ mit dem Beobachtungssystem LASSIE.....	51
Abb. 3-23:	Schematische Darstellung einer Nadir-Aufnahmesituation.....	52
Abb. 3-24:	Simulierte Einfallswinkel für ein LASSIE-System mit einem Teleobjektiv .....	55
Abb. 3-25:	Simulierte Pixelgrößen für den Weitwinkel- und Telemodus .....	56
Abb. 3-26:	Interne Kamerageometrie .....	59
Abb. 3-27:	Schematische Darstellung der Parameter der äußeren Orientierung .....	60
Abb. 3-28:	Schematische Darstellung des Bündelblockausgleiches.....	61
Abb. 3-29:	Schematische Darstellung der Aufnahmegeometrie und der daraus resultierenden Winkel .....	65
Abb. 3-30:	Ablaufschema zur Reflexionsnormierung .....	67
Abb. 3-31:	Darstellung der Dunkelstrombilder der vier LASSIE Spektralbänder.....	68
Abb. 4-1:	Oben: Original Schrägaufnahme. Unten: Entzerrtes Pseudo-Nadirbild .....	72
Abb. 4-2:	Fehlervektoren der Entzerrung des LASSIE Bildes vom 25.05.03 .....	74
Abb. 4-3:	Unterschiedliche geometrische Genauigkeit bei der Mosaikerstellung .....	75
Abb. 4-4:	Überlagerung der co-registrierten Bilder der 3-CCD und der Infrarot-Kamera .....	77
Abb. 4-5:	Entzerrtes LASSIE Bild mit ATKIS Geometrie und GPS-vermessenene Parzellengrenzen .....	78
Abb. 4-6:	Unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse im Tagesgang .....	79
Abb. 4-7:	Regressionsmodelle zur relativen Kalibrierung von LASSIE Aufnahmen.....	80
Abb. 4-8:	Das richtungsabhängige Reflexionsverhalten, dargestellt anhand des Scatteringwinkels für die Aufnahmesituation vom 27.05.2003.....	81
Abb. 4-9:	Ergebnis einer Beleuchtungskorrektur .....	81
Abb. 4-10:	Ausschnitte aus einer dynamischen Karte. Aufnahmen vom 10. Juni bis zum 19. Juni 2002.....	83
Abb. 4-11:	Ausschnitte aus einer dynamischen Karte. Aufnahmen vom 24. Juni bis zum 6. Juli 2002.....	84
Abb. 4-12:	Erkennbarkeit von Bestandesunterschieden im Vergleich von Originalbildern und dem NDVI ....	87
Abb. 4-13:	Versuchsflächen für die Fallbeispiele.....	88
Abb. 4-14:	Schwache Wachstumsunterschiede durch Beregnung .....	89
Abb. 4-15:	Herbizidschaden in Winter-Gerste .....	90
Abb. 4-16:	Düngeunterschiede und Lager durch partielle Überdüngung .....	91
Abb. 4-17:	Auflaufen von Sommer-Raps .....	92
Abb. 4-18:	Beobachtung des Zeitpunktes der Rapsblüte .....	93
Abb. 4-19:	Mais in einem frühen Entwicklungsstadium .....	93
Abb. 5-1:	Karte der Globalstrahlung und Bodenkarte zur Bestimmung des Standortes eines LASSIE .....	101
Abb. 5-2:	Verschneidungskarte aus Globalstrahlungs- und Bodenkarte .....	102
Abb. 5-3:	Radialer Versatz durch Pflanzenwachstum. Aufnahme vom 4. Mai 2003 .....	106

## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 3-1:	Zusammenstellung der verwendeten Komponenten für die LASSIE Prototypen.....	32
Tab. 3-2:	Tatsächliche Pixelgrößen in cm für 4 verschiedene Masthöhen und 5 Neigungswinkel mit einem Weitwinkelobjektiv.....	53
Tab. 3-3:	Tatsächliche Pixelgrößen in cm für 4 verschiedene Masthöhen und 5 Neigungswinkel mit einem Teleobjektiv.....	54
Tab. 3-4:	Prozentualer Flächenanteil der Neigungswinkelklassen an der Gesamtfläche des „Südfeldes“ für zwei Masthöhen.....	56
Tab. 3-5:	Simulierte Flächenabdeckung für vier Masthöhen bei einem Neigungswinkel von 88°.....	57
Tab. 4-1:	Kalibrierwerte zur Bildentzerrung vom 25. Mai 2003.....	73
Tab. 4-2:	Geometrische Lagefehler einer Bildentzerrung.....	73
Tab. 4-3:	Kalibrierparameter für einen Bündelblockausgleich für ausgewählte Bilder.....	76
Tab. 4-4:	Deskriptive Statistik für die Einzelkanäle der LASSIE Aufnahme vom 25. Mai 2003.....	85
Tab. 4-5:	Kovarianzmatrix für die Einzelkanäle der LASSIE Aufnahme vom 25. Mai 2003.....	85
Tab. 4-6:	Korrelationskoeffizienten für die Einzelkanäle der LASSIE Aufnahme 25. Mai 2003.....	86
Tab. 5-1:	Prozessierungszeiten für das LASSIE-Prototyp System.....	95
Tab. 5-2:	Geschätzte Kosten für ein operationelles LASSIE.....	117
Tab. A-1:	Kalibrierparameter aller verwendeter LASSIE Aufnahmen.....	134





## 1 Einleitung

Aktuelle, schlagbezogene Bildinformationen sind für die landwirtschaftliche Praxis von großem Nutzen. Schon eine visuelle Bonitur gibt Hinweise über den Zustand von Böden und Pflanzenbeständen und kann als Grundlage für Maßnahmen der Bestandesführung dienen (SELIGE 2002). Neben der klassischen Feldbegehung bieten Luftaufnahmen eine weit bessere und effizientere Möglichkeit, den Zustand der Flächen zu beurteilen. Der Einsatz von Luftaufnahmen, als Hilfsmittel für die Bestandesführung in der landwirtschaftlichen Praxis, ist durch eine Reihe technischer Probleme eingeschränkt, und wird derzeit hauptsächlich für wissenschaftliche Forschungszwecke eingesetzt (MORAN 2000).

Die Auswertung von Luft- und Satellitenbildern stellt ein wichtiges Hilfsmittel zur Beschaffung von räumlichen Informationen dar. Unter dem Begriff *Fernerkundung* werden alle Verfahren zusammengefasst, die Informationen über die Erdoberfläche aus der Messung von elektromagnetischer Energie gewinnen, ohne dabei mit dem Objekt in Berührung zu kommen (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., DIN 18716, 1997). Neben den bildgebenden Verfahren wie Luft- und Satellitenbilder, werden auch Punktmessungen von Online-Sensoren als Fernerkundungstechniken verstanden. Diese berührungslosen Messverfahren erlauben eine nahezu unbegrenzte Wiederholung der Datenerhebung, ohne das Objekt zu beeinflussen.

Die Fernerkundung unterteilt sich in aktive und passive Messverfahren. Die aktive Fernerkundung sendet Energie aus und misst das reflektierte Signal (z. B. Radar, Lidar, Laserscanning), die passiven Verfahren dagegen messen nur reflektierte Sonnenenergie. Die passiven Methoden lassen sich weiter untergliedern in die optische (reflektive) und die thermale (emissive) Fernerkundung (ALBERTZ 1991). Das Teilgebiet der optischen Fernerkundung beschäftigt sich mit der Messung von reflektierter elektromagnetischer Energie aus dem sichtbaren Wellenlängenbereich (400 – 700 nm), sowie aus dem nahen (700 – 1300 nm) und mittleren Infrarot (1300 – 3000 nm).

Optische, bildgebende Fernerkundungsaufnahmen eignen sich als landwirtschaftliche Basisinformation zur Erfassung von kleinräumiger Boden- und Bestandesheterogenität (GRENZDÖRFFER 1999, PANTEN 2002). Je nach Fragestellung und räumlicher Abgrenzung

(lokale, regionale oder globale Untersuchung) stehen mittlerweile eine Vielzahl von Sensoren zur Verfügung. Die Bandbreite verfügbarer Sensorik reicht dabei von Online-Sensoren auf Schleppern über klassische Luftbildkameras bis hin zu spektral hochauflösenden Flugzeugscannern und global operierenden Satellitensystemen.

Auf der lokalen Ebene des landwirtschaftlichen Betriebes lassen sich Fernerkundungsaufnahmen zum Auffinden von heterogenen Teilflächen im Bestand einsetzen (KÜHBAUCH 2002, PANTEN 2002), um schnell und ökonomisch Strategien zur Boden- und Pflanzenprobennahme aus den Bilddaten ableiten (SCHNUG ET AL. 2000), sowie aus Archivdaten räumlich wiederkehrende Strukturen erkennen zu können (GRENZDÖRFFER 1999). Zudem eignen sich die Informationen zur Ableitung von Managementstrategien und zur anschließenden Erfolgskontrolle von bereits durchgeführten Bewirtschaftungsmaßnahmen, bzw. zur Anpassung und Optimierung der Bestandesführung.

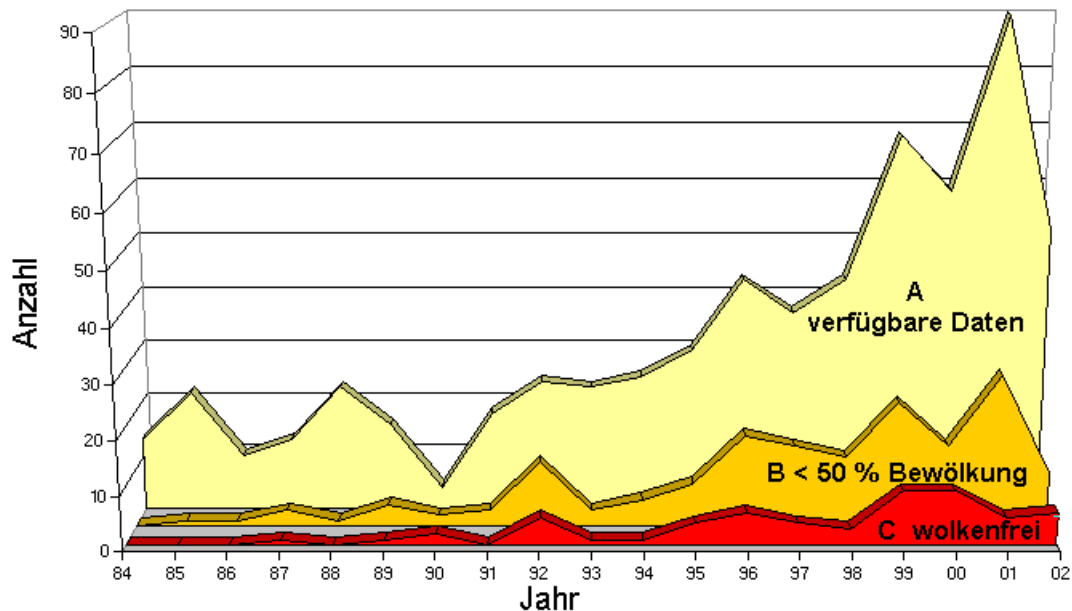
Wichtig ist dabei zu berücksichtigen, dass Fernerkundung Phänomene aber keinesfalls Ursachen erfasst. Eine Kausalanalyse muss vom Anwender/Interpreten durchgeführt werden (KÜHBAUCH 2002, PANTEN 2002). Die Fernerkundung ermöglicht beispielsweise die Lokalisierung von Flächen, die ein unterschiedliches Wachstum aufweisen. Sie ist aber bisher nicht in der Lage, Aussagen über die Ursache dieser Wachstumsunterschiede, wie Wasserversorgung, Nährstoffmangel oder Bodenverdichtung, zu treffen. In der landwirtschaftlichen Praxis ist jedoch schon die bloße Lokalisierung von Heterogenitäten bereits ein wichtiger Indikator für weitere Untersuchungen der Flächen. Eine umfassende Übersicht über den Einsatz von Fernerkundung auf Betriebsebene und in der teilflächenspezifischen Landwirtschaft findet sich bei MORAN ET AL. (1997).

Den Vorteilen der optischen Fernerkundung stehen eine Reihe von meist technisch bedingten Nachteilen gegenüber, die im Folgenden kurz skizziert werden:

### *Bewölkung*

Die optische Fernerkundung zeichnet das von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenlicht auf. Bei kompletter Bewölkung kann keine Information gewonnen werden. Insbesondere die Witterungsbedingungen in Mitteleuropa beeinträchtigen die Verfügbarkeit von wolkenfreien

Bilddaten. Eine Recherche nach Satellitenbildern ab 1984 für die Region Braunschweig ergab, dass nur ca. 10 % der verfügbaren Daten wolkenfrei sind (Abb. 1-1).



**Abb. 1-1:** Anzahl der verfügbaren Satellitenbilder für die Region Braunschweig.

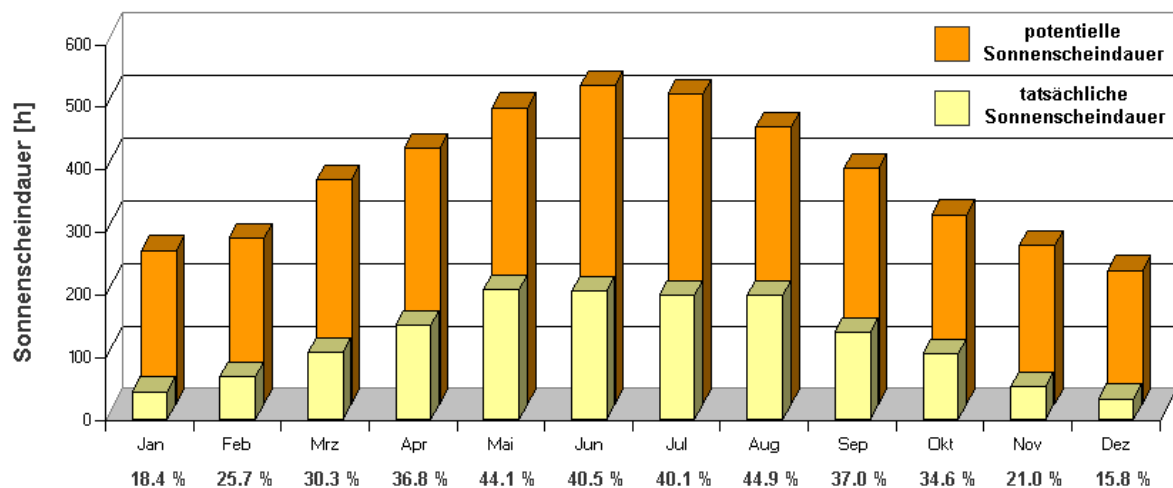
A: Insgesamt verfügbar, B: weniger als 50 % der Fläche bewölkt, C: wolkenfrei.

(Quellen: EURIMAGE, SPOTIMAGE, DLR, USGS 2003).

Während die Gesamtanzahl der verfügbaren Bilder seit 1991 durch den Start immer neuer Satelliten angestiegen ist, hat sich die Anzahl der wolkenfreien Daten nur in geringem Maße erhöht. Das Problem der Bewölkung wird noch dadurch verstärkt, dass die Satelliten durch ihre Flugbahn eine Region auf der Erde erst nach einer definierten Repetitionsrate wieder überfliegen. Diese Repetitionsrate oder zeitliche Auflösung beträgt je nach Satellit zwischen 16 (*Landsat*) und 26 (*Spot*) Tagen (LÖFFLER 1985).

Besonders erschwerend ist auch die Häufigkeit von Bewölkungen innerhalb eines Jahres. Beobachtungen unbewachsener Böden sind das ganze Jahr über möglich, Bestandesbeobachtungen, die Grundlage für die Steuerung von Produktionsmaßnahmen sein sollen, jedoch nur während der Hauptwachstumsphasen, die sich bei den meisten Feldfrüchten auf den Zeitraum von Mitte März bis Mitte Juli beschränken (GRENZDÖRFFER 1999). In den hiesigen Klimaten treten aber gerade dann besonders häufig geschlossene Wolkendecken auf.

Das prozentuale Verhältnis zwischen tatsächlicher und potentieller Sonnenscheindauer gibt die Bewölkungsverhältnisse für die einzelnen Monate wieder (Abb. 1-2). Zu erkennen ist, dass in den Monaten März und April nur ca. ein Drittel der potentiell möglichen Sonnenscheindauer erreicht wird, in den sonnenreichsten Monaten Mai bis August nur rund 40 % der potentiell möglichen.



**Abb. 1-2:** Vergleich der tatsächlichen und potentiellen Sonnenscheindauer in Stunden für die Region Braunschweig. Datengrundlage: Agrarmeteorologische Forschung (AMF) des DWD und eigene Berechnung.

### *Zeitliche Verfügbarkeit*

Wurde eine Region wolkenfrei vom Satelliten aufgezeichnet, so benötigt die Rohdatenverarbeitung, wie das Auslesen der Daten vom Satelliten und die Korrektur systematischer Fehler, mindestens 14 Tage. Bei weiterer Prozessierung, wie die Korrektur des Atmosphäreneinflusses und eine Geokodierung, kann es bis zu 6 Wochen dauern bis die Daten beim Anwender vorliegen (GRENZDÖRFFER 1999).

Das Erscheinungsbild landwirtschaftlicher Flächen und die Dauer und Abfolge der für pflanzenbauliche Maßnahmen in Frage kommenden Zeitfenster variieren von Jahr zu Jahr und zwischen den Fruchtarten (KÜHBAUCH 2002). Eine Dokumentation durch Fernerkundung erfordert wiederholte zeitliche Aufnahmen im Abstand von vier bis 14 Tagen, je nach Fruchtart und Fragestellung (ALLAN 1990). Als Grundlage für produktionstechnische Maßnahmen sind fast nur Aufnahmen in Echtzeit geeignet.

Kurzfristig geplante Befliegungskampagnen, sogenannte Spontanbefliegungen mit Sportflugzeugen können als Alternative zu Satellitenbildern eingesetzt werden (GRENZDÖRFFER 1999). Diese Befliegungen erfordern einen hohen logistischen Aufwand, wobei, abgesehen von den immensen Kosten, die Problematik der Bewölkung bestehen bleibt.

### *Vorverarbeitung*

Für den Landwirt entsteht nur ein Nutzen aus den Daten, wenn diese mindestens georeferenziert vorliegen. Nur dann können die Flächen aus den Bildern genau lokalisiert und Maßnahmen im Feld ergriffen werden. Die geometrische Entzerrung der Fernerkundungsdaten auf eine Kartenprojektion stellt heute technisch, dank leistungsfähiger Computer, kein Problem mehr dar (RICHARDS 1994). Geometrisch hochaufgelöste Bilddaten erfordern aber eine sehr genaue Verortung von Kontrollpunkten im Gelände. Um diese hohe Lagegenauigkeit erreichen zu können, wird die Entzerrung semi-automatisch durchgeführt, das heißt die zu den Kontrollpunkten korrespondierenden Bildpunkte werden manuell vom Interpreten zugewiesen.

Sollen Fernerkundungsdaten von unterschiedlichen Aufnahmetermeninen verarbeitet werden, so müssen die Daten radiometrisch normiert werden, damit die Reflexionswerte zwischen den Bildern verglichen werden können (HILL & MEHL 2002).

Neben zusätzlich entstehenden Kosten für die Prozessierung der Bilder entsteht dadurch ein weiterer Zeitverzug, bis die Daten beim Anwender vorliegen und genutzt werden können.

Die Vielzahl technischer Probleme hat dazu geführt, dass in der Landwirtschaft die Fernerkundung immer noch ausschließlich im wissenschaftlichen Forschungsbereich angesiedelt ist, und die operationelle Anwendung für die Bestandesführung ausgeblieben ist (MORAN 2000).

Ein neuartiges Konzept für die landwirtschaftliche Fernerkundung wurde am Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) entwickelt und könnte die bisherigen Probleme lösen:

Sogenannte *Surf-Eyes*, digitale Kameras, die an exponierten Positionen in der Landschaft aufgestellt werden, operieren unterhalb der Wolkendecke und sind damit in der Lage, in nahezu jeder Witterungssituation Daten zu liefern (PANTEN ET AL. 1998). Die Daten können automatisch entzerrt und geocodiert werden und als Echtzeitdaten in ein Geographisches

Informationssystem (GIS) eingebunden werden. Die Kameras befinden sich auf einem Schrittmotor, der durch eine Rotation um 360° eine komplette Abdeckung der Landschaft ermöglicht. Werden mehrere dieser Surf-Eyes in der Landschaft verteilt, ist eine Abdeckung größerer Flächen möglich (PANTEN ET AL. 1998).

Das Konzept wurde von SCHNUG ET AL. (2000) konkretisiert und unter dem neuen Namen LASSIE (**L**ow **A**ltitude **S**tationary **S**urveillance **I**nstrumental **E**quipment) vorgestellt.

Die Georeferenzierung der Bilddaten kann durch die stationäre Lage des Sensors vereinfacht und beschleunigt werden. Die Kamera ist auf einem Schwenk-/Neigekopf montiert, der vorprogrammierte Positionen mit einer hohen Genauigkeit anfahren kann. Dadurch ist die Geometrie der Bilder, die zu unterschiedlichen Zeiten, aber von der gleichen Position aufgenommen wurden, identisch. Die zur Korrektur benötigten Parameter müssen nur einmal bestimmt werden und können dann für alle weiteren Bilddaten von der Aufnahme-Position wieder verwendet werden. Damit ist eine weitgehende Automatisierung der Entzerrung für ein operationelles System möglich. Die Aufnahme-Position des LASSIE befindet sich immer unterhalb der Wolkendecke. Das System kann daher zu nahezu jedem Zeitpunkt (Ausnahme Nebel und starke Niederschläge) Daten liefern, wobei sich die Reflexionseigenschaften bei direkter Sonneneinstrahlung und ausschließlich diffusem Licht deutlich unterscheiden.

Neben einer guten Verfügbarkeit der Bilddaten wird es möglich neuartige dynamische Karten zu generieren, die den Entwicklungsverlauf des Bestandes dokumentieren und in Form von Zeitraffer-Aufnahmen wiedergeben können.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, das innovative LASSIE Konzept zur landwirtschaftlichen Fernerkundung in ein Prototyp-System umzusetzen. Die Ansprüche an das System sind eine permanente Verfügbarkeit von Bildinformationen, die geometrisch korrigiert und eine hohe Qualität hinsichtlich Geometrie und Radiometrie aufweisen.

Im Mittelpunkt dieser methodischen Arbeit stand die Untersuchung von drei Kernfragen:

- Welche Voraussetzungen müssen für die Operationalisierung von LASSIE gegeben sein ?
- Welche technischen Anforderungen sind an das System zu stellen?
- Welche Probleme ergeben sich beim Betrieb des Systems?

Neben der technischen Realisierung wurde anhand einiger Fallstudien die Eignung des Systems für landwirtschaftliche Fragestellungen getestet.

Zunächst werden in dieser Arbeit die für das Verständnis der LASSIE-Bilddaten notwendigen Grundlagen der landwirtschaftlichen Fernerkundung erläutert. Es folgt die methodische Ausarbeitung der systemspezifischen Grundvoraussetzungen und Eigenschaften für LASSIE. Anschließend werden Ergebnisse der Methodenentwicklung dargestellt und erläutert. In der Diskussion werden die Systemeigenschaften besprochen, die Möglichkeiten der technischen Fortentwicklung aufgezeigt, sowie Anwendungsfelder und ökonomische Aspekte betrachtet.



## 2 Grundlagen der landwirtschaftlichen Fernerkundung

Die Interpretation von landwirtschaftlichen Fernerkundungsdaten setzt die Kenntnis der Mechanismen voraus, die bei der Interaktion von elektromagnetischen Wellen und dem beobachteten Objekt wirken (KNIPLING 1970, GUYOT 1990, ATZBERGER 1998). An dieser Stelle sollen die Reflexionseigenschaften von Boden und Pflanze vorgestellt werden, die für die Bildaufzeichnung mit LASSIE Relevanz besitzen. Zum tieferen Verständnis der allgemeinen Grundlagen wird im Text auf die Standardliteratur hingewiesen.

### 2.1 Reflexionseigenschaften von Böden

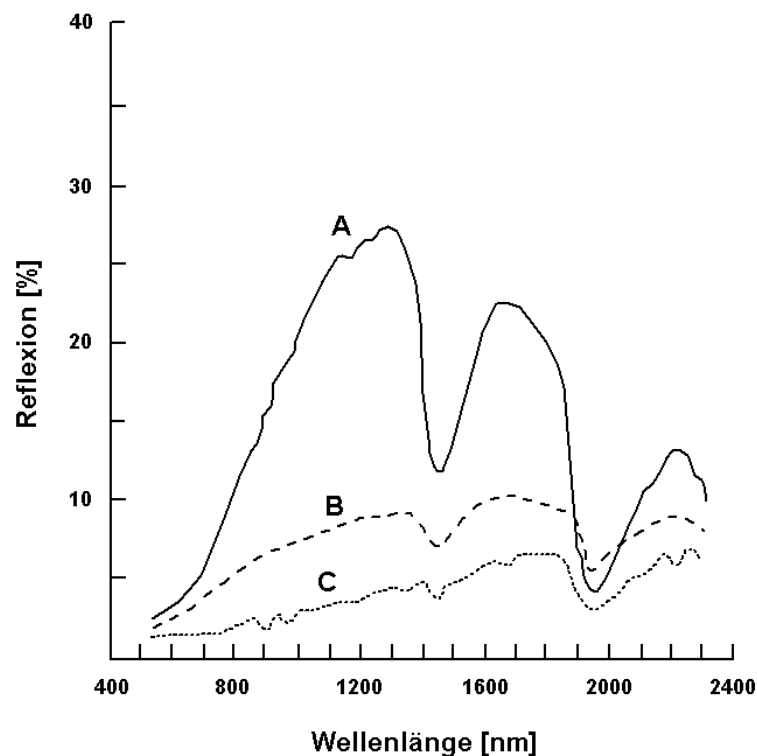
Eine sehr gute Zusammenfassung über die Einflussgrößen und Wirkungsmechanismen auf die Spektralsignaturen von Böden geben BAUMGARDNER ET AL. (1985) und IRONS ET AL. (1989). Die auf den Boden einfallende solare Strahlung wird entweder vom Boden absorbiert oder reflektiert. Der reflektierte Anteil kann mit Fernerkundungssensoren aufgezeichnet werden. Die optische Fernerkundung lässt nur Aussagen über die obersten Mikrometer des Bodens zu, da die Eindringtiefe des Lichtes in den Boden nur etwa die Hälfte der entsprechenden Wellenlänge beträgt. Informationen über pflanzenbaulich relevante, tiefere Bodenschichten können nicht gewonnen werden.

Die spektralen Eigenschaften von unbewachsenen Böden werden hauptsächlich von vier Faktoren beeinflusst:

1. Organische Substanz
2. Bodenfeuchte
3. Bodentextur (Bodenart, Aggregate)
4. Eisenoxide

### Organische Substanz

Der Gehalt an organischer Substanz hat den stärksten Einfluss auf die Reflexion von Böden, insbesondere, wenn der Gehalt 2 % überschreitet (BAUMGARDNER ET AL. 1970). Bei höheren Gehalten werden die Reflexionssignaturen anderer Bodenbestandteile von der Reflexion der organischen Substanz vollständig überlagert. Allgemein führt die Zunahme des Gehaltes an organischer Substanz zu einer Abnahme der Gesamtreflexion (BAUMGARDNER ET AL. 1985). Diskrete Absorptionsmerkmale konnten bisher aber nicht nachgewiesen werden (ERASMI 2002). Abbildung 2-1 zeigt die Spektralkurven dreier organischer Böden mit unterschiedlichen Zersetzungsgraden der organischen Substanz.



**Abb. 2-1:** Spektralkurven von drei organischen Böden.

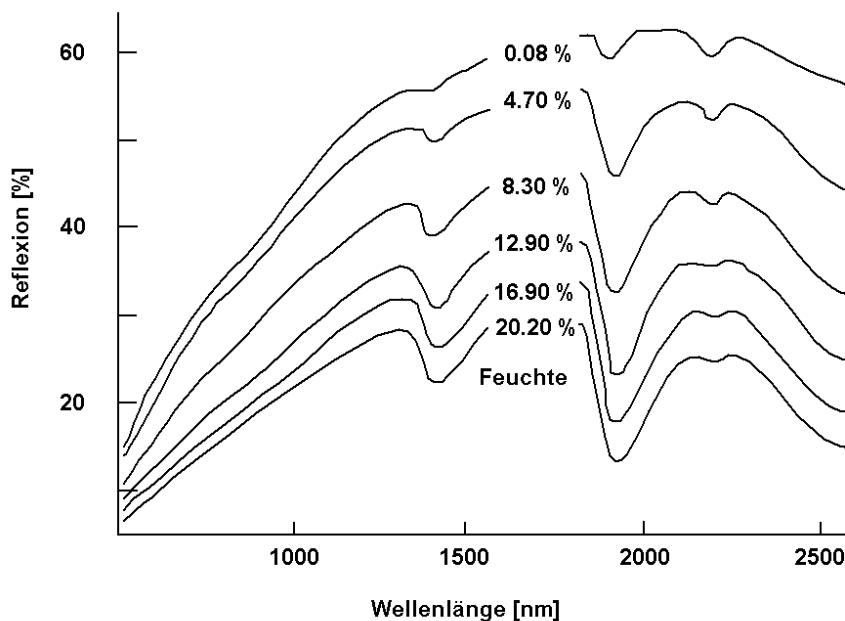
A: gering zersetzter Torf (fibric), B: teilweise zersetzter Torf (hemic),

C: stark zersetzter Torf (sapric) (Quelle: BAUMGARDNER ET AL. 1985, verändert).

Zu sehen ist hieraus, dass mit zunehmendem Zersetzungsgrad die Reflexion, insbesondere im Wellenlängenbereich 800 – 1900 nm, stark zurückgeht.

### Bodenfeuchte

Das Reflexionsvermögen von Böden nimmt mit zunehmender Bodenfeuchte ab, feuchte Böden erscheinen daher dunkler als trockene Böden (Abb. 2-2). Erklärt wird die Abnahme der Reflexion von trockenen zu feuchteren Böden im sichtbaren Wellenlängenbereich durch mehrfache interne Totalreflexionen innerhalb eines dünnen Wasserfilmes, um die einzelnen Bodenpartikel (BAUMGARDNER ET AL. 1985).

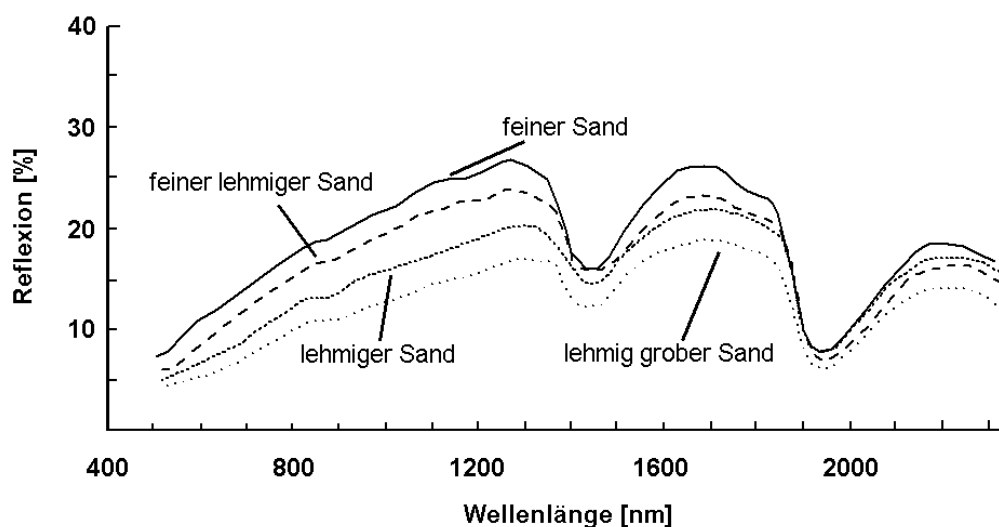


**Abb. 2-2:** Effekt der Bodenfeuchte auf die Reflexion eines schluffigen Lehms.  
(BOWERS & HANKS 1965, verändert).

Ein Teil der Strahlung wird nicht wieder zurück in den Raum reflektiert, sondern zwischen Wasserfilm und Bodenpartikel immer wieder hin und her reflektiert. Durch diese mehrfachen Reflexionen wird schließlich immer mehr Energie absorbiert und die Gesamtreflexion im sichtbaren Licht nimmt ab (BOWERS & SMITH 1972). Charakteristisch für die Reflexionsspektren von Böden sind die starken Absorptionsbanden bei 1450 und 1950 nm, die durch das Wasser selbst hervorgerufen werden (Abb. 2-2). Für die Fernerkundung im Feld spielen diese Absorptionsbanden keine Rolle, da diese durch die atmosphärischen Wasserbanden überlagert werden.

### Bodentextur

Im Allgemeinen nimmt die Reflexion mit abnehmender Korngröße zu. Gleichzeitig nimmt aber auch die Tiefe der Absorptionsbanden ab, das heißt die Reflexionskurve flacht über den gesamten Verlauf des sichtbaren Wellenlängenbereiches ab (BOWERS & SMITH 1972). Die Korngrößenveränderung beeinflusst die spektrale Reflexion gleichmäßig über den gesamten Wellenlängenbereich (Abb. 2-3). Dieses trifft aber nur für homogene Bodenarten zu. Diese Ergebnisse stammen jedoch überwiegend aus Labormessungen unter standardisierten Bedingungen. In der Natur jedoch bestehen die Böden aus Mischungen der Bodenarten, die wiederum Gefüge und Aggregate bilden. Für Aggregate gilt, dass mit Zunahme der Aggregatgröße die Reflexion abnimmt, da der Boden insgesamt rauher wird. Tonböden erscheinen dem Betrachter daher meist dunkler als Sandböden. Die Aggregatbildung wirkt sich insbesondere auf die Gesamtreflexion von Tonböden aus (ATZBERGER 1998).



**Abb. 2-3:** Einfluss der Korngröße auf die Bodenreflexion. (BAUMGARDNER ET AL. 1985, verändert).

Witterungsverhältnisse und Bodenbearbeitung können zur Veränderung der Aggregate und somit zur Veränderung der Bodenrauhigkeit beitragen. Eine erhöhte Rauigkeit führt zu einer Beschattung der Bodenpartikel, was in einer Abnahme der Gesamtreflexion resultiert (ERASMI 2002).

### *Eisenoxide*

Hauptverantwortlich für die Färbung von Böden sind die Eisenoxide Hämatit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) und Goethit ( $\text{FeOOH}$ ). Hämatit hat einen starken Absorptionsbereich bei 550 nm und führt zu einer Rotfärbung der Böden. Goethit hingegen absorbiert weniger stark und färbt die Böden in gelblichen Tönen (ESCADAFAL 1994). Generell absorbiert Eisen bei 870 nm und die Breite der Absorption nimmt mit dem Gehalt an Eisen zu (BAUMGARDNER ET AL. 1985).

Die Reflexionseigenschaften von Böden lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Anteil organischer Substanz hat den größten Einfluss auf die Gesamtreflexion
- Die Zunahme der organischen Substanz führt zu einer Abnahme der Gesamtreflexion
- Das Reflexionsvermögen von Böden nimmt mit zunehmender Bodenfeuchte ab, feuchte Böden erscheinen dunkler als trockene Böden
- Die Reflexion nimmt mit Abnahme der Korngröße zu
- Aggregatbildung führt zu einer Abnahme der Gesamtreflexion
- Eisenoxide führen zu einer Färbung des Bodens im sichtbaren Wellenlängenbereich

## 2.2 Reflexionseigenschaften von Einzelpflanzen

Die Reflexionssignaturen von Pflanzen mit grünen Blättern sind in ihrem Verlauf identisch, lediglich die Amplitude der Signatur kann variieren (GUYOT 1990). Der typische Verlauf einer Reflexionskurve für Vegetation ist in Abbildung 2-4 am Beispiel eines Tabakblattes dargestellt:

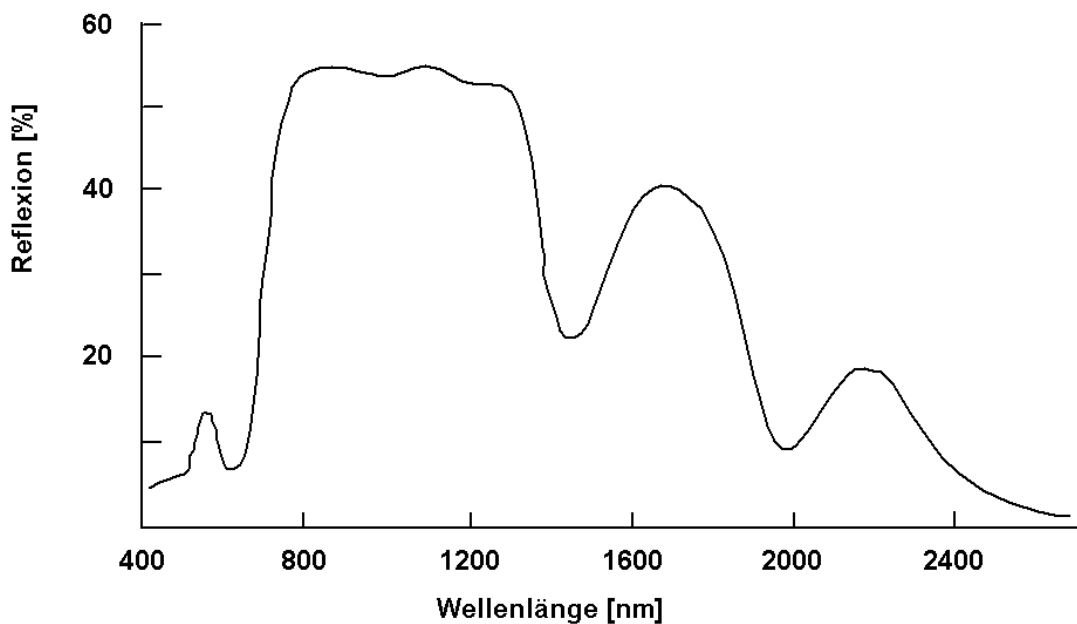
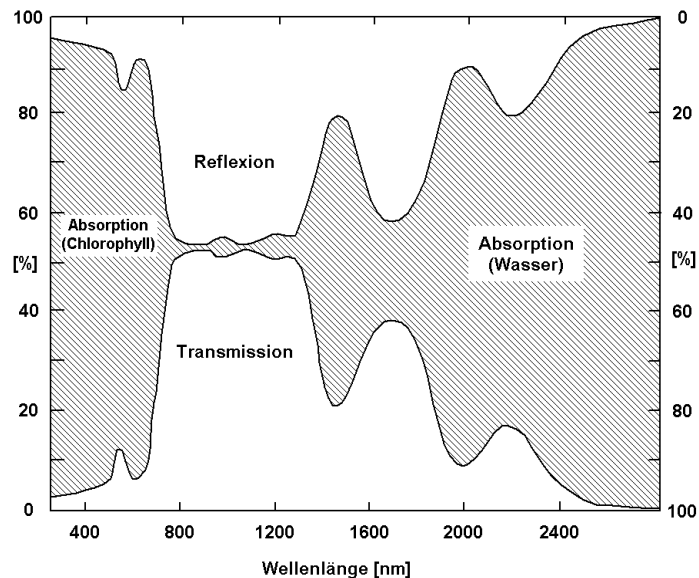


Abb. 2-4: Reflexionskurve eines Tabakblattes (KNIPLING 1970, verändert).

Die Reflexion eines Blattes ist im sichtbaren Wellenlängenbereich (400 – 700 nm) relativ gering und liegt bei ca. 10 %. Auffällig ist der Reflexionsanstieg im sichtbaren Grün (~ 550 nm). Das Reflexionssignal steigt im nahen Infrarot (700 – 1300 nm) auf den Maximalwert von ca. 50 % und nimmt dann stetig im Bereich des mittleren Infrarot (1300 – 3000 nm) ab. Die Blattoorgane sind für die Strahlung teilweise transparent. Aufgrund des Zellaufbaus weisen sie vielfältige Diskontinuitäten des Brechungsindex auf (wasserhaltige Zellwände – luftgefüllte Zellzwischenräume). An den unterschiedlichen Blattstrukturen findet Streuung und Reflexion statt, die auftreffende Strahlung wird aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt und in alle Richtungen gestreut (Volumenstreuung). Der Effekt der Volumenstreuung wird aber von Absorptionsphänomenen überlagert (KRAUS & SCHNEIDER 1988).

Nur ein kleiner Teil der einfallenden Energie wird vom Blatt reflektiert, der Rest wird absorbiert oder transmittiert. Alle drei Komponenten stehen in einer engen Wechselbeziehung zueinander. Um die Physik und Physiologie der Blattreflexion zu verstehen, ist es notwendig, alle drei Komponenten zu berücksichtigen (KNIPLING 1970). Nach dem Gesetz der Energieerhaltung gilt: Die Summe aus Absorption, Reflexion und Transmission ergibt 1 (bzw. 100 %). Auffällig ist die Parallelität von Reflexion und Transmission ( Abb. 2-5).

Die Spektren von Reflexion und Transmission haben eine identische Form, nur zueinander invertiert. Das Absorptionsspektrum verläuft konträr zur Transmission und Reflexion. Praktisch bedeutet das, je stärker ein Blatt reflektiert, desto mehr Licht lässt es auch hindurch (SCHELLBERG 1990).



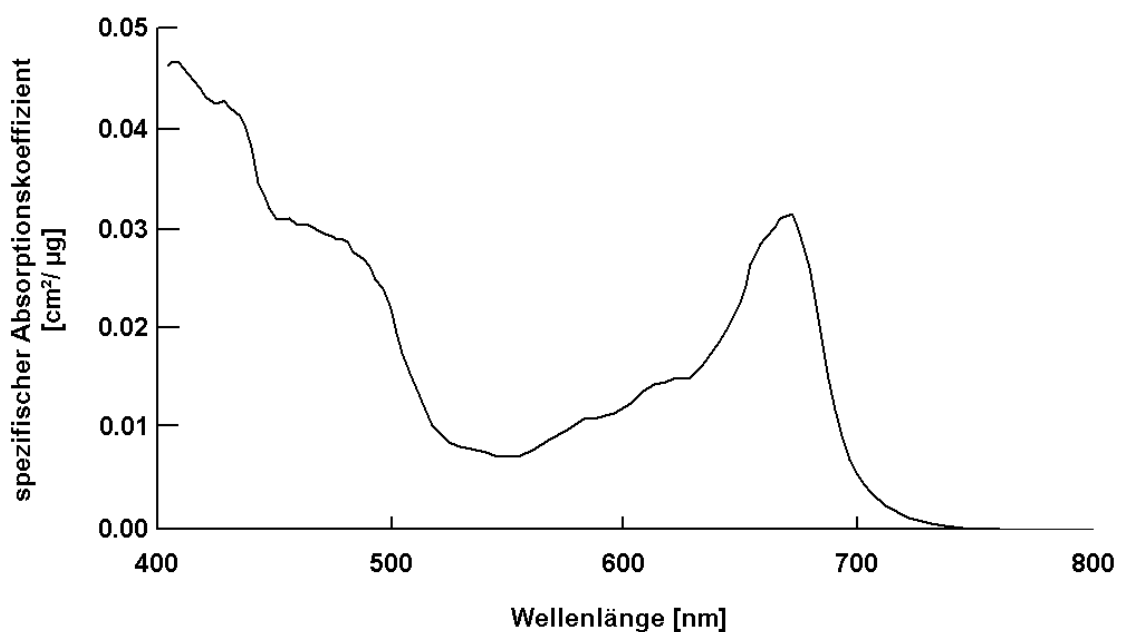
**Abb. 2-5:** Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsspektren eines Pflanzenblattes (KNIPLING 1970, verändert).

Betrachtet man zunächst das Absorptionsspektrum so fällt auf, dass die Absorption im sichtbaren (400 – 700 nm) und im infraroten Wellenlängenbereich (> 1300 nm) sehr stark ist, wohingegen im nahen Infrarot (700 – 1300 nm) kaum Energie absorbiert wird.

### Sichtbarer Wellenlängenbereich

Für die Absorption im sichtbaren Wellenlängenbereich sind im wesentlichen Pflanzenpigmente verantwortlich. Das sichtbare Blau und Rot wird sehr stark von Chlorophyll *a* (430/660 nm) und *b* (450/640 nm) absorbiert, das Licht im sichtbaren grünen Wellenlängenbereich hingegen weniger stark (Abb. 2-6). Aus diesem Grund erscheint dem menschlichen Auge die Vegetation grün. Neben dem Chlorophyll absorbieren noch andere Pflanzenpigmente wie Karotinoide, Xanthophylle (beide absorbieren um 450 nm), Polyphenole (Anthocyane) und braune Pigmente, die vorwiegend bei der Blattalterung aktiv werden (VERDEBOUT ET AL. 1994).

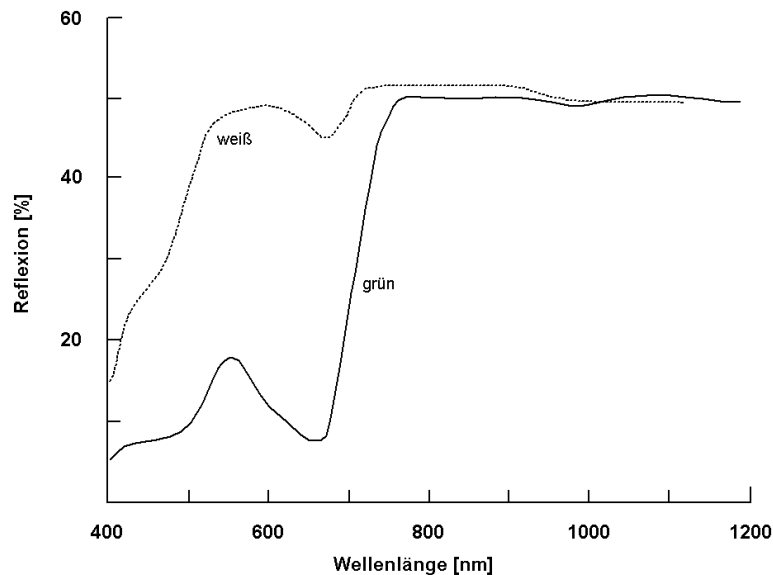
Die Konzentration von Chlorophyll im Blatt ist im Vergleich zu den Karotinoiden 10 mal so hoch. Daher sind die Absorptionsprozesse der Karotinoide in grünen Blätter von der Chlorophyllabsorption überlagert. Bei der Blattalterung werden Chlorophylle jedoch stärker als Karotinoide abgebaut, das Blatt verfärbt sich Gelb. Stirbt das Blatt ab, so entstehen durch metabolische Prozesse braune Pigmente (Phaeophytine, Catechine und Phylobaphene), das Blatt nimmt eine bräunliche Farbe an (VERDEBOUT ET AL. 1994).



**Abb. 2-6:** Spektrum des spezifischen Absorptionskoeffizienten von Chlorophyll a+b (in vivo) (JACQUEMOUD & BARET 1990, verändert).



Bereits in den 50er Jahren wurde der Einfluss von Pigmenten auf das Reflexionsverhalten von Pflanzen untersucht. BILLINGS und MORRIS (1951) verglichen die Spektren von grünen und panaschierten, also chlorophyllfreien weißen Geranienblättern (Abb. 2-7).



**Abb. 2-7:** Reflexionsspektren von weißen (chlorophyllfreien) und grünen Geranienblättern. (BILLINGS & MORRIS 1951, verändert).

Die Reflexion der panaschierten Blätter im sichtbaren Wellenlängenbereich liegt in der gleichen Größenordnung wie die Reflexion im nahen Infrarot. Im sichtbaren Blau und Rot findet noch eine schwächere Absorption statt. Da die Stärke der Reflexion der Geranienblätter im nahen Infrarot mit und ohne Chlorophyll nahezu identisch ist, kann gefolgert werden, dass Chlorophyll keinen Einfluss auf die Reflexionssignatur im nahen Infrarot ausübt (KNIPLING 1970).

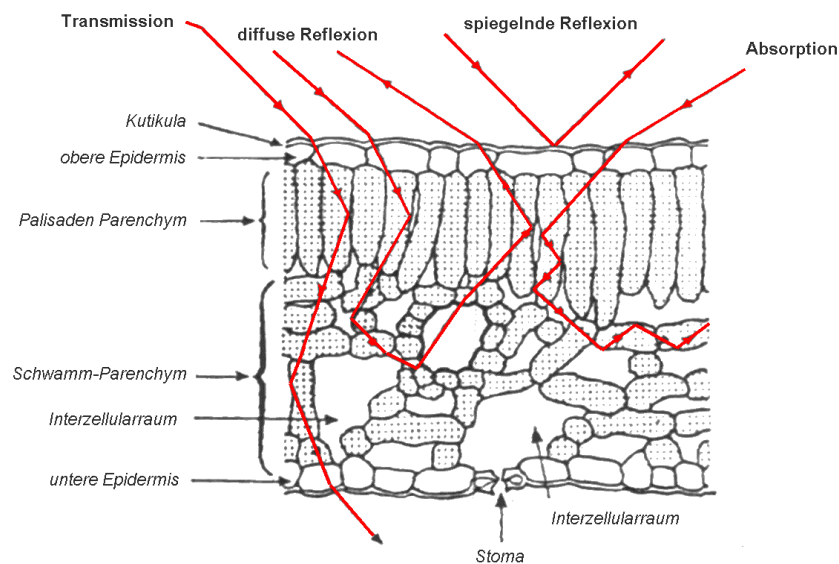
### *Nahes Infrarot*

Während die Spektralsignatur von Vegetation im sichtbaren Wellenlängenbereich durch Absorptionsvorgänge geprägt ist, sind im nahen Infrarot (700 – 1300 nm) hauptsächlich Reflexionsprozesse wirksam.

Verantwortlich für die hohe Blattreflexion im nahen Infrarot ist die Blattstruktur. Blätter sind optisch gesehen ein heterogenes Material, sie bestehen aus sehr unterschiedlich übereinander gelagerten Geweben und unterschiedlichen Medien (Zellgewebe, Wasser, Luft) (KNIPLING 1970). Der Gang der Lichtstrahlen im Blattinnern ist abhängig von der Anatomie

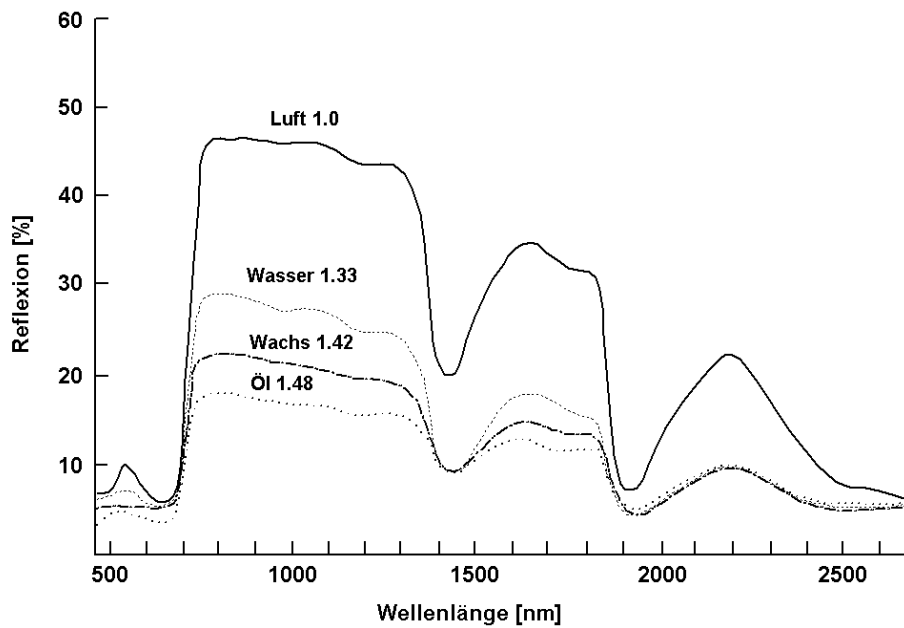
und stofflichen Zusammensetzung der Gewebe. Diese besitzen sehr unterschiedliche spektrale Eigenschaften und können nach Pflanzenart und Entwicklungsstadium stark variieren (SCHELLBERG 1990).

Die kutikuläre Wachsschicht ist nahezu transparent für sichtbares und infrarotes Licht. Die einfallende Energie gelangt durch die Kutikula und obere Epidermis in die Parenchymzellen und die interzellularen Luftzwischenräume (Abb. 2-8). Die Grenzschicht zwischen Palisadengewebe und luftreichem Schwamm-Mesophyll fungiert als interner Reflektor, der das Licht in das chloroplastenreiche Palisadengewebe zurückwirft. Hier wird das Licht mehrfach gestreut und gebrochen, da sich der Brechungsindex zwischen Luft (1.0) und hydratisierten Zellwänden (1.4) ständig ändert (KNIPLING 1970).



**Abb. 2-8:** Schematische Darstellung der Interaktion einfallender Strahlung mit einem Blatt (*Heleborus niger*), (GUYOT 1990, verändert).

Die Reflexion im nahen Infrarot nimmt mit Anzahl, Größe und Heterogenität der Zellen, sowie der Orientierung der Zellwände zu (GUYOT 1990). Untersuchungen von WOOLLEY (1971) haben gezeigt, dass das Medium Luft für die hohe Reflexion im nahen Infrarot verantwortlich ist (Abb. 2-9). Nach der Infiltration von verschiedenen Flüssigkeiten in Soja-Blätter, die einen größeren Brechungsindex als Luft aufweisen (Wasser, Wachs, Öl), war ein deutlicher Rückgang der Reflexion über den gesamten Wellenlängenbereich zu beobachten, besonders deutlich aber im nahen Infrarot.



**Abb. 2-9:** Veränderung der Reflexion eines Soja-Blattes nach Infiltration von Medien mit verschiedenen Brechungsindizes. (WOOLLEY 1971, verändert).

Der starke Anstieg der Reflexion im nahen Infrarot bei Pflanzen wurde erstmals 1910 von R. W. WOOD entdeckt. WOOD experimentierte mit Photoplatten, die im Wellenlängenbereich von 720 nm sensibilisiert waren und stellte fest, dass Blätter und Gras in schwarz-weiß Aufnahmen schneeweiß erscheinen (WAGNER 1970). Dieses Phänomen wird in der Infrarot-Fotografie als „Wood-Effekt“ bezeichnet.

Abbildung 2-10 verdeutlicht den „Wood-Effekt“. Pflanzen erscheinen im Infrarotbild aufgrund der Mehrfachstreuung im Pflanzengewebe deutlich heller als andere Objekte.



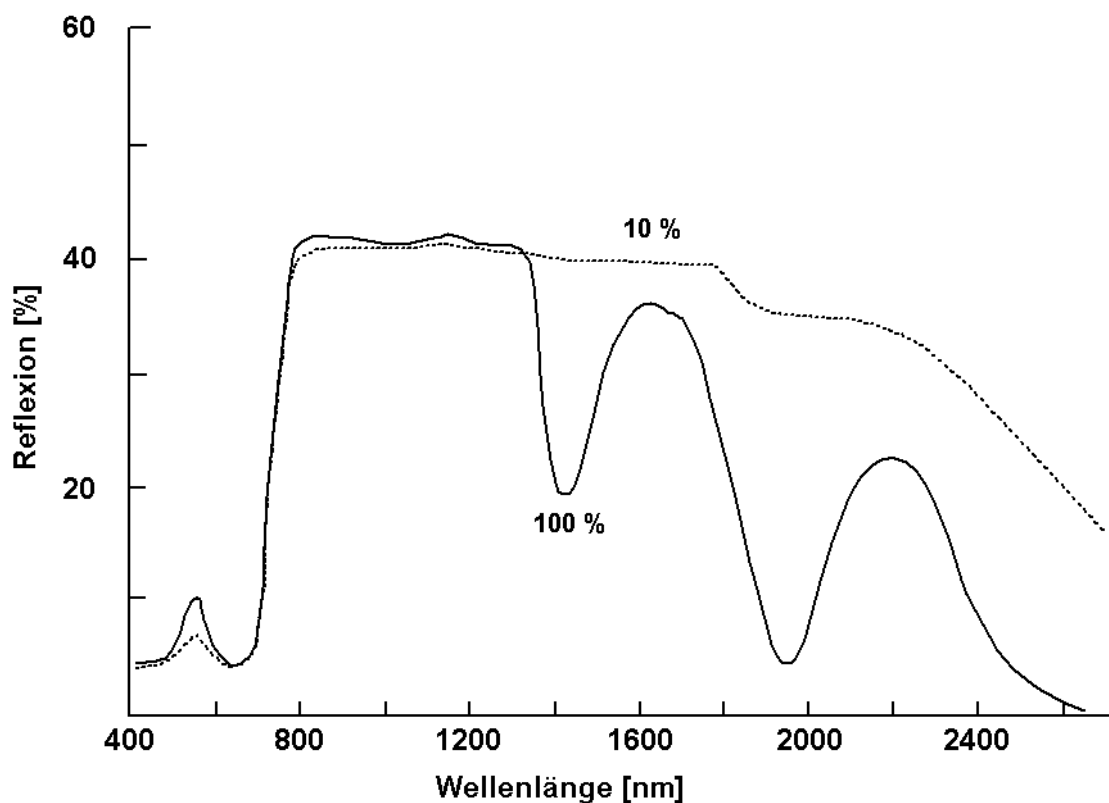
**Abb. 2-10:** Der „Wood-Effekt“ im Infrarotbild.

Links: Panchromatische Aufnahme, rechts: Infrarotbild (Aufnahme vom 13.05.2003).

Der „Wood-Effekt“ konnte auch militärisch genutzt werden. Im Zweiten Weltkrieg entwickelte *Kodak* einen infrarotempfindlichen Film, mit dem versteckte Objekte enttarnt werden konnten. Die grünen Tarnfarben wiesen nicht das Spektralverhalten von Vegetation auf, und waren so leicht zu identifizieren (DRURY 1991).

### Mittleres Infrarot

Die optischen Eigenschaften von pflanzlichem Gewebe im mittleren Infrarot (1300 – 2500 nm) sind hauptsächlich vom Wassergehalt abhängig. Die wichtigsten Absorptionsbanden von Wasser liegen bei 1200 nm, 1450 nm, 1940 nm und 2500 nm. Trocknet ein Blatt aus, so steigen die Reflexion und Transmission im mittleren Infrarot an (Abb. 2-11).



**Abb. 2-11:** Effekt der Dehydratation auf die Reflexionssignatur von Bohnenblättern. (100 % = relativer Wassergehalt eines Blattes in frischem Zustand (KNIPLING 1970, verändert)).

Die Inhaltsstoffe Cellulose, Lignin und Stärke absorbieren zwar in den gleichen Wellenlängenbereichen wie Wasser, allerdings werden ihre Absorptionsbereiche erst bei der Dehydrierung von Blättern sichtbar (VERDEBOUT ET AL. 1994).

### *Seneszenz und Mangelerscheinungen*

Fernerkundung kann als diagnostisches Instrument zur Beurteilung der Pflanzenvitalität herangezogen werden. Bei der Schädigung oder Alterung von Vegetation nimmt die Reflexion im sichtbaren Rot zu. Grund hierfür ist, dass die Photosynthese nur noch eingeschränkt funktioniert, es zu einer Verringerung des Chlorophyllgehaltes, und damit einhergehend einer verringerten Chlorophyllabsorption kommt. Wird das Zellgewebe geschädigt oder trocknet die Vegetation aus, nimmt die Reflexion im nahen Infrarot ab. Im mittleren Infrarot kommt es dagegen durch die verringerte Absorption von Wasser zu einer Zunahme des Reflexionssignals.

Nährstoffmangel wirkt sich in der Regel auf den Chlorophyllgehalt der Pflanze aus. Chlorosen beeinflussen die Blattreflexion im sichtbaren Wellenlängenbereich. Stickstoffmangel führt zu Veränderungen im gesamten Spektrum. Die Reflexion im sichtbaren Wellenlängenbereich ist erhöht, da weniger Chlorophyll vorhanden ist und folglich weniger Licht absorbiert wird. Im nahen Infrarot nimmt das Reflexionsvermögen ab, da sich durch den Nährstoffmangel weniger Blattmasse entwickelt (GUYOT 1990). Je nach Nährstoff kann es auch zu Veränderungen der Blattmorphologie kommen, z.B. löffelartige Deformation der Blätter bei Schwefelmangel in Raps (SCHNUG & HANEKLAUS 1998).

Zusammenfassend lassen sich drei wichtige Spektralbereiche für die Reflexion von Pflanzen ausweisen:

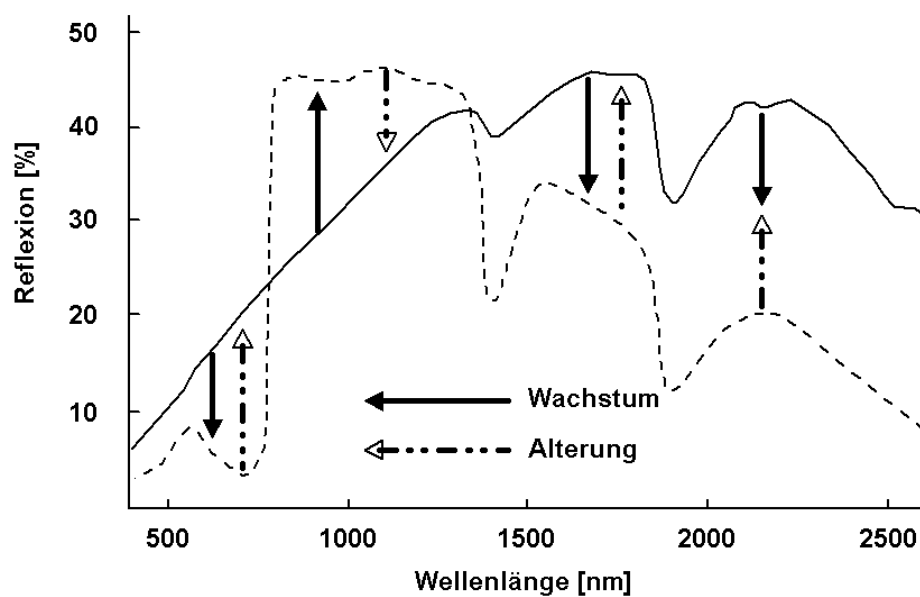
1. Sichtbarer Wellenlängenbereich (400 – 700 nm):  
Charakterisiert durch die starke Absorption durch Pflanzenpigmente und daraus resultierend geringe Reflexions- und Transmissionswerte.
2. Nahes Infrarot (700 – 1300 nm):  
Starke Reflexion und Transmission mit fast konstanten Werten für den Wellenlängenbereich, hervorgerufen durch Reflexionen an den Gewebestrukturen.
3. Mittleres Infrarot (1300 – 2500 nm):  
Absorption durch Wasser und Pigmente.

### 2.3 Reflexionseigenschaften von Pflanzenbeständen

Die bisher getroffenen Aussagen sind meist Ergebnisse von Laboruntersuchungen an Einzelpflanzen. Unter Feldbedingungen ist das Reflexionssignal jedoch immer eine Mischung verschiedenartiger Komponenten. Es setzt sich aus einer Vielzahl von Signalen unterschiedlicher Einzelpflanzen, Blätter, Stängel, sowie Boden und Schattenwirkungen zusammen.

Hinzu kommen die Stellung und Größe der Blattoorgane, die Dichte des Bestandes (Boden- und Schattenanteil), sowie die vertikale (Oberflächenrauigkeit) und horizontale (Reihenrichtung) Gliederung des Bestandes. Diese Faktoren sind jedoch zeitlich nicht konstant, sondern unterliegen in Laufe der Entwicklung der Pflanzen erheblichen Veränderungen (ERASMI 2002).

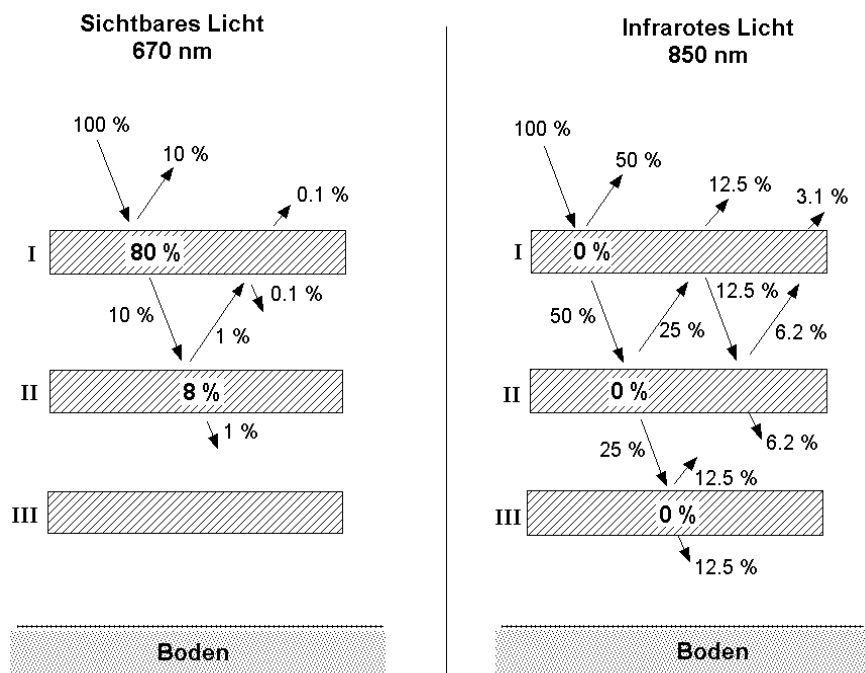
Das Reflexionsspektrum eines Pflanzenbestandes verhält sich wie eine Kombination aus Vegetations- und Bodenspektrum (Abb. 2-12). Zu Beginn der Vegetationsperiode überwiegt der Anteil des Bodens an der Gesamtreflexion. Dieser Anteil nimmt im weiteren Zeitverlauf ab und wird durch das Reflexionssignal von Vegetation ersetzt. Gegen Ende der Vegetationsperiode, wenn die Pflanzen abreifen, kommt es zu einer Umkehrung der Verhältnisse und die Reflexion des Bodens gewinnt wieder größeren Anteil am Gesamtsignal (GUYOT 1990).



**Abb. 2-12:** Schematische Darstellung der Reflexionseigenschaften eines Pflanzenbestandes über die Vegetationsperiode bis zur Abreife (GUYOT 1990, verändert).

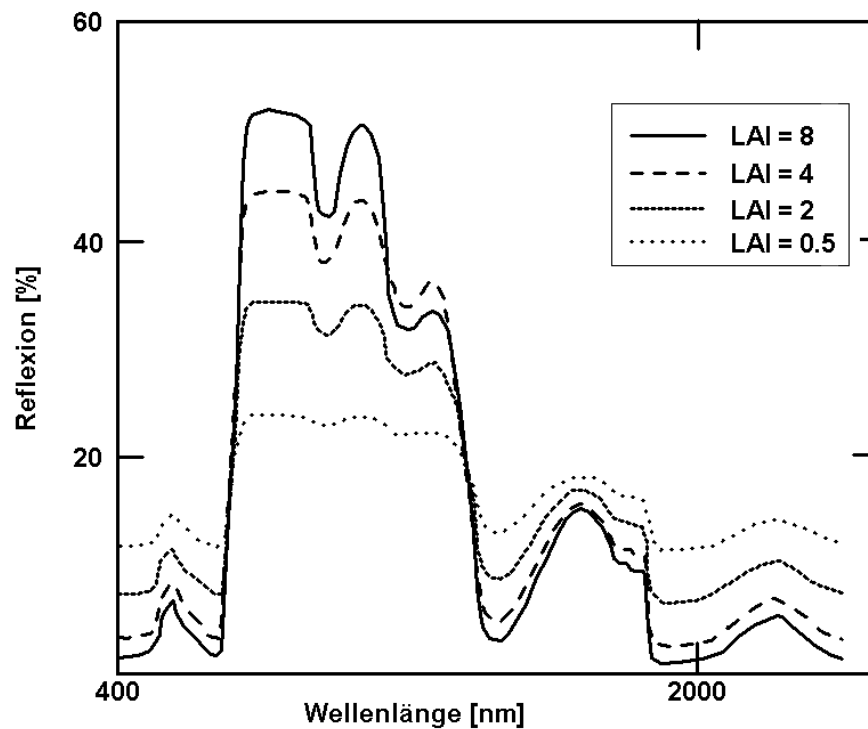
Der Beginn der Vegetationsperiode ist durch einen Massenzuwachs und eine starke Zunahme an Blattfläche gekennzeichnet. Die zunächst einfache und ab der Schoßphase mehrfache Überdeckung des Bodens mit Blattfläche zeigt sich auch in der Spektralsignatur. Das sichtbare Licht wird hauptsächlich in den oberen Blattetagen eines Pflanzenbestandes absorbiert und nur in geringem Umfang reflektiert. Die Durchlässigkeit für Licht dieses Wellenlängenbereiches ist gering.

Strahlung aus dem nahen Infrarot erreicht auch tiefere Blattschichten, da die Transmissivität in diesem Wellenlängenbereich viel höher ist (Abb. 2-13). Das führt dazu, dass mit zunehmender Blattflächenanzahl (Leaf Area Index, LAI) mehr infrarotes Licht reflektiert wird. Direkte Reflexion und Transmission wirken hier zusammen (SCHELLBERG 1990).



**Abb. 2-13:** Schematische Darstellung der Reflexion, Transmission und Absorption von sichtbarem und infrarotem Licht in einem Pflanzenbestand (CLEVERS 1986, verändert).

In der Gesamtwirkung führt eine Zunahme der Anzahl der Blattschichten generell zu einer Zunahme der Reflexion im nahen Infrarot ( Abb. 2-14).



**Abb. 2-14:** Einfluss des Blattflächenindex (LAI) auf die Reflexionssignatur von Pflanzenbeständen (BARET & JACQUEMOUD 1994, verändert).

### Vegetationsindex

Auf der Grundlage dieser Reflexionsveränderungen mit Zunahme des LAI bzw. der Biomasse wurden die sogenannten Vegetationsindizes entwickelt (JORDAN 1969, PEARSON & MILLER 1972, ROUSE ET AL. 1974).

Den meisten Vegetationsindizes ist gemein, dass sie die Reflexionen von Rot und nahem Infrarot in Bezug zueinander setzen. Die zwei bekanntesten Vertreter sind der *Simple Ratio* (SR) und der *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).

Der SR wurde von JORDAN 1969 entwickelt und berechnet sich wie folgt:

$$SR = \frac{\rho_{nIR}}{\rho_r} \quad [2.1]$$

Dabei wird der Reflexionswert im nahen Infrarot ( $\rho_{nIR}$ ) durch den Wert der Reflexion im roten Wellenlängenbereich ( $\rho_r$ ) dividiert. Der resultierende Wertebereich liegt zwischen 0 und unendlich. Der Nachteil dieses Index besteht darin, dass der Vegetationsindex nur für den Standort gültig ist, an dem er ermittelt wurde. Wird der Index an einem anderen Standort mit unterschiedlichen Atmosphärenverhältnissen oder aber zu einem anderen Zeitpunkt ermittelt,



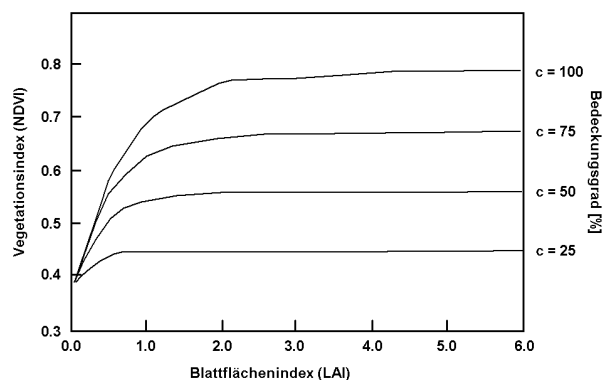
sind die Ergebnisse nicht miteinander vergleichbar. Dieser Nachteil wurde durch die Entwicklung des NDVI (ROUSE ET AL. 1974) kompensiert. Durch eine einfache Normierung ist es möglich, die Indexwerte des NDVI vergleichbar zu machen. Der NDVI berechnet sich nach:

$$NDVI = \frac{\rho_{nIR} - \rho_r}{\rho_{nIR} + \rho_r} \quad [2.2]$$

Der Wertebereich des NDVI liegt zwischen  $-1$  und  $+1$ . Der NDVI ist mittlerweile der gebräuchlichste Vegetationsindex (GOEL 1988). Der besondere Vorteil dieses Ratio-Index liegt darin, dass Effekte von Beleuchtungsunterschieden, Schatten und Atmosphäreneinfluss limitiert werden (LEBLON 1997), da angenommen wird, dass diese Störfaktoren in gleichem Umfang auf die unterschiedlichen Spektralbänder wirken.

Das Hauptproblem des NDVI liegt in seiner Sensitivität auf Reflexionen des Bodens. Die Reflexionssignatur von Böden steigt ebenfalls vom sichtbaren Rot zum nahen Infrarot an. Damit lässt sich für den Boden auch ein positiver Vegetationsindex berechnen. Labor- und Feldstudien haben ergeben, dass erst ab einem NDVI von über  $0.2$  die Vegetation den Hauptanteil am Reflexionssignal hat (LACAZE 1996).

Eine besondere Eigenschaft des NDVI ist die Sättigung mit zunehmendem Blattflächenindex. Abbildung 2-15 zeigt den Vegetationsindex NDVI in Abhängigkeit vom LAI und Bedeckungsgrad.



**Abb. 2-15:** Der Vegetationsindex (NDVI) in Abhängigkeit vom LAI und Bedeckungsgrad (c) (SELLERS 1985, verändert).

Das heißt, dass die Zunahme der Blattfläche nicht mehr in einer Zunahme des NDVI resultiert. Die Sättigung des Vegetationsindex wird je nach Bedeckungsgrad bei einem LAI zwischen 1 und 3 erreicht. Andere Studien geben je nach Typ der Vegetation und Ausgangsbedingungen einen LAI von 2 – 6 als Sättigungsgrenze an (HATFIELD ET AL. 1985).

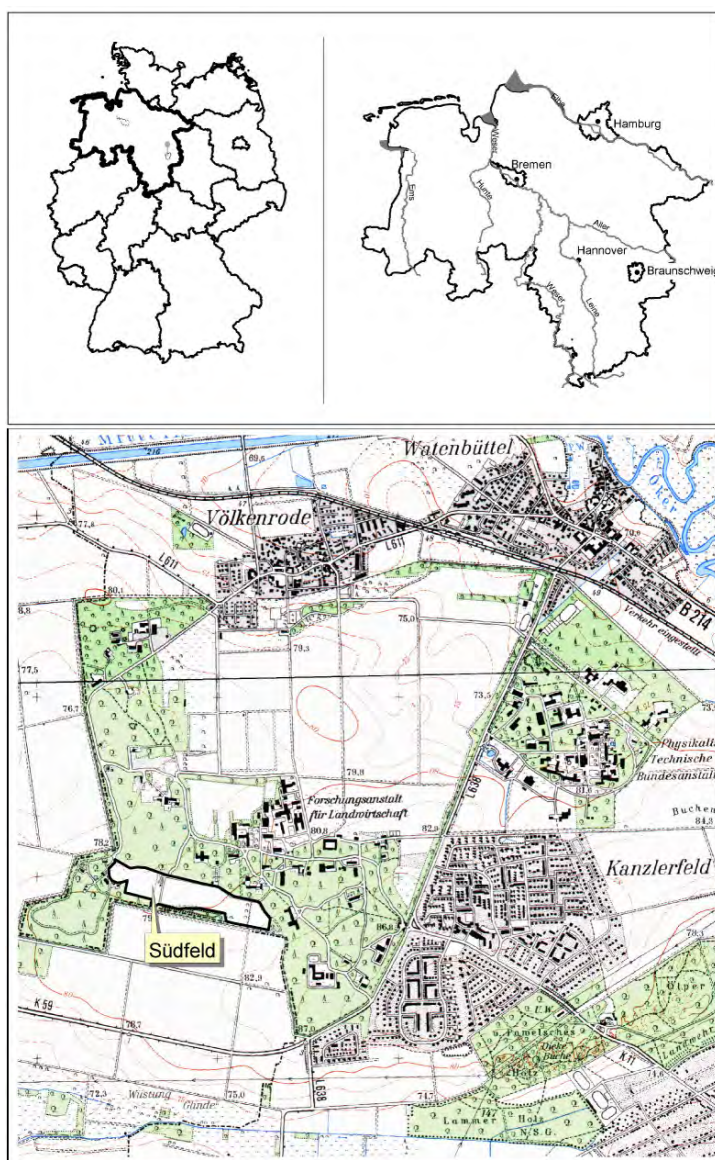
In einer Vielzahl von Studien wurden die Zusammenhänge des NDVI unter Anderem mit Biomasse, LAI, Wassergehalt und Chlorophyllgehalt nachgewiesen (TUCKER 1979, WANJURA & HATFIELD 1986, WIEGAND ET AL. 1979, 1992).

Zur Eliminierung des Bodeneinflusses auf den NDVI wurde eine Vielzahl modifizierter Indizes entwickelt. RAY (1994) und BANNARI ET AL. (1995) geben eine gute Übersicht über mehr als 30 verschiedene Vegetationsindizes. Letztendlich stellen Vegetationsindizes jedoch lediglich ein Hilfsmittel zur quantitativen Bestimmung von Pflanzenvitalität aus Spektraldaten zur Verfügung (CAMPBELL 1987). Sie weisen dabei eine bessere Empfindlichkeit für die Detektion von Biomasse auf als einzelne Spektralbänder (ASRAR ET AL. 1984).

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Standortbeschreibung

Die Entwicklungsarbeiten der LASSIE Systeme erfolgte auf dem Gelände der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in Braunschweig-Völkenrode ( $10^{\circ} 27' E$ ,  $52^{\circ} 18' N$ , 81 m über NN) (Abb. 3-1).



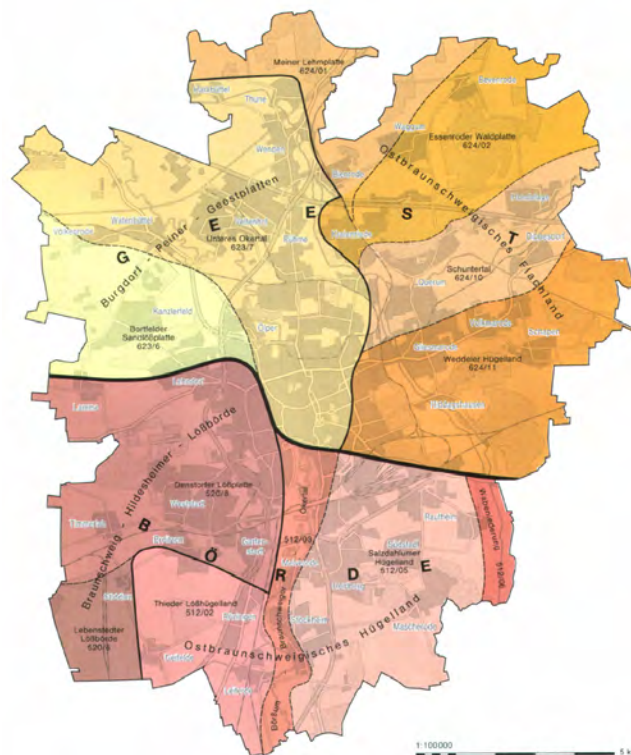
**Abb. 3-1:** Übersichtskarte zum Versuchsfeld „Südfeld“ des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde. Kartengrundlage Topographische Karte 1: 25.000 -Blatt 3628 + 3728. Vervielfältigt mit Erlaubnis des Herausgebers: LGN – Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen.

### Standortmerkmale

Braunschweig liegt nördlich des Harz im Übergangsbereich zwischen den schwach hügeligen Ausläufern der deutschen Mittelgebirgsschwelle und dem Norddeutschen Tiefland. Naturräumlich ist das Stadtgebiet von Braunschweig zweigeteilt: Der Nordteil der Stadt befindet sich auf Geestflächen, der Süden des Stadtgebietes ist von Bördelandschaften geprägt (STADT BRAUNSCHWEIG 2002). Geest und Börde sind typische naturräumlichen Einheiten, die während des Quartärs, also der letzten Eiszeiten entstanden sind.

Bei der Geest handelt es sich um Altmoränengebiete, die aus eiszeitlichen Sanden bestehen. Südlich der Geest schließt sich die durch fruchtbare Lößablagerungen geprägte Bördelandschaft an. Löß ist ein äolisches Sediment, das aus den vegetationslosen Sand- und Schuttflächen vor dem Rand der Inlandeisflächen ausgeweht wurde und sich in mächtigen Schichten an den Mittelgebirgsrändern ansammeln konnte.

Das Gelände der FAL liegt am westlichen Rand der beiden Naturräume im Bereich der Burgdorf-Peiner-Geestplatten, das „Südfeld“ selbst befindet sich auf der Bortfelder Sandlößplatte (Abb. 3-2).



**Abb. 3-2:** Naturräumliche Gliederung des Stadtgebietes von Braunschweig (STADT BRAUNSCHWEIG 2002, Kapitel 1, verändert).

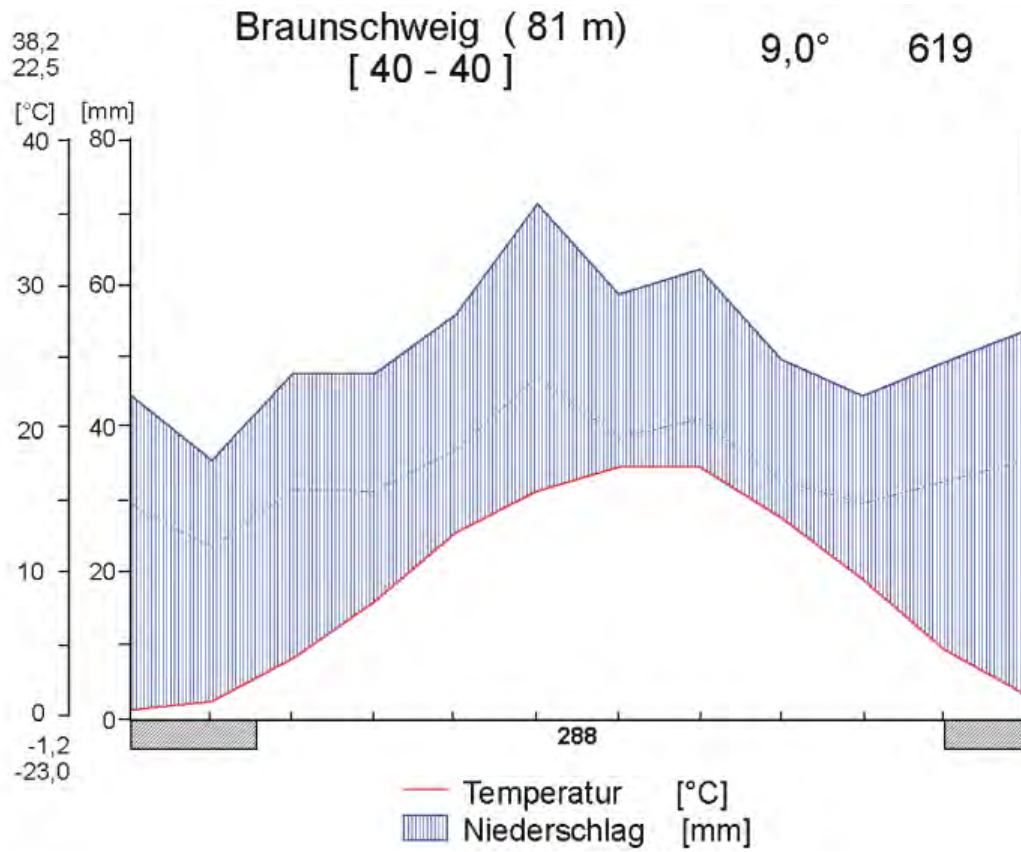
### *Boden*

Die naturräumlichen Struktureinheiten der Geest spiegeln sich auch in der Bodenbildung wieder. Das „Südfeld“ ist von schluffig-lehmigem Sand geprägt, der Boden wird als sandige Braunerde angesprochen (INSTITUT FÜR PFLANZENERNÄHRUNG UND BODENKUNDE 2003). Das Ausgangsmaterial der Bodenbildung ist glazifluviatiler Sand, zum Teil über Geschiebelehm. Bis 50 – 60 cm Tiefe liegt schluffig-lehmiger Sand vor, darunter schwach lehmiger Sand bis Sand. Im Oberboden beträgt der Sandanteil 45 %. Dieser steigt auf 70 % in 50 cm Tiefe an und erreicht in 1 m Tiefe fast 90 %. Die Zunahme erfolgt dabei vor allem in der Mittelsandfraktion. Der Schluffanteil nimmt von 50 % auf 5 % ab, und der Tongehalt ist in allen Schichten mit 5 % konstant (SCHMIDT ET AL. 1996).

Mit dem Gesetz über die Bewertung des Kulturbodens (Bodenschätzungsgesetz) vom 16.10.1934 wurde die Ackerzahl als Bewertungszahl für die Ertragsfähigkeit landwirtschaftlich genutzter Böden in Deutschland eingeführt. Es handelt sich dabei um eine komplexe Bewertungszahl, die neben der Bodeneigenschaften (Bodenart, Entstehungsart, Zustandsstufe) auch noch die Klima und Reliefverhältnisse berücksichtigt. Die Ackerzahlen können zwischen 10 (schlecht) und 100 (sehr gut) liegen, wobei ein Acker mit der Ackerzahl 50 etwa die Hälfte des Ertrags erwarten lässt wie ein Acker mit der Ackerzahl 100. Das „Südfeld“ ist mit einer Boden- und Ackerzahl von 33/42 bewertet worden und liegt damit im mittleren Qualitätsbereich der Böden des Braunschweiger Stadtgebietes, die von 30 Punkten im Geestbereich im Norden der Stadt bis 75 Punkten im südlichen Bördebereich variieren (STADT BRAUNSCHWEIG 2002).

### *Klima*

Braunschweig liegt im Übergangsbereich zwischen ozeanisch und kontinental geprägten Klimaregionen. Das führt zu einer gedämpften Jahresschwankung bei Temperatur und Niederschlag. Die Temperatur liegt im Jahresdurchschnitt bei + 9,0° C, die mittleren Niederschläge bei 619 mm, die Anzahl der frostfreien Tage beträgt 288. Abbildung 3-3 zeigt das Klimadiagramm nach WALTER für Braunschweig (INSTITUT FÜR PFLANZENERNÄHRUNG UND BODENKUNDE 2003).



**Abb. 3-3:** Klimadiagramm nach WALTER/LIETH für den Standort Braunschweig, Beobachtungsjahre 1961–2000 (INSTITUT FÜR PFLANZENERNÄHRUNG UND BODENKUNDE 2003).

### 3.2 Das Aufnahmesystem LASSIE

Ein System zur bodennahen Fernerkundung benötigt im wesentlichen 4 Komponenten (Abb. 3-4):



Abb. 3-4: Komponenten für ein bodennahes Fernerkundungssystem.

#### 1) Sensoreinheit:

Die Sensoreinheit soll die zu beobachtenden Objekte möglichst störungsfrei aufzeichnen. Zur Bilderfassung eignen sich Kameras, die in der Lage sind Licht verschiedener Wellenlängen aufzuzeichnen. Durch die Wahl geeigneter Farbfilter kann die spektrale Empfindlichkeit der Kameras definiert werden. Um eine scharfe Abbildung des Beobachtungsobjektes zu gewährleisten, muss das Sensorsystem mit einer steuerbaren Optik ausgestattet sein. Die Sensoreinheit besteht aus den Einzelkomponenten CCD-Kamera, Kameraoptik und Spektralfilter.

#### 2) Positionierungseinheit:

Die Ausrichtung der Sensoreinheit zum Objekt hin, sowie die Lage im Raum wird durch einen Schwenk-/Neigekopf variiert.

### 3) Einheit zur Datenerfassung:

Die vom Sensorsystem gelieferten Daten müssen in ein computerlesbares Format umgewandelt werden (Digitalisierung) und vom Sensor zur Auswerteeinheit transferiert werden. Sogenannte Videoserver organisieren die Kamerasteuerung und Rohdatenverarbeitung.

### 4) Archiv- und Auswerteeinheit

Die anfallenden Rohdaten werden zunächst archiviert und anschließend mit Hilfe von Spezialsoftware bearbeitet und ausgewertet. Als Archiv- und Auswerteeinheit kommt ein Personalcomputer zum Einsatz.

Konventionelle Überwachungskamerasysteme erfüllen bereits eine Vielzahl der geforderten Eigenschaften. Insbesondere Überwachungssysteme, die innerhalb eines Computernetzwerks arbeiten eignen sich für die bodengestützte Fernerkundung. Während das Sensorsystem und die Steuerelektronik vor Ort verfügbar sein müssen, wird das gesamte System über Intra- und Internet betrieben.

Zunächst wurde ein Komplettsystem bestehend aus einer Farbkamera mit CCD-Chip, einem fernsteuerbaren Schwenk-/Neigekopf sowie einem Videoserver zur Kamerasteuerung und Anbindung an das Internet eingesetzt. Dieses System wird im weiteren als *LASSIE- $\alpha$*  bezeichnet.

Im Verlauf des praktischen Einsatzes zeigte sich jedoch, dass die einfache Farbkamera nicht die geforderte radiometrische Genauigkeit erreichen konnte (vgl. Kapitel 3.2.1.1). Deshalb wurde das System modifiziert und durch zwei Kameras (3-CCD Farbe, 1-CCD Infrarot) und fernsteuerbare Objektive erweitert. Dieses System wird *LASSIE- $\beta$*  genannt.

#### 3.2.1 *Komponentenauswahl*

Die technischen Eigenschaften und Funktionsweisen der verwendeten Einzelkomponenten werden im Folgenden genauer erläutert. Die Tabelle 3-1 zeigt zunächst eine Zusammenstellung der Komponenten:



**Tab. 3-1:** Zusammenstellung der verwendeten Komponenten für die LASSIE Prototypen.

Sensoreinheit	LASSIE- $\alpha$		LASSIE- $\beta$	
	Kamera	Sony FCB-IX47P	JAI M90	Hitachi KP200
	1 x 1/4" CCD	3 x 1/3" CCD	1 x 1/2" CCD	
Bildhauptpunkt (x)	1,825 mm	2,450 mm	3,225 mm	
Bildhauptpunkt (y)	1,370 mm	1,850 mm	4,420 mm	
Physikalische Pixelgröße (x)	5,18 $\mu\text{m}$	6,5 $\mu\text{m}$	8,6 $\mu\text{m}$	
Physikalische Pixelgröße (y)	4,76 $\mu\text{m}$	6,25 $\mu\text{m}$	8,3 $\mu\text{m}$	
Effektive Bildgröße (H x V)	3,65 x 2,74 mm	4,90 x 3,70 mm	6,45 x 4,84 mm	
Spektrale Empfindlichkeit (blau)		397 – 522 nm ( $\lambda_{\text{max}} = 456 \text{ nm}$ )	-	
Spektrale Empfindlichkeit (grün)	380 – 730 nm	461 – 646 nm ( $\lambda_{\text{max}} = 538 \text{ nm}$ )	-	
Spektrale Empfindlichkeit (rot)		539 – 729 nm ( $\lambda_{\text{max}} = 699 \text{ nm}$ )	-	
Spektrale Empfindlichkeit (IR)	-	-	403 – 1065 nm ( $\lambda_{\text{max}} = 610 \text{ nm}$ )	
Optik	Autofokus	steuerbarer Zoom/Focus		
Brennweite	4,1 – 73,8 mm	8 – 120,0 mm		
Horizontaler Blickwinkel (IFOV)*	2,7° - 48,0°	3,0° - 43,6°		
Filter	Filtrop IR Sperrfilter	Hama Sky 1 B	Göttinger Farbfilter Typ 1013	
Effektiver Spektralbereich** (blau)		400 – 475 nm	-	
Effektiver Spektralbereich** (grün)	-	490 – 588 nm	-	
Effektiver Spektralbereich** (rot)		586 – 688 nm	-	
Effektiver Spektralbereich** (IR)	-	-	708 – 852 nm	
Positionierungseinheit				
Schwenk-/Neigekopf	eneo VPT-40	eneo VPT-41/RS		
Einheit zur Datenerfassung				
Videoserver	Axis 2400 Videoserver			
Pixelauflösung	704 x 576			
<b>Archiv- und Auswerteeinheit</b>				
Software	Seotec Viewpoint, ERDAS-Imagine® Orthobase™			
Personalcomputer	heutiger Standard			

\* IFOV = instantaneous field of view, momentanes Gesichtsfeld

\*\* spektrale Bandbreite nach Filterdurchgang ausgehend von der spektralen Halbwertsbreite  
(Full Width Half Maximum (FWHM))

### 3.2.1.1 Sensoreinheit

Für beide LASSIE Prototypen kamen Kameras zum Einsatz, die auf CCD-Technologie (Charge Coupled Device) basieren. Die Funktionsweise von CCD-Chips soll an dieser Stelle näher erläutert werden.

Sogenannte CCD Arrays sind flächenhaft angeordnete Halbleiterelemente, bestehend aus Silizium- oder Germanium-Kristallen, die mit Spuren von Elementen der dritten Hauptgruppe (B, Al, Ga, In) verunreinigt (dotiert) wurden. Nimmt nun ein Bor Atom den Platz eines Silizium Atoms im Kristallgitter ein, so entsteht ein Elektronenloch (Defektelektron). Dieses Loch kann durch ein Elektron einer benachbarten Bindung besetzt werden, wobei jedoch ein neues Loch entsteht. Auf diese Weise können sich Elektronen durch den Kristall bewegen. Einen Halbleiter, der Elektronenbewegungen auf Grund von Defektelektronen ermöglicht wird als p-Halbleiter bezeichnet (MORTIMER 1987).

Ein CCD-Chip besteht aus einem p-dotierten Siliziumsubstrat mit einer aufgedampften Isolatorschicht aus Siliziumdioxid. Auf dem Isolator sind rasterförmige Streifen aus polykristallinem Silizium aufgebracht, die die Reihen der Bildpunkte (picture elements, kurz: Pixel) bilden.

Während der Belichtung des CCD-Chips wird eine Spannung angelegt und das p-dotierte Silizium negativ geladen. Unter der Isolatorschicht entsteht dadurch eine Potentialsenke. Die einfallenden Licht-Photonen durchdringen die beiden oberen Schichten und brechen im p-dotierten Silizium die kovalenten Bindungen auf und erzeugen ein Elektron-Loch-Paar (innerer Photoeffekt). Dabei ist die Anzahl der freigesetzten Elektronen linear proportional zur Zahl der einfallenden Photonen (BÜCHNER 2002). Die Ladungen werden anschließend ausgelesen und mit einem Analog/Digital-Wandler in digitale Zahlenwerte umgesetzt.

Im Vergleich zu analogen, mit Fotoemulsionen arbeitenden Kameras, weisen CCD-Kameras eine Reihe von Vorteilen auf:

- a) Hohe Empfindlichkeit: Die Quantenausbeute, also der prozentuale Anteil registrierter Photonen im Verhältnis zu einem idealen Detektor, erreicht bei CCD-Kameras bis zu 80 %, wohingegen sie bei herkömmlichen Photoplatten bei 2-4 % liegt. Das menschliche Auge erreicht sogar nur eine Quantenausbeute von etwa 1 % (BÜCHNER 2002).

- b) Lineare Empfindlichkeit: CCD-Chips weisen bis zur Sättigung (maximale Aufnahme von Photonen) eine lineare Empfindlichkeit auf. Die Information bleibt auch bei dunklen und hellen Bildbereichen erhalten (Ausnahme: Sättigung). Unterbelichtung wie bei fotografischem Filmmaterial tritt nicht auf.
- c) Spektrale Empfindlichkeit: CCD-Chips sind in einem Wellenlängenbereich zwischen 400 nm bis 1000 nm empfindlich, und lassen sich damit universell einsetzen (inklusive Infrarotaufnahmen).

Die Sensoreinheit des LASSIE- $\alpha$  Systems bestand aus einer *Sony* CCD Farbkamera, die mit Autofokus und einem Kurzpassfilter der Firma *Filtrop* für den sichtbaren Wellenlängenbereich ausgerüstet war.

Das Nachfolgesystem LASSIE- $\beta$  bestand aus einer 3-CCD Kamera der Firma *JAI* und einer infrarot-empfindlichen CCD Kamera von *Hitachi*. Die beiden Kameras wurden jeweils mit Motorzoom Objektiven der Firma *eneo* ausgestattet. Diese wurden parallel geschaltet, um für beide Kameras die gleiche Zoom-Einstellung zu gewährleisten. Die 3-CCD Kamera wurde mit einem Skylight Filter der Firma *Hama*, das störendes ultraviolettes Licht und Dunst herausfiltert, ausgestattet. Die Infrarot-Kamera wurde mit einem Langpassfilter der *Göttinger Farbfilter GmbH* für den infraroten Wellenlängenbereich versehen. Das Filter blockiert das sichtbare Licht und lässt nur infrarotes Licht hindurch.

Der wesentliche Unterschied beider Sensorsysteme liegt bei der Farb-Rekonstruktion. CCD-Chips sind nur in der Lage, Helligkeitsunterschiede aufzuzeichnen. Um Farbinformation innerhalb des Bildes zu gewinnen gibt es technisch zwei Ansätze:

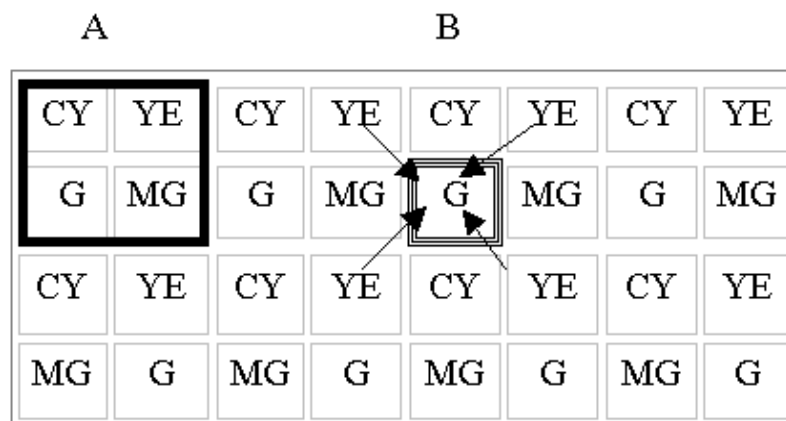
- 1) Kameras mit einem CCD-Chip

Die Oberfläche des CCD-Chips wird mit farbigen Filtern bedruckt, die nur Licht bestimmter Wellenlängen hindurchlassen. Diese sogenannten Mosaikfilter gibt es in unterschiedlichen Varianten. Die zwei am häufigsten verwendeten Arten sind Primär-Farbfilter, die nur die Grundfarben Rot, Grün und Blau (RGB) hindurchlassen (additive Farbsynthese), oder Komplementär-Farbfilter die nur für die Komplementärfarben Cyan, Magenta und Gelb (CMY) durchlässig sind. Die Primärfarbfilter gewährleisten eine bessere Farbproduktion

allerdings auf Kosten der Gesamtempfindlichkeit, da diese Filter im Vergleich zu den Komplementär-Farbfiltern 30 % weniger Licht transmittieren (PULNIX 1990). Dem Vorteil der besseren Lichtausbeute von Komplementär-Farbfiltern steht der Nachteil des rechnerischen Aufwandes gegenüber, da die Grundfarben erst wieder neu errechnet werden müssen.

Da jedes Pixel nur eine Farbinformation aufzeichnen kann werden 4 Einzelpixel zur Berechnung der Farbinformation benötigt. Die herausgefilterten Farben des Pixels werden aus der Information der Nachbarpixel interpoliert. Der grüne Spektralbereich enthält viel Information über den Bildkontrast. Zudem ist das menschliche Auge für Grün empfindlicher als für Rot und Blau (ELACHI 1987). Aus diesem Grund werden zusätzlich Grünfilter aufgedruckt, um das Bild kontrastschärfer abzubilden.

Die eingesetzte *Sony* Kamera verwendet einen Komplementär-Farbfiler mit den Farben Cyan, Gelb (Yellow), Magenta und zusätzlich Grün.



**Abb. 3-5:** Schematische Darstellung der Komplementär-Farbfileranordnung einer 1-CCD-Chip Kamera (SONY 1999, verändert).

Die Anordnung der vier verschiedenen Farbfiler ist in der Abbildung 3-5 an Stelle A dargestellt. Zur Interpolation der herausgefilterten Farbinformation werden die benachbarten Pixel herangezogen. An der Stelle B sind die Pixel markiert, die zu Interpolation der gelben Farbinformation an der Stelle des grünen Pixels benötigt werden.

Die Interpolationsalgorithmen sind bei jedem Kamerahersteller unterschiedlich, so dass selbst baugleiche CCD-Chips unterschiedliche Farbergebnisse liefern können. Die resultierenden Farbwerte einer CCD-Kamera mit einem Chip stellen eine integrale Größe dar

und lassen daher keinen Rückschluss auf die spektrale Zusammensetzung des aufgezeichneten Objektes zu. Eine qualitative spektrale Interpretation der Bilder ist daher nicht möglich.

## 2) Kameras mit drei CCD-Chips

Der Einsatz von je einem CCD-Chip pro Grundfarbe führt zu einer deutlichen Verbesserung der Farb-Rekonstruktion. Das Licht wird von halbdurchlässigen Prismen in drei Lichtströme geteilt und über Farbfilter auf drei separate CCD-Chips geführt (Abb. 3-6).

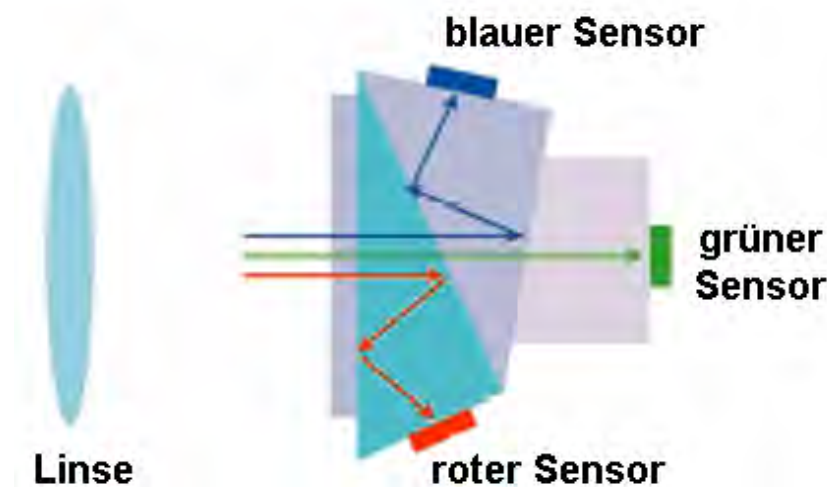
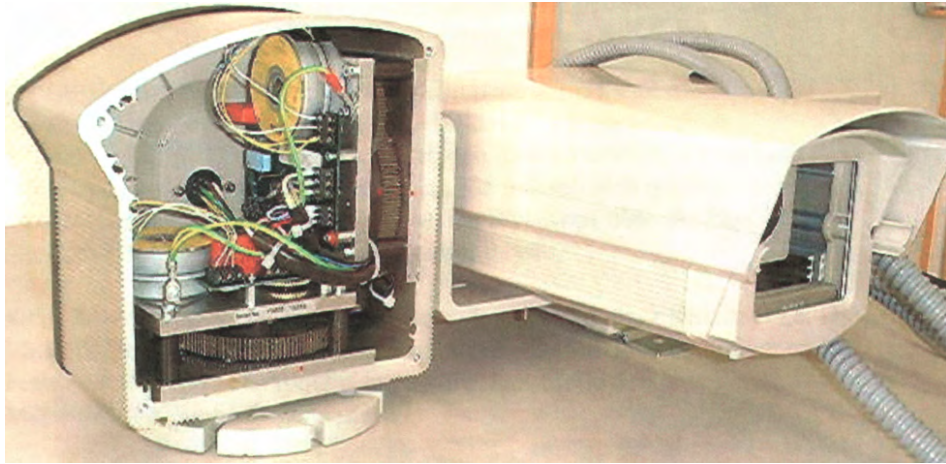


Abb. 3-6: Strahlengang einer 3 CCD-Kamera (JAI 2000, verändert).

Da die Farben ohne Interpolation rekonstruiert werden, entstehen keine Artefakte und die Bilddaten können für eine qualitative spektrale Auswertung verwendet werden. Die einzelnen Chips müssen sehr genau eingepasst werden, damit sie optimal im Strahlengang der Optik liegen. Aufgrund dieser Präzision und der dreifachen Sensoranzahl sind 3-CCD Kameras deutlich teurer aber qualitativ hochwertiger als 1-Chip Kameras.

### 3.2.1.2 Positionierungseinheit

Die Positionierungseinheit bestand aus einem Schwenk-/Neigekopf der Firma *eneo*. Zwei Schrittmotoren erlauben eine Positionierung um  $360^\circ$  in der Horizontalen und  $\pm 90^\circ$  in der Vertikalen. Die Genauigkeit bei der Rückansteuerung einer Position wird mit  $0,2^\circ$  angegeben (ENE0 2002).



**Abb. 3-7:** Geöffneter Schwenk-/Neigekopf mit LASSIE- $\alpha$  System.

Neben den Schrittmotoren ist auch die Steuerelektronik für die Kamera Objektiv im Gehäuse untergebracht. Abbildung 3-7 zeigt den Schwenk-Neigekopf mit der Kamera des LASSIE- $\alpha$  Systems.

### 3.2.1.3 Einheit zur Datenerfassung

Das analoge Videosignal der Kameras muss in eine digitale Form umgewandelt werden, um rechnergestützt weiterverarbeitet werden zu können. Im Bereich der Videoüberwachung setzen sich immer mehr die Videosever Lösungen durch. Als Videosever bezeichnet man Computerhardware zur Erfassung und Weiterverarbeitung von Videosignalen, die an ein elektronisches Netzwerk wie Internet oder Intranet angebunden sind (AXIS 2002). Diese Computer sind speziell für Videoverarbeitung konzipiert und stellen eine Prozessierungskette vom analogen Kamerasignal bis zur Internetpräsentation bereit. Verfolgt man den Signalgang durch einen Videosever, so werden folgende Arbeitsschritte durchlaufen (Abb. 3-8):

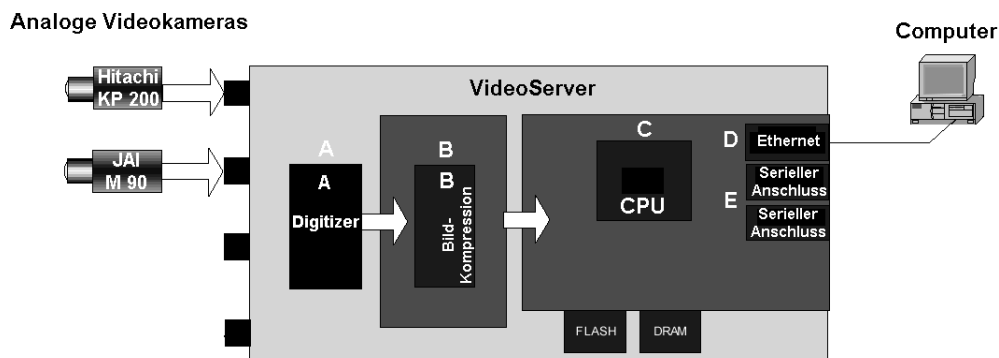
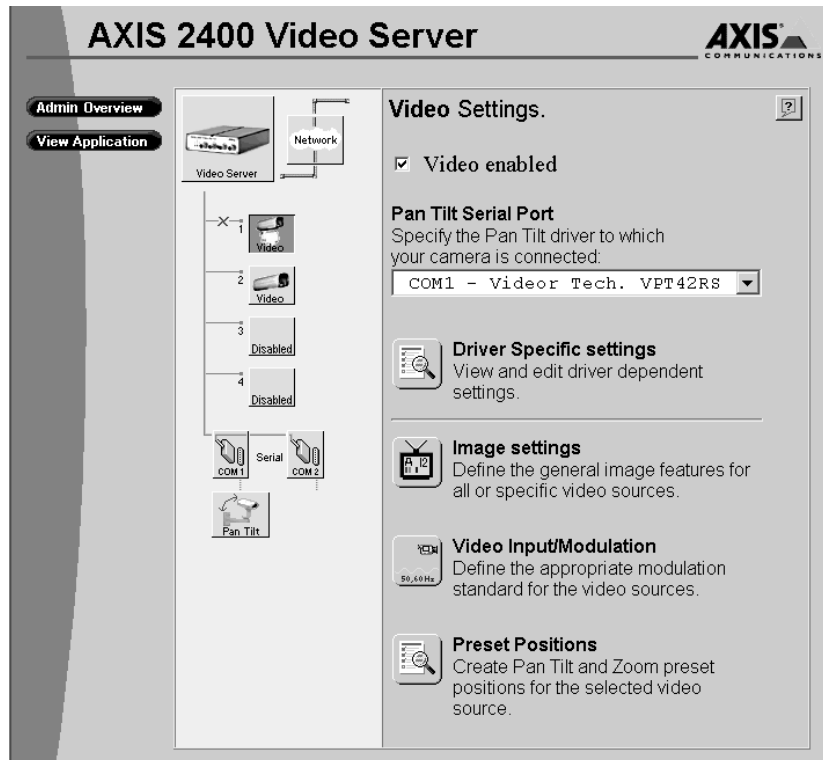


Abb. 3-8: Aufbau eines Videoservers (AXIS 2002, verändert).

1. Das analoge Videosignal wird zunächst im *Digitizer* (A) in ein digitales Videoformat konvertiert.
2. Das digitale Videoformat gelangt zum Komprimierungschip (B). Hier werden die Daten entweder in Bilder im JPEG Format oder in das Videoformat MPEG komprimiert. Die Stärke der Komprimierung ist wählbar. Da es sich bei beiden Formaten um verlustbehaftete Formate handelt, wurde für das Bildformat eine Komprimierungsrate von 0 % gewählt. Es wurden also Originaldaten ausgegeben und aufgezeichnet.
3. In der Hauptprozessoreinheit (Central Processing Unit - CPU) wird die Kommunikation zwischen den Eingabe- und Ausgabedaten verwaltet (C). Neben der Steuerung des Netzwerkes wird hier der Webserver, also die graphische Oberfläche der Internetpräsentation, bereitgestellt (Abb. 3-9). Außerdem koordiniert die CPU weitere Software zur Steuerung des Schwenk-, Neigekopfes und der Motorzoomobjektive über die seriellen Anschlüsse (E).
4. Über die Ethernet Verbindung (D) wird der Videoserver an das Computernetzwerk angeschlossen.

Für die LASSIE-Systeme wurde ein *Axis 2400* Videoserver verwendet. Der Videoserver erlaubt den gleichzeitigen Anschluss und die Steuerung von vier Videokameras. Zunächst war es nur möglich JPEG-Bilder mit einer Komprimierungsrate von 20 % auszugeben. Durch den Einsatz eines neuen Betriebssystems für den Videoserver konnten mit dem LASSIE- $\beta$  System unkomprimierte Bilder aufgezeichnet werden.



**Abb. 3-9:** Der Webserver als graphische Benutzeroberfläche zur Steuerung, Konfiguration und Internetpräsentation des Videoservers.

Die Steuerung und Konfiguration des Videoservers erfolgt über das Netzwerk mit Hilfe des Webserver (Abb. 3-9).

#### 3.2.1.4 Archiv- und Auswerteeinheit

Der Videoserver lieferte ständig Daten, die jedoch nicht direkt in das Netz eingespeist wurden, da die permanenten Datenproduktion das Netz blockiert hätte. Der Videoserver wurde daher über eine Software von einem beliebigen Rechner im Netzwerk angesteuert und zum Senden der Bilddaten aufgefordert. Die Aufnahmezeiten und die Positionen des Schwenk-/Neigekopfes wurden vorprogrammiert, so dass die Bildgewinnung komplett automatisiert werden konnte.

Ausgehend von den Lichtverhältnissen wurden täglich sechs Aufnahmetermine jeweils um 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00 und 15:00 Uhr vorprogrammiert (Abb. 3-10), in denen innerhalb von fünf Minuten das komplette Versuchsfeld erfasst wurde.



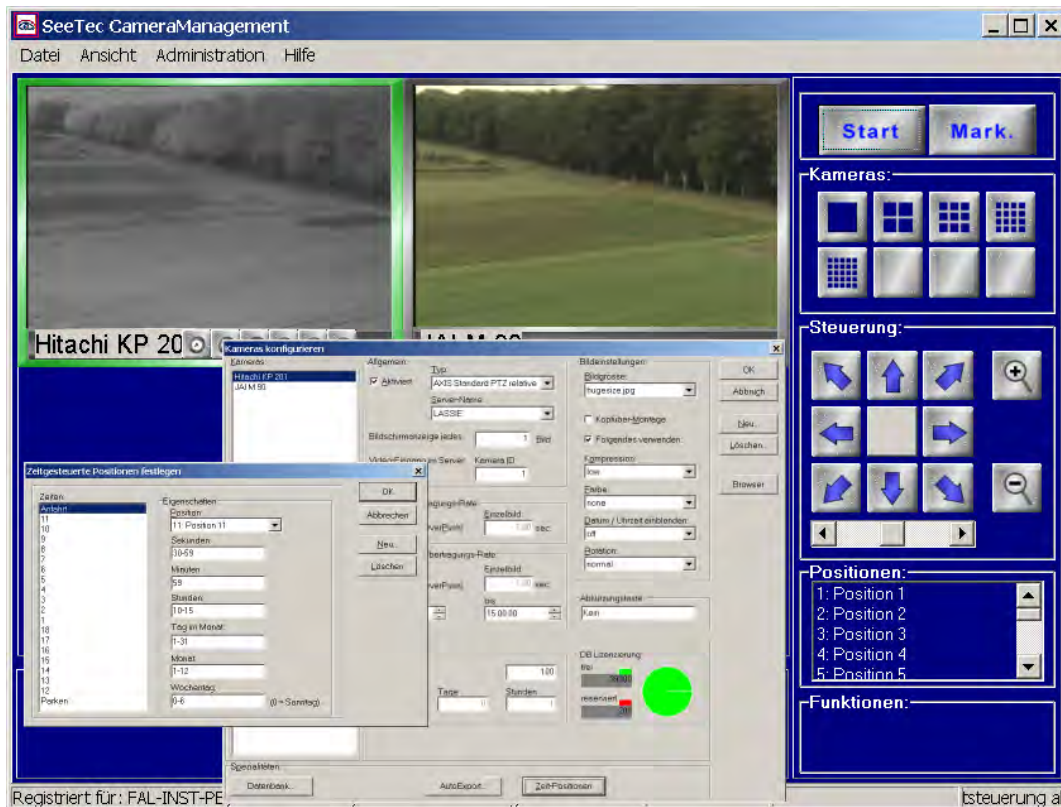


Abb. 3-10: Bildschirmfoto der Videoserver Steuersoftware Seetec.

Der Videoserver wurde mit der *Seetec*-Software der gleichnamigen Firma vorprogrammiert. Damit war die Gewinnung der Rohdaten abgeschlossen. Die Entzerrung und Auswertung der Daten erfolgte mit dem Softwaremodul *Imagine-Orthobase™* innerhalb des Softwarepaketes *Erdas-Imagine®* der Firma *Leica-Geosystems*.

### 3.2.2 Geometrische Eigenschaften

Das Sensorsystem konnte um  $360^\circ$  rotiert und um  $90^\circ$  geneigt werden. Durch die Neigung der Kameras variiert der Einfallswinkel ( $\theta$ ). Bei einem konstanten Öffnungswinkel ( $\beta$ ) des Sensors, vorgegeben durch die Zoomeinstellung der Optik, wird daher die von einem Pixel erfasste Fläche im Fernbereich größer als im Nahbereich (Abb. 3-11).

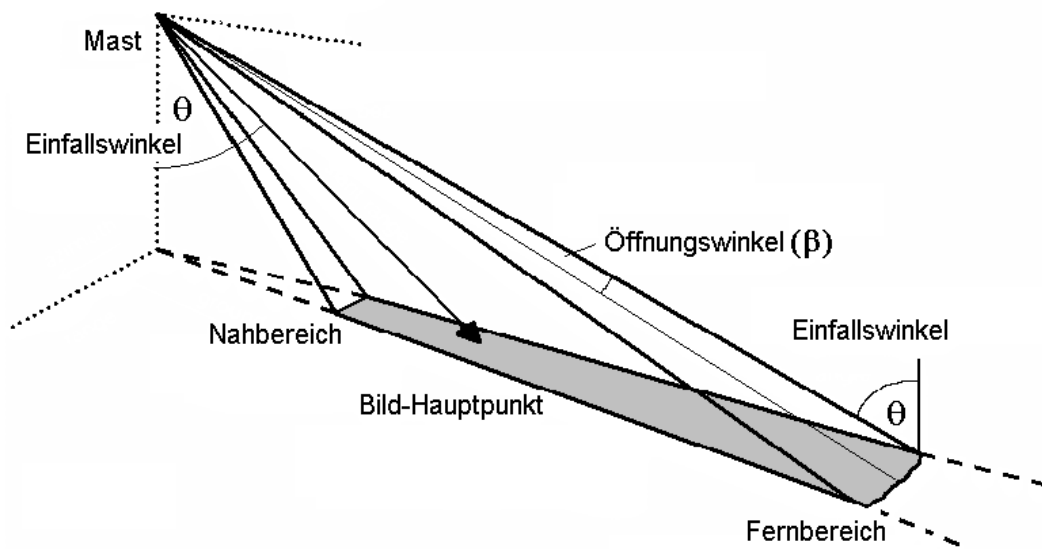


Abb. 3-11: Geometrische Aufnahmesituation.

Die effektive Pixelgröße ist abhängig vom Einfallswinkel. Je größer der Winkel, desto größer ist die aufgezeichnete Fläche, die in einem Pixel zusammengefasst wird ( Abb. 3-12).

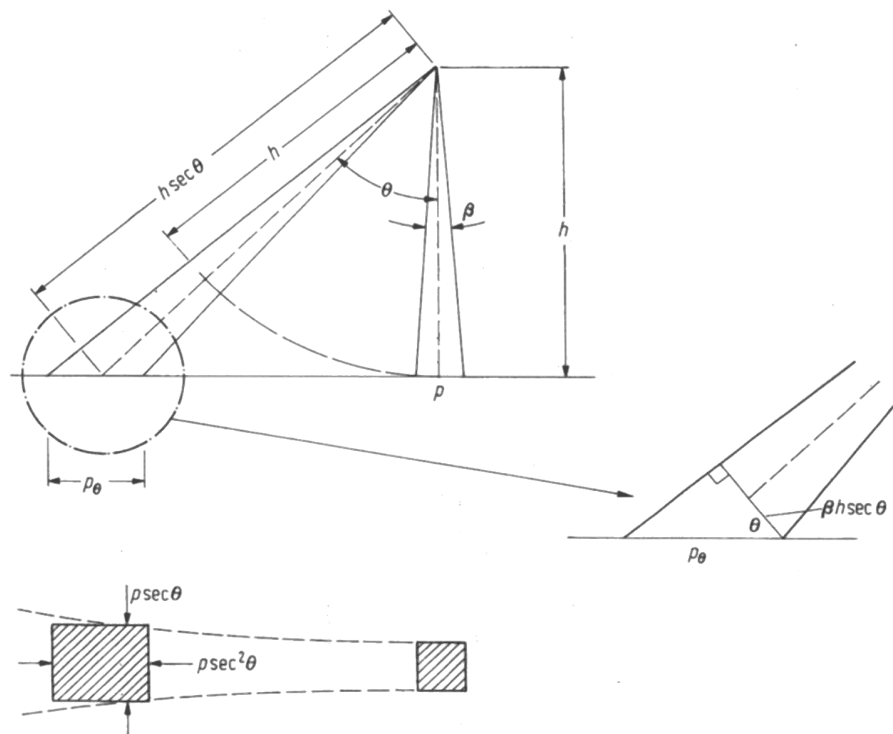
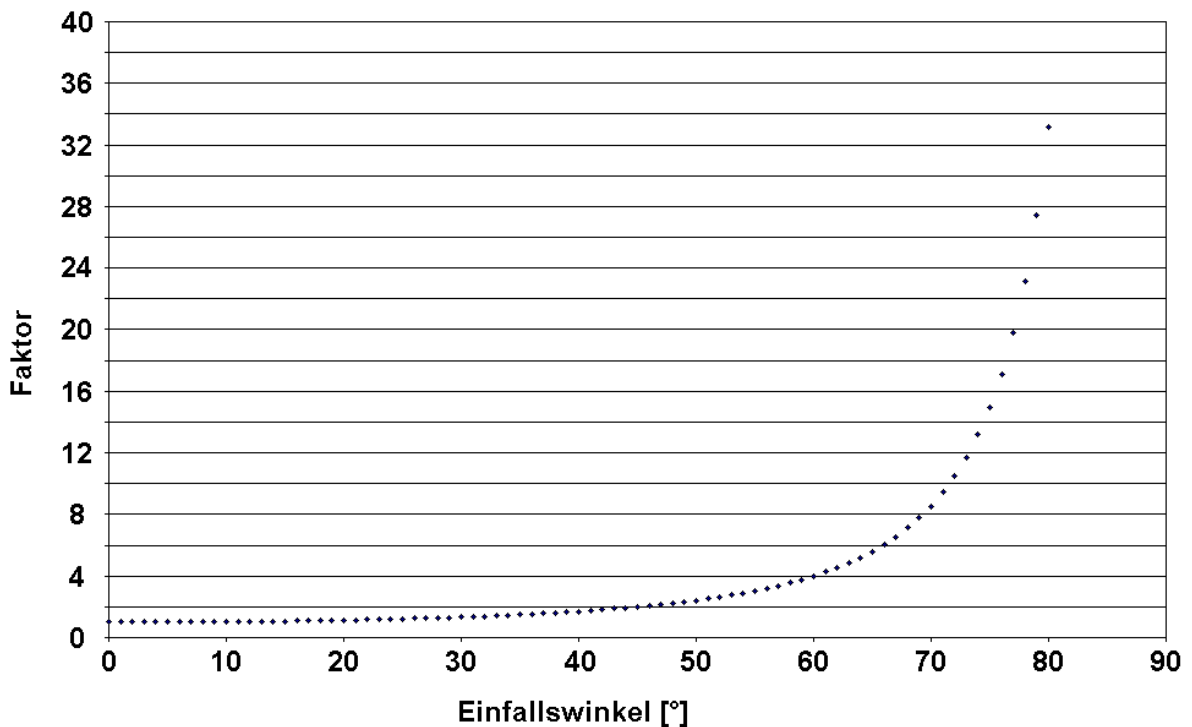


Abb. 3-12: Einfluss des Einfallswinkels  $\theta$  auf die Pixelgröße (RICHARDS 1994).

Die effektive Pixelgröße lässt sich nach Formel 3.1 wie folgt berechnen:

$$P_{\theta} = \beta \cdot h \cdot \sec^2 \cdot \theta \Rightarrow P \cdot \sec^2 \cdot \theta \quad [3.1]$$

Die effektive Pixelgröße ( $P_{\theta}$ ) ergibt sich aus dem quadrierten Sekans des Einfallswinkels ( $\theta$ ) multipliziert mit der tatsächlichen Pixelgröße ( $P$ ). Mit dem quadrierten Sekans des Einfallswinkels lässt sich der Verzerrungsfaktor berechnen, der sich mit zunehmendem Einfallswinkel ergibt. In Abbildung 3-13 ist der Verzerrungsfaktor in Abhängigkeit vom Einfallswinkel abgetragen:



**Abb. 3-13:** Abhängigkeit des Verzerrungsfaktors vom Einfallswinkel.

Aus Abbildung 3-13 wird deutlich, dass der Verzerrungsfaktor bis zu einem Einfallswinkel von 45° relativ gering ist. Ein Pixel, das mit einem Einfallswinkel von 45° aufgenommen wird zeichnet eine doppelt so große Fläche wie eine Nadiraufnahme (Senkrechtaufnahme, bei 0° Einfallswinkel) auf. Ab einem Neigungswinkel von 45° steigt der Verzerrungsfaktor stark an, so dass die geometrische Auflösung immer schlechter wird, da die Information einer größeren

Fläche in einem einzigen Mischpixel gemittelt wird. Dieser Effekt wird als „Panorama Verzerrung“ bezeichnet (RICHARDS 1994).

### Radiale Versetzung

Die vom LASSIE-System gewonnenen Bilddaten sind eine zentralperspektivische Abbildung. Das bedeutet, alle Strahlenbündel laufen in einem Punkt (dem Objektiv) zusammen. Charakteristisch für die Zentralperspektive ist, dass Gelände- und Objektpunkte, die über der Bezugsfläche (mittlere Höhe im Bildmittelpunkt) liegen vom Bildmittelpunkt radial nach außen versetzt werden (Abb. 3-14). Analog werden Objekte die tiefer als die Bezugsebene liegen nach innen versetzt (ALBERTZ 1991).

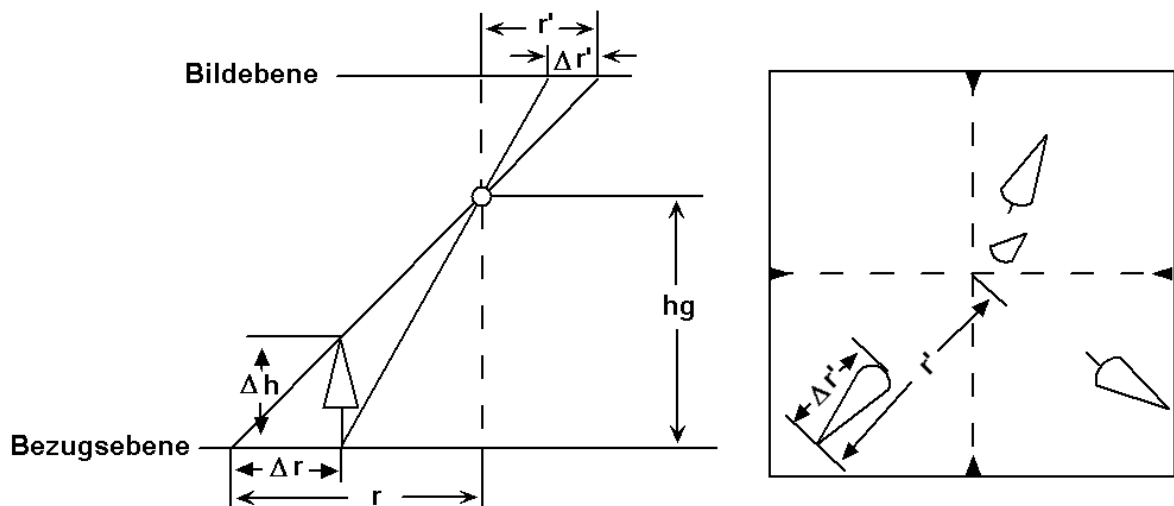


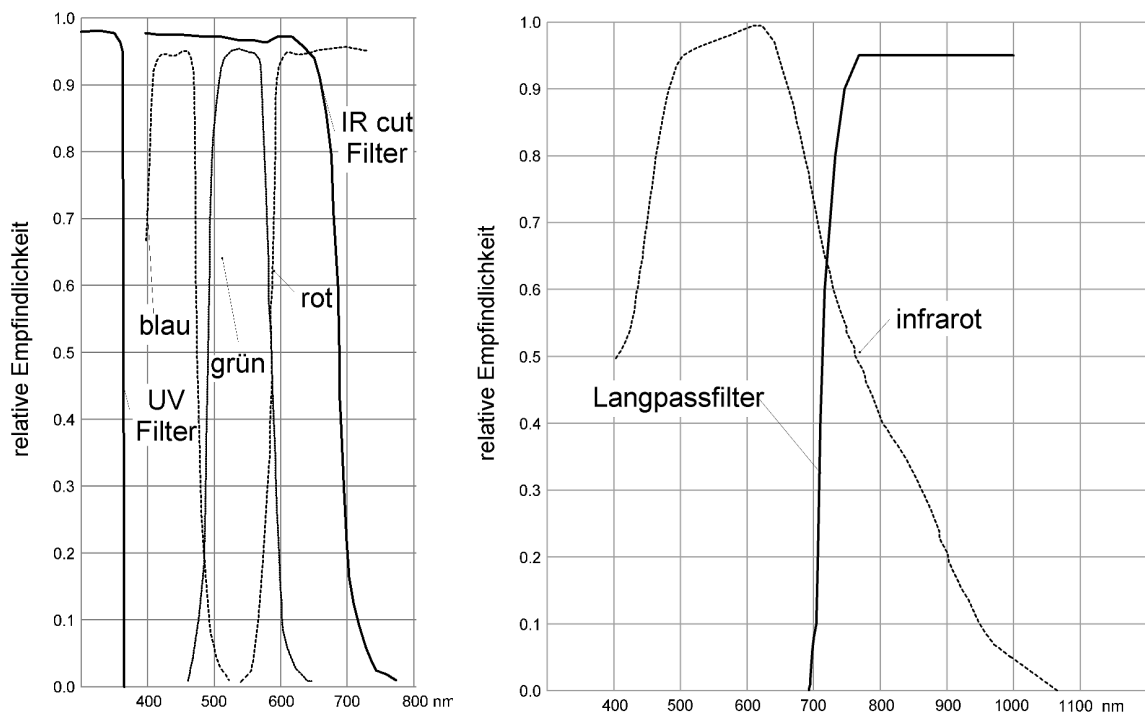
Abb. 3-14: Radialer Versatz durch Höhenunterschiede. (ALBERTZ 1991, verändert).

Dieser Effekt wurde für reliefbedingte Höhenunterschiede durch die Verwendung eines digitalen Höhenmodells bei der geometrischen Korrektur kompensiert. Für Einzelobjekte wie Bäume, Zaunpfähle oder Gebäude ist eine Korrektur nur dann möglich, wenn ein digitales Oberflächenmodell verfügbar ist. Das ist in der Regel nicht der Fall, derartige Objekte müssen daher vor der geometrischen Korrektur aus den Bilddaten ausmaskiert werden.

### 3.2.3 Spektrale Eigenschaften

Das LASSIE- $\beta$  System wurde als 4 kanaliges Multispektralsystem ausgelegt. Um mit dem bodennahen Fernerkundungssystem auch radiometrische Messungen durchführen zu können, wurde das LASSIE- $\beta$  System mit einer 3-CCD Kamera ausgerüstet.

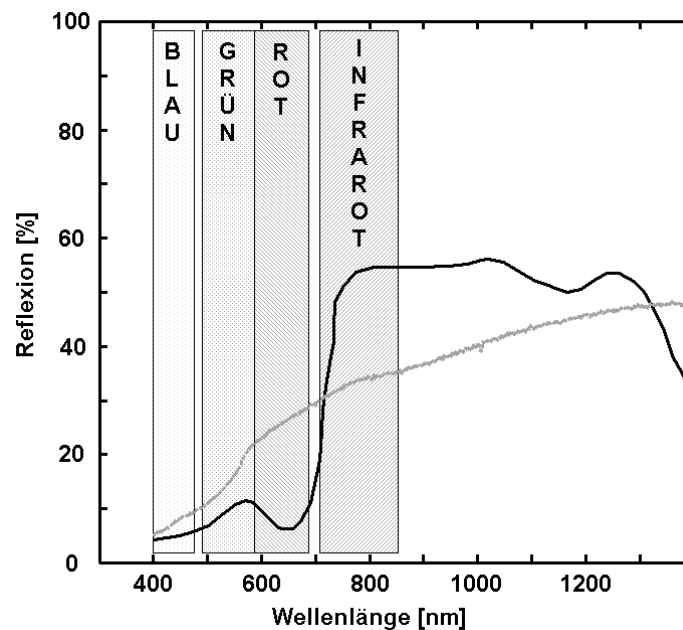
Die Kameras des LASSIE- $\beta$  Systems wurden mit Filteraufsätzen versehen, um die sehr breitbandigen Spektralbereiche, insbesondere die der Infrarot-Kamera, einzugrenzen und eine spektrale Kalibration (Kapitel 3.3.2.2) der Kamera zu ermöglichen. Die spektralen Empfindlichkeiten der Kameras und die verwendeten Filter sind in Abbildung 3-15 dargestellt.



**Abb. 3-15:** Spektrale Empfindlichkeiten und Filterverläufe des LASSIE- $\beta$  Systems.

Ausgehend von der spektralen Empfindlichkeit der Kameras und den verwendeten Filtern ergeben sich diskrete Wellenlängenbereiche, in denen das Sensorsystem radiometrische Messungen durchführen kann. Dieses zusammengestellte, vierkanalige Multispektralsystem ist für Reflexionsmessungen im sichtbaren Licht und im nahen Infrarot geeignet. Abbildung 3-16

zeigt die Wellenlängenbereiche nach der Bestimmung der spektralen Halbwertsbreite für die Filter/Kamera Konfigurationen.



**Abb. 3-16:** Darstellung der spektralen Bandbreiten des LASSIE- $\beta$  System.

Neben der Reflexion der beobachteten Oberflächen führen der Sonnenstand sowie die Beobachtungsgeometrie zu einem veränderten Gesamtsignal.

Die Stärke der Reflexion wird in Prozent angegeben. Dieser Wert wird als Reflexionsgrad bezeichnet und gibt das Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Strahlung an. Damit werden die Reflexionswerte unabhängig von Beleuchtungsunterschieden vergleichbar.

### *Radiometrische Störeinflüsse*

Das Aufnahmeprinzip der LASSIE Systeme besteht in der Rotation des Sensorkopfes um 360°. Durch die Rotation verändert sich die Aufnahmegeometrie zwischen Sensor und Sonne für jede Einzelaufnahme. Reflexionsmessungen die unter variierenden Beobachtungs- und Beleuchtungssituationen gemacht wurden, sind jedoch nicht direkt miteinander vergleichbar (PRIVETTE ET AL. 1997).

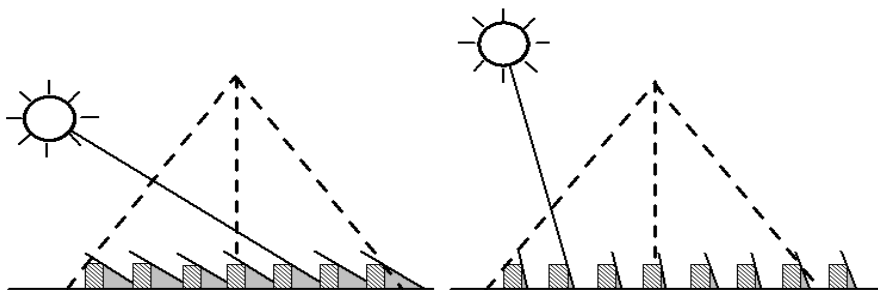
Die lagekorrigierten Bilder des LASSIE Systems sollen nahtlos zu einem Gesamtbild zusammengesetzt werden. Die einzelnen Aufnahmen weisen jedoch unterschiedlich starke Reflexionen für identische Oberflächen auf, die sich beim Zusammensetzen (mosaikieren) störend auswirken. Eine Normalisierung der Reflexionsmessungen auf eine standardisierte

Beobachtungsgeometrie, bzw. eine Korrektur der Störeinflüsse erlaubte die Vergleichbarkeit der Einzelbilder. Die Ursachen für diese Reflexionsunterschiede werden im folgenden erläutert:

### *Sonnenstand*

Der Sonnenstand variiert in zwei verschiedenen Zeitskalen (Tages- und Jahrgang), sowie mit der geographischen Breite. Wenn sich die Oberflächeneigenschaften nicht stark während des Jahres verändern (Nadelwälder, offene Böden, Felsen), wird die Variation der spektralen Signatur im wesentlichen vom Sonnenstand (Zenit) beeinflusst. Bei einjähriger Vegetation variieren die Oberflächeneigenschaften (offener Boden, Bestandesentwicklung, Abreife) jedoch über das Jahr, so dass das Reflexionssignal aus einer Mischung von veränderten Reflexionseigenschaften, sowie dem veränderten Sonnenstand abhängt.

Im Tagesgang tritt ein deutlicher Beschattungseffekt auf. Die Variation des Sonnenzenit führt zu einer unterschiedlichen Beleuchtung der Oberfläche und damit einhergehend zu einer unterschiedlich starken Beschattung ( Abb. 3-17).



**Abb. 3-17:** Effekt des Sonnenstandes auf den Schattenwurf von Pflanzreihen (BOISSARD ET AL. 1994, verändert).

Die Reflexionseigenschaften von Vegetationsbeständen ändern sich auch stark im Tagesverlauf. Je größer der Sonnen-Zenitwinkel, desto niedriger steht die Sonne am Himmel. Das Licht dringt dann sehr flach in den Bestand ein und wird hauptsächlich an Stängeln reflektiert. Steigt die Sonne im Tagesverlauf höher, wird der Zenitwinkel kleiner und das Licht

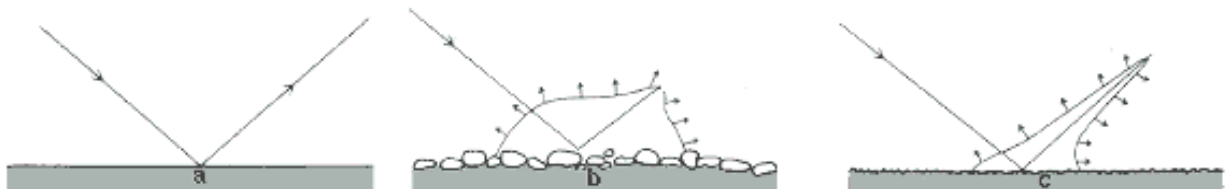
trifft fast senkrecht in den Bestand, das Reflexionssignal wird dann vorwiegend durch Blattreflexionen bedingt.

Auch die Variation der Blickrichtung (Azimut) führt zu einem unterschiedlichen Reflexionsverhalten der Oberflächen, die als bidirektionelle Reflexion bezeichnet wird. Zenit und Azimut variieren immer gemeinsam, daher müssen beide Effekte zusammen korrigiert werden.

### *Bidirektionelle Reflexion*

Von der einfallenden Sonnenenergie wird nur ein Teil wieder reflektiert. Über die Art der Reflexion entscheidet die Rauigkeit des Objektes. Ist die Rauigkeit der Oberflächen gering, findet eine spiegelnde Reflexion statt. Ein typisches Beispiel in der Natur sind Wasserflächen. Nimmt die Rauigkeit der Objektes zu, so findet diffuse, in alle Richtungen gleichmäßige Reflexion statt.

Eine ideal diffus reflektierende Oberfläche wird als *Lambert'scher* Strahler bezeichnet (DRURY 1991). Die Oberfläche reflektiert richtungsunabhängig und das Objekt erscheint aus allen Beobachtungsrichtungen gleich hell. In der Natur findet man in der Regel eine Mischung aus beiden Reflexionsarten, wobei viele Oberflächen eine starke Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) aufweisen. Abbildung 3-18 zeigt die verschiedenen Arten der Reflexion.



**Abb. 3-18:** Verschiedene Arten der Reflexion. [a] spiegelnde Reflexion, [b] diffuse Reflexion (Lambert'scher Strahler) und [c] anisotrope Reflexion (DRURY 1991, verändert).

Die Reflexionseigenschaften werden aber nicht nur durch die Rauigkeit und geometrischen Eigenschaften eines Objektes bestimmt, sondern auch durch die Position von Sonne und Beobachter. Beobachtet man eine Oberfläche gegen die Sonne, so erscheint sie dunkel. Abbildung 3-19 zeigt diesen Effekt für einen offenen Boden und einen Vegetationsbestand (B). Die Beobachtung mit der Sonne (A) führt zu einer deutlich höheren Reflexion.





**Abb. 3-19:** Reflexionsunterschiede eines offenen Bodens und eines Sojabestandes durch unterschiedliche Beleuchtungsrichtung. Im Fall A liegt die Sonne hinter dem Betrachter, im Fall B gegenüber. (Photos: DON DEERING, LUCHT & SCHAAF 2000, verändert).

Niedrige Sonnenstände sind nicht ausschließlich negative Einflussgrößen. So erscheinen z.B. Chlorosen durch Schwefel-Mangel in Raps im Gegenlicht mit deutlich mehr Kontrast (SCHNUG & HANEKLAUS 1998). Abbildung 3-20 zeigt chlorotische Rapsblätter.

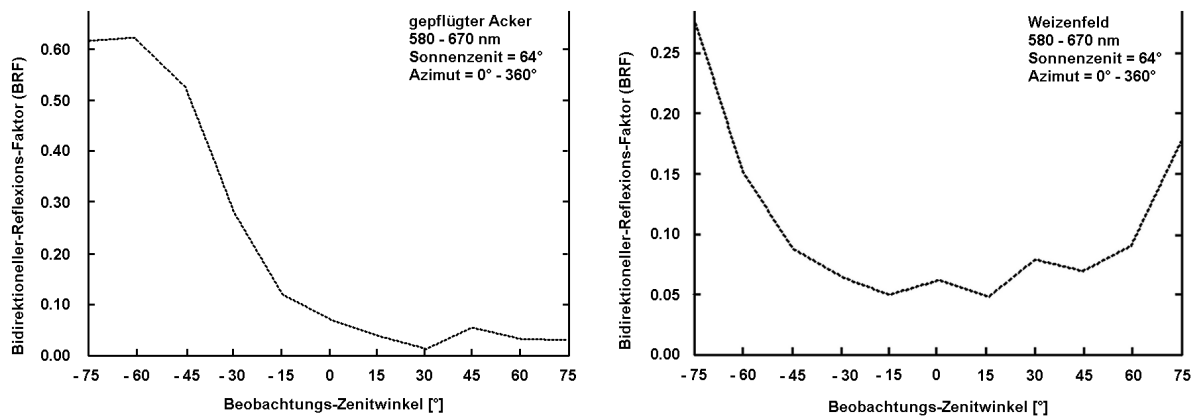


**Abb. 3-20:** Schwefelmangel in Raps (SCHNUG & HANEKLAUS 1998).

### Sonnenzenitwinkel

In einer Studie von MARTONCHIK (1994) wurden die Reflexionseigenschaften eines gepflügten Ackers und eines Weizenfeldes unter verschiedenen Aufnahmegeometrien vermessen (Abb. 3-21).

Die starke rückwärts gerichtete Reflexion bei der Beobachtung des Ackers mit der Sonne (negative Zenitwinkel) ist deutlich zu erkennen (Abb. 3-21 links). Wird gegen die Sonne gemessen, nimmt die Reflexion ab.



**Abb. 3-21:** Bidirektioneller Reflexionsfaktor (BRF) für einen gepflügten Acker (links) und ein Weizenfeld. (MARTONCHIK 1994, verändert).

Bei der Vegetation (Abb. 3-21 rechts) sind sowohl rückwärts als auch vorwärts gerichtete Reflexionen zu erkennen. Insgesamt ist die Anisotropie bei Pflanzenbeständen deutlich niedriger als bei rauen, unbewachsenen Böden.

Die Reflexion eines Objektes ist eine Funktion der Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie und kann mit der bidirektionalen Reflexionsverteilungsfunktion (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) beschrieben werden. Die BRDF ist wellenlängenabhängig und wird von den strukturellen und optischen Eigenschaften der Oberfläche wie zum Beispiel Schattenwurf, Mehrfach-Streuung, Blatorientierung und Bestandesdichte, bestimmt (LUCHT & SCHAAF 2000).

Die BRDF ist per Definition eine nicht messbare Größe, da die Reflexion für unendlich kleine Raumwinkel gemessen werden müsste (NICODEMUS ET AL. 1977). Die BRDF kann aber durch Reflexionsmessungen für einen definierten Raumwinkel und für eine begrenzte Anzahl

von Winkelkonstellationen angenähert werden. Die gemessene Größe wird als Bidirektioneller Reflexions-Faktor (BRF) bezeichnet (CAMACHO-DE COCA 2001).

Eine Annäherung an die BRDF kann über empirische Modelle, physikalische oder numerische Modellierung erfolgen. Eine sehr gute Übersicht über die Eigenschaften der verschiedenen Modellierungsansätze sind bei DISNEY (2002) zu finden:

*Empirische Modelle* sind einfach und eignen sich zum Interpolieren für andere Aufnahmegeometrien. Sie benötigen jedoch eine Vielzahl von direktionellen Messungen und sind in der Regel nicht auf andere Oberflächen zu übertragen.

*Physikalische Modelle* arbeiten mit vielen Parametern, benötigen weniger Messungen, sind generell aber sehr komplex und erfordern eine numerische Inversion.

*Computer Simulationsmodelle* können die Oberflächen in beliebigen Detailstufen nachbilden, sind aber extrem rechenintensiv und aufgrund der vielen Steuerparameter oft nicht invertierbar.

*Kernel-Modelle* beschreiben eine Vielzahl von Streuungs- und Reflexionsprozessen und können linear oder multiplikativ kombiniert werden, um so die BRDF zu beschreiben.

Landwirtschaftlich genutzte Flächen zeichnen sich durch eine starke Veränderung der Oberflächeneigenschaften innerhalb der Vegetationsperiode aus. Offener Boden und unterschiedlich dichte Vegetationsbedeckung wechseln sich ab. Eine exakte Modellierung der BRDF ist für diese hohe Variabilität sehr aufwendig und im operationellen Einsatz nicht praktikabel.

Zur Korrektur der geometrisch bedingten Reflexionsunterschiede wurde daher ein Ansatz von ROYER ET AL. (1985) und PICKUP ET AL. (1995) verwendet. Die Funktionsweise dieser Korrekturmethode ist in Kapitel 3.3.2.1 genauer erläutert.

### 3.2.4 Standortwahl

Auf dem 13,6 ha großen Versuchsfeld („Südfeld“) des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde (PB) wurde im Dezember 2001 ein 18 m hoher Stahlgittermast aufgestellt, auf dessen Spitze die LASSIE-Sensoren in einer Gesamthöhe von 20m montiert wurden (Abb. 3-22). Die Höhe und die genaue Position des Mastes wurde unter der Berücksichtigung des geometrischen Auflösungsvermögens der Systeme, sowie der angelegten Dauerversuche gewählt.



**Abb. 3-22:** Aufnahme des „Südfeldes“ mit dem Beobachtungssystem LASSIE.

#### *Geometrische Auflösung*

Die geometrische Auflösung der LASSIE Systeme ist abhängig von:

1. der Neigung des Sensors (Zenitwinkel,  $\theta_v$ ),
2. dem Öffnungswinkel des Kameraobjektives
3. der theoretische Pixelgröße und dem Faktor der Panorama Verzerrung (Kap. 3.2.2)

### Zenitwinkel

Der Zenitwinkel lässt sich aus der Masthöhe und dem Abstand von dem Beobachtungspunkt zum Mast berechnen:

$$\text{Zenitwinkel} = \arctan \alpha = \arctan \frac{\text{Entfernung}}{\text{Masthöhe}} \quad [3.2]$$

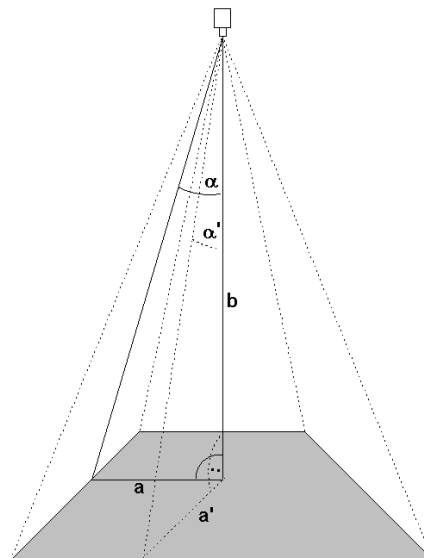
### Öffnungswinkel

Der Öffnungswinkel ist abhängig von der Brennweite des Objektivs. Da die Brennweite je nach Zoomeinstellung variiert, werden nur die Extreme Tele (3°) und Weitwinkel (43,6°) betrachtet.

### Theoretische Pixelgröße

Die theoretische Pixelgröße ergibt sich aus der Masthöhe, dem Öffnungswinkel und der vom Videoserver aufgezeichneten Pixelanzahl. Diese beträgt standardmäßig 704 x 576 Pixel und orientiert sich am Verhältnis 4:3 bei Fernsehbildern.

Die theoretische Pixelgröße wird für eine Nadir-Aufnahmesituation bestimmt. Es handelt sich dabei um eine theoretische Größe, da der Mast auf dem sich die Sensoren befinden, das eigentliche Aufnahmezentrum darstellt. Die Aufnahmesituation ist schematisch in Abbildung 3-23 dargestellt.



**Abb. 3-23:** Schematische Darstellung einer Nadir-Aufnahmesituation.

Die theoretische Pixelauflösung ( $PS_x$ ,  $PS_y$ ) berechnet sich wie folgt:

$$a = \tan \alpha \cdot b ; \quad PS_x = \frac{a}{\frac{1}{2} \cdot Px} ; \quad PS_y = \frac{a}{\frac{1}{2} \cdot Py} \quad [3.3]$$

Dabei sind:

- a = Aufgezeichnete Strecke am Boden,
- b = Höhe des Mastes,
- $\alpha$  = halber Öffnungswinkel
- $PS_x$  = theoretische Pixelauflösung in X-Richtung,
- $PS_y$  = theoretische Pixelauflösung in Y-Richtung,
- $P_x$  = Aufgezeichnete Pixelanzahl in X-Richtung (704),
- $P_y$  = Aufgezeichnete Pixelanzahl in Y-Richtung (576)

Die tatsächliche Pixelgröße ergibt sich aus der theoretischen Pixelgröße multipliziert mit dem Verzerrungsfaktor der Panorama-Verzerrung. In Tabelle 3-2 sind die Pixelgrößen für verschiedene Aufnahmekonfigurationen dargestellt:

**Tab. 3-2:** Tatsächliche Pixelgrößen (x/y) in cm für 4 verschiedene Masthöhen und 5 Neigungswinkel mit einem Weitwinkelobjektiv (Momentanes Gesichtsfeld (IFOV = instantaneous field of view) =43,6°).

Neigungswinkel / Masthöhe	10 m	20 m	50 m	100 m
0° Faktor = 1	1,14 / 1,40	2,27 / 2,77	5,68 / 6,94	11,36 / 13,88
25° Faktor = 1,22	1,39 / 1,71	2,77 / 3,38	6,92 / 8,47	13,85 / 16,93
50° Faktor = 2,42	2,76 / 3,39	5,49 / 6,70	13,74 / 16,79	27,49 / 33,58
75° Faktor = 14,93	17,02 / 20,90	33,89 / 41,36	84,80 / 103,61	169,61 / 207,23
80° Faktor = 33,16	37,80 / 46,42	75,27 / 94,85	188,35 / 230,13	367,70 / 460,26
	a = 4 m; b = 10 m; $\alpha = 21,8^\circ$	a = 8 ; b = 20 m; $\alpha = 21,8^\circ$	a = 20 m; b = 50 m; $\alpha = 21,8^\circ$	a = 40 m; b = 100 m; $\alpha = 21,8^\circ$

**Tab. 3-3:** Tatsächliche Pixelgrößen (x/y) in cm für 4 verschiedene Masthöhen und 5 Neigungswinkel mit einem Teleobjektiv (Momentanes Gesichtsfeld (IFOV = instantaneous field of view) =3°).

Neigungswinkel / Masthöhe	10 m	20 m	50 m	100 m
0° Faktor = 1	0,07 / 0,09	0,15 / 0,18	0,37 / 0,45	0,74 / 0,91
25° Faktor = 1,22	0,09 / 0,11	0,18 / 0,21	0,45 / 0,55	0,90 / 1,11
50° Faktor = 2,42	0,17 / 0,21	0,36 / 0,44	0,90 / 1,09	1,79 / 2,20
75° Faktor = 14,93	1,05 / 1,34	2,24 / 2,69	5,52 / 6,72	11,05 / 13,59
80° Faktor = 33,16	2,32 / 2,98	4,97 / 5,97	12,27 / 14,92	24,54 / 30,18
	a = 0,26 m; b = 10 m; $\alpha = 1,5^\circ$	a = 0,52 m; b = 20 m; $\alpha = 1,5^\circ$	a = 1,31 m; b = 50 m; $\alpha = 1,5^\circ$	a = 2,62 m; b = 100 m; $\alpha = 1,5^\circ$

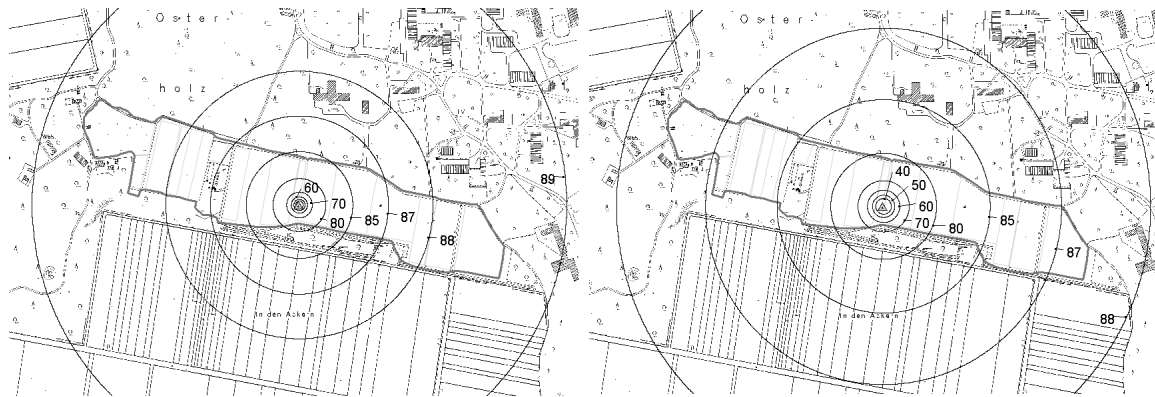
In den Tabellen 3-2 und 3-3 sind die resultierenden Pixelgrößen für 4 verschiedene Masthöhen zusammengestellt. Die Mastvarianten 10 m und 20 m sind freistehend ohne weitere Abspannungen realisierbar. Ein 50 m Mast entspricht der Höhe einer kleineren Windkraftanlage und bedarf ab dieser Höhe einer baurechtlichen Genehmigung. Ein 100 m hoher Mast entspricht einem 220 kV Überland-Hochspannungsmasten oder einem großen Windrad.

Aus den Tabellen 3-2 und 3-3 erkennt man, dass selbst bei einem sehr starken Neigungswinkel (80°) und damit einer starken Verzerrung der Bildpunkte noch eine Pixelauflösung von 50 cm mit einem 10 m Mast bzw. ca. 5 m bei einem 100 m Masten möglich ist.

Die Auflösung lässt sich durch den Einsatz eines Teleobjektives deutlich erhöhen. Wiederum bei einer Neigung von 80° beträgt die Auflösung unter Verwendung eines 10 m Mastes 3 cm, bei einem 100 m Mast 30 cm Pixelauflösung.

Technisch können auch noch bei extremen Schrägaufnahmen feine Pixelauflösungen realisiert werden. Allerdings nimmt die Anzahl der benötigten Einzelaufnahmen, um eine 360° Abdeckung zu erreichen stark zu. Vereinfacht gesagt benötigt man mit einem

Weitwinkelobjektiv (IFOV  $\sim 45^\circ$ ) acht Aufnahmen mittlerer bis schlechter geometrischer Auflösung zur kompletten Abdeckung, mit einem Teleobjektiv (IFOV  $\sim 3^\circ$ ) 120 Aufnahmen mit sehr guter geometrischer Qualität. Mit der Anzahl der Einzelaufnahmen steigt auch die benötigte Zeit für einen vollständigen Aufnahmedurchgang an. Werden für eine komplette Abdeckung im Weitwinkel-Modus ca. 5 Minuten benötigt, beträgt die Aufnahmedauer im Tele-Modus 75 Minuten. Zudem steigt auch der Aufwand der Datenprozessierung im gleichen Maße an. In der Praxis muss also ein sinnvoller Kompromiss zwischen geometrischer Auflösung und Anzahl der Aufnahmen gefunden werden. Für zwei Masthöhen (10 m, 20 m) wurde berechnet, mit welchem Neigungswinkel die Bereiche des Untersuchungsgebietes aufgezeichnet werden konnten (Abb. 3-24).



**Abb. 3-24:** Simulierte Einfallswinkel für ein LASSIE-System mit einem Teleobjektiv (IFOV =  $43,6^\circ$ ). Masthöhe links 10 m, rechts 20 m.

Um die Unterschiede in der Aufnahmegeometrie für die beiden Mastvarianten bewerten zu können, wurde für verschiedene Neigungswinkelklassen der prozentuale Flächenanteil berechnet. Das „Südfeld“ ist von Bäumen umgeben, so dass die tatsächliche Beobachtungsfläche kleiner ist als im Vergleich zu einem komplett einsehbaren Gelände.

In Tabelle 3-4 sind die prozentualen Flächenanteile für unterschiedliche Neigungswinkelklassen dargestellt. Da sich der Flächenanteil mit Zunahme des Neigungswinkels sehr stark vergrößert (Abb. 3-13) sind die Neigungsklassen mit mehr als  $80^\circ$  detaillierter aufgelistet.

Mit einem 10 m hohen Masten werden über 35 % der Fläche des „Südfeldes“ in einem Winkel von mehr als  $88^\circ$  aufgezeichnet, wohingegen der Sensor auf einem 20 m hohen Mast

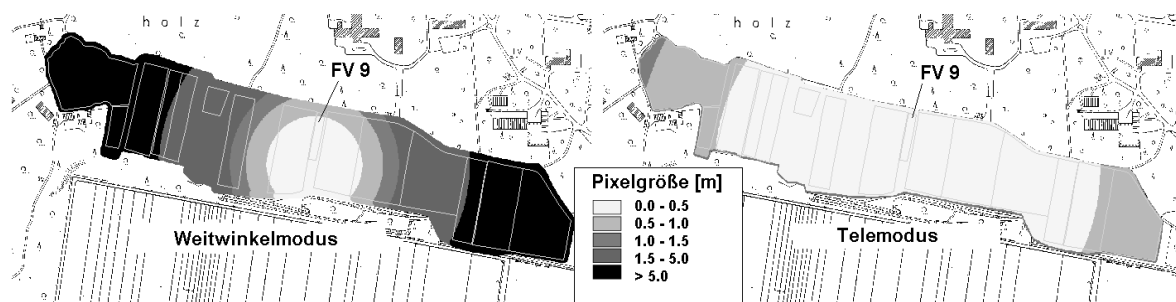


nur bis maximal  $88^\circ$  geneigt werden muss, um das „Südfeld“ komplett zu erfassen ( Tab. 3-4). Aufgrund der geringeren Verzerrungen und der Vorgabe, dass der Mast freistehend sein musste, um die Bewirtschaftung der Versuchsflächen nicht durch Abspannseile zu beeinträchtigen, fiel die Entscheidung auf einen 20 m hohen Stahlgittermast.

**Tab. 3-4:** Prozentualer Flächenanteil der Neigungswinkelklassen an der Gesamtfläche des „Südfeldes“ für zwei Masthöhen.

Neigungswinkel [°]	0 – 40	40 - 80	80 - 85	85 - 87	87 - 88	88 - 89
10 m Mast	0,17	7,01	15,86	19,59	21,82	35,55
20 m Mast	0,67	22,13	28,22	35,34	13,64	0,00

Ausgehend von einem 20 m hohen Masten wurden nun die Pixelauflösungen für die unterschiedlichen Aufnahmemodi (Weitwinkel/ Tele) für das „Südfeld“ simuliert (Abb. 3-25).



**Abb. 3-25:** Simulierte Pixelgrößen für den Weitwinkel- und Telemodus.

Aus dem Ergebnis der simulierten Pixelgrößen kann man erkennen, dass das komplette „Südfeld“ mit einer geometrischen Auflösung von 1 m aufgezeichnet werden konnte. Im Telemodus lassen sich große Teile des „Südfeldes“ sogar in einer Pixelauflösung von 0,5 m erfassen.

Neben der geometrischen Auflösung wurde auch die Lage der Versuchspartellen bei der Planung des Standortes für den Mast berücksichtigt. Insbesondere die Versuche mit variiertem Stickstoff-/Schwefeldüngung (FV 9 in Abb. 3-25) sollten möglichst detailliert abgebildet werden können.

### Flächengröße

Die Flächengröße, die mit einem LASSIE theoretisch abgebildet werden kann, ist abhängig von der Masthöhe und dem Neigungswinkel der Kamera. Für extreme Neigungswinkel bis  $90^\circ$  können theoretisch Aufnahmen bis zum Horizont erhoben werden, wo jedoch der Informationsgehalt der Pixel kaum mehr zu interpretieren ist. Neigungswinkel bis  $88^\circ$  ergeben noch eine vertretbare geometrische Pixelauflösung (siehe oben). Die theoretische Flächenabdeckung, das heißt ohne Verdeckung durch Gebäude, Bäume oder Relief, wurde für vier Masthöhen bei  $88^\circ$  Neigungswinkel simuliert (Tab. 3-5).

**Tab. 3-5:** Simulierte Flächenabdeckung für vier Masthöhen bei einem maximalen Neigungswinkel von  $88^\circ$ .

<b>Masthöhe [m]</b>	<b>Fläche [ha]</b>
10	25,6
20	102,5
50	640,8
100	2563,2

Aus den simulierten Flächengrößen zeigt sich, dass mit einem 20 m hohen Masten ca. 100 ha Fläche abgedeckt werden können. Installiert man ein LASSIE auf einen Mast einer Überlandleitung (100 m Höhe), so kann im Idealfall ein kompletter landwirtschaftlicher Großbetrieb erfasst werden.

### 3.3 Bildverarbeitung

Die von den LASSIE-Sensoren gewonnenen Rohbilddaten müssen lagekorrigiert und georeferenziert werden, damit sie in ein Geographisches Informationssystem (GIS) eingebunden werden können. Die variierenden Beleuchtungssituationen (Kap. 3.2.3) während der unterschiedlichen Aufnahmetermine muss normiert und auf Reflexionswerte standardisiert werden. Diese Aufgaben lassen sich mit den Techniken der digitalen Bildverarbeitung durchführen und wurden unter Verwendung der Software *ERDAS-Imagine®* und *Orthobase™*, Version 8.5 berechnet.

#### 3.3.1 Geometrische Korrektur

Die LASSIE-Sensoren fahren beim Aufnehmen des Geländes immer wieder exakt die gleichen Aufnahmepositionen an. Die jeweiligen Aufnahmestreifen können daher immer mit denselben Korrekturparametern korrigiert werden. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass die Parameter nur einmal für einen Aufnahmetermin und für die jeweiligen Bildstreifen bestimmt werden müssen. Alle weiteren Aufnahmen können dann auf der Basis der ermittelten Werte korrigiert werden.

Konventionell werden vertikale Bilddaten mit Techniken der polynomischen Transformation geometrisch korrigiert (ERDAS 2001). Diese Methoden basieren auf mathematischen Anpassungsfunktionen, berücksichtigen aber nicht die spezifische Verzerrung der Bilder, bzw. die Ursachen für die Deformationen bei Schrägaufnahmen. Sollen eine Vielzahl von Einzelbildern korrigiert werden, die anschließend geometrisch exakt zueinander passen müssen, reichen die einfachen Techniken nicht mehr aus (ERDAS 2001). Insbesondere bei extremen Schrägaufnahmen, wie sie von den LASSIE-Systemen geliefert werden, ist eine Rekonstruktion der Bildgeometrie und eine genaue Lagekorrektur, die auch das Relief mit berücksichtigt, notwendig.

##### 3.3.1.1 Nahbereichsphotogrammetrie

Während die Vermessung aus Luftbildern als klassische Photogrammetrie bezeichnet wird, nennt man die Vermessung von Objekten am Erdboden mit Hilfe von Bildern „terrestrische“

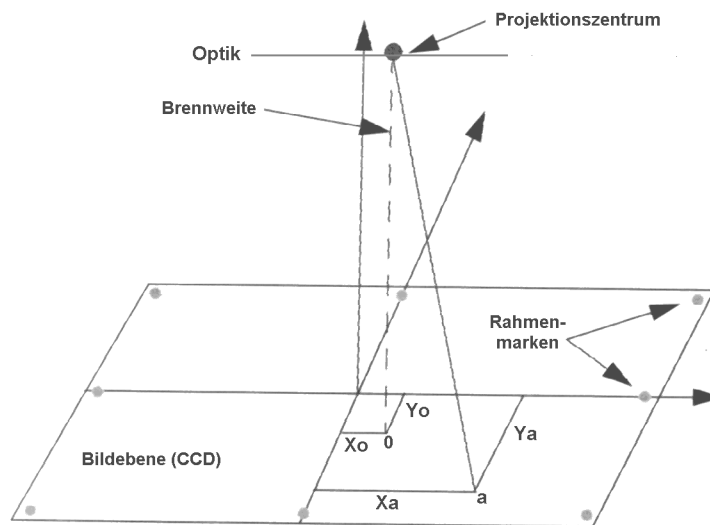
oder „Nahbereichs“-Photogrammetrie. Ziel ist es, die geometrische Situation zum Aufnahmezeitpunkt zu rekonstruieren, um anschließend eine Bildverzerrung auf ein Landeskoordinaten-System durchzuführen.

Die Rekonstruktion der geometrischen Situation während der Aufnahme findet in zwei Schritten statt:

1. Bestimmung der inneren Orientierung
2. Bestimmung der äußeren Orientierung

### *Innere Orientierung*

Die Bestimmung der inneren Orientierung legt das Projektionszentrum der Kamera in Bezug zur Bildebene fest. Sie wird benötigt, um die Pixel, die im Bildkoordinatensystem vorliegen, in ein Landeskoordinatensystem (z.B. Gauß-Krüger) zu überführen.



**Abb. 3-26:** Interne Kamerageometrie (ERDAS 2001).

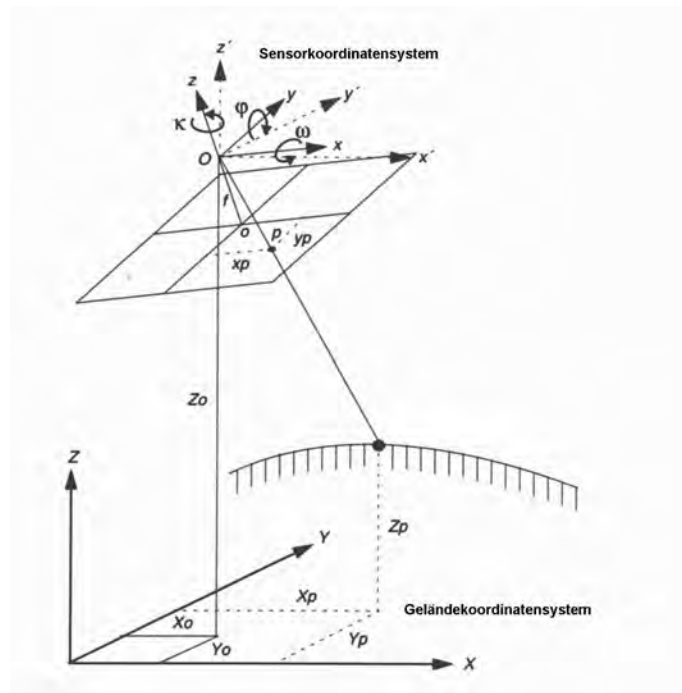
Die innere Orientierung kann durch die drei Parameter Brennweite, X- und Y-Koordinate des Bildhauptpunktes bestimmt werden (Abb. 3-26).

Klassische Luftbilder werden mit sogenannten Reihemesskammern aufgenommen. Diese Kameras besitzen feste Brennweiten und genau eingemessene Markierungen, die sogenannten Rahmenmarken. Die Brennweite und Rahmenmarken sind genau bestimmt (kalibriert), so dass die innere Orientierung einfach durch Vermessen der Rahmenmarken ermittelt werden kann.

Die LASSIE-Systeme besitzen eine Optik mit variabler Brennweite, zudem sind keine vermessenen Rahmenmarken vorhanden und die Lage der Bildebene (CCD-Chips) ist nicht exakt eingemessen. Die innere Orientierung kann also nicht auf dem herkömmlichen Weg bestimmt werden, trotzdem ist es möglich sie abzuschätzen. Dazu wird die Technik des *selbstkalibrierenden Bündelblockausgleiches* verwendet.

### Äußere Orientierung

Die äußere Orientierung entspricht der Lage des Sensors im Raum zum Aufnahmezeitpunkt. Zu Bestimmung der äußeren Orientierung werden die Position des Sensors (X-,Y- und Z-Koordinate), die Lage zum Referenzkoordinatensystem (beschrieben durch die Drehwinkel  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ), sowie mindestens 3 Kontrollpunkte mit Höhe im Gelände benötigt ( Abb. 3-27).



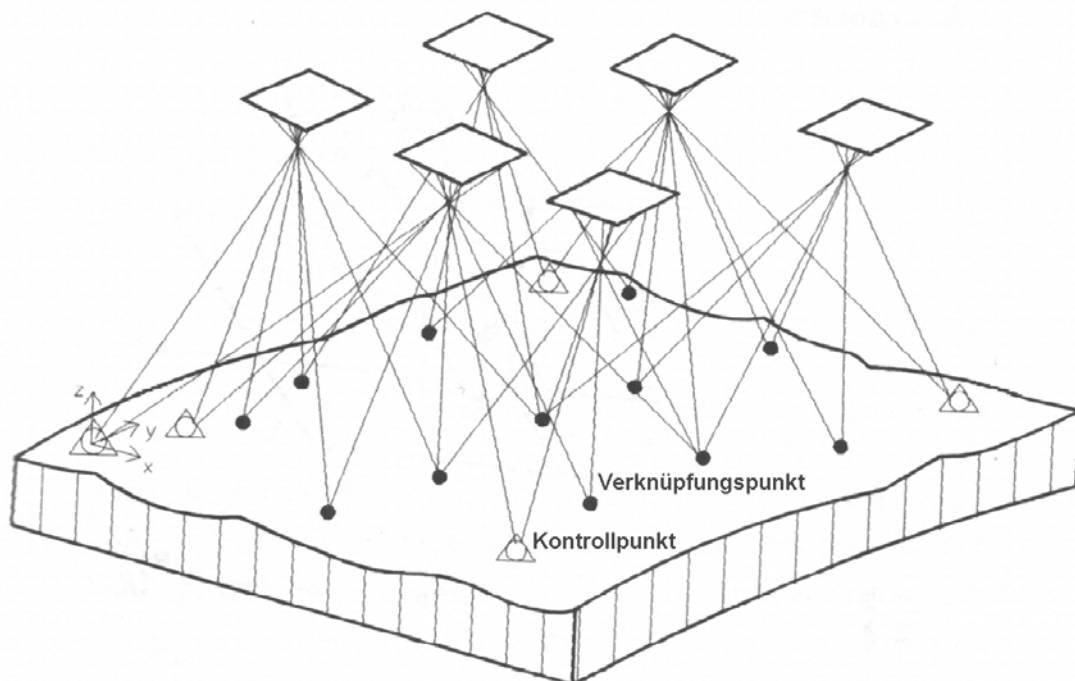
**Abb. 3-27:** Schematische Darstellung der Parameter der äußeren Orientierung (ERDAS 2001, verändert).

Insgesamt definieren neun Parameter die Zentralprojektion des Bildes. Sofern die innere Orientierung durch Kalibrierung bekannt ist, können die sechs Parameter der äußeren Orientierung durch indirekte Bestimmung über Passpunkte (Bild- und Ortskoordinaten) gewonnen werden (KRAUS 1997).

### Bündelblockausgleichung

Hat man mehrere, räumlich überlappende Einzelbilder zur Verfügung, so kann man diese zur Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung durch Bündelblockausgleichung verwenden. Dabei wird eine mathematischen Beziehung zwischen mehreren Einzelbildern, sowie den Sensoreigenschaften und der Lage im Raum ermittelt. Die äußere Orientierung wird für jedes Bild im Block mit den anderen Bildern berechnet. Dabei werden die Lösungen für den Block über die Methode der kleinsten Quadrate angenähert.

Die Bildkoordinaten und das Projektionszentrum (die Parameter der inneren Orientierung) definieren ein räumliches Strahlenbündel, das mit bekannten (vermessen) Kontrollpunkten im Gelände verbunden ist (Abb. 3-28). Die Kontrollpunkte, deren Koordinaten durch Vermessung bekannt sind (markiert durch die Dreiecke) finden sich in mehreren Einzelbildern wieder. Ebenso lassen sich Bildpunkte finden, die in zwei oder mehreren Bildern vorhanden sind. Diese werden als Verknüpfungs- oder Tie-Points bezeichnet.



**Abb. 3-28:** Schematische Darstellung des Bündelblockausgleiches (KRAUS 1997, verändert).

Das Strahlenbündel wird nun so lange verschoben und gedreht, bis die entsprechenden Strahlen an den Verknüpfungspunkten gut zum Schnitt kommen und mit den Kontrollpunkten möglichst gut zusammentreffen (KRAUS 1997).

Im Überlappungsbereich zweier Bilder gibt es für jeden Kontrollpunkt zwei Bildkoordinaten  $(x,y)$ . Da zum Aufnahmezeitpunkt der Kontrollpunkt mit dem entsprechenden Bildpunkt auf einer Geraden lag (Kollinearität), lassen sich zwei Gleichungen aufstellen, die den Zusammenhang zwischen Bild- und Kontrollpunkt beschreiben. Diese Gleichungen werden als Kollinearitätsgleichungen oder Beobachtungsgleichungen bezeichnet. Ist ein Kontrollpunkt in beiden Bildern zu identifizieren, können vier Kollinearitätsgleichungen aufgestellt werden.

Bei drei Kontrollpunkten im Überlappungsbereich von zwei Bildern ergeben sich zwölf Gleichungen (vier pro Kontrollpunkt). Werden jetzt noch sechs Verknüpfungspunkte im Überlappungsbereich der beiden Bilder gesucht, können weitere 24 Gleichungen aufgestellt werden (vier pro Verknüpfungspunkt).

Die Anzahl der Unbekannten ergibt sich aus den sechs Parametern der äußeren Orientierung für das erste Bild, weitere sechs Parameter für das zweite Bild, sowie jeweils drei pro Verknüpfungspunkt  $(X,Y,Z)$ , also insgesamt 30 Unbekannte. Diesen 30 Unbekannten stehen 36 Gleichungssysteme gegenüber, so dass die Gleichungssysteme gelöst werden können, und damit die äußere Orientierung hergestellt werden kann.

#### *Selbstkalibrierender Bündelblockausgleich*

Die innere Orientierung lässt sich leicht für kalibrierte Kameras herstellen. Im Fall der LASSIE-Systeme sind diese Parameter aber nicht hinreichend bekannt. Bei der sogenannten Selbstkalibrierung verschmilzt die Kalibrierung mit der photogrammetrischen Punktbestimmung bzw. mit der photogrammetrischen Orientierung (KRAUS 1996). Die Elemente der inneren Orientierung werden einfach als weitere Unbekannte in den Bündelblockausgleich mit einbezogen. Die höhere Anzahl der Unbekannten erfordert dann zusätzliche Kontroll- und Verknüpfungspunkte.

Durch die Identifizierung weiterer Kontrollpunkte können zusätzliche Parameter (additional Parameter, AP) aus dem Bündelblock abgeleitet werden. Durch eine Wichtung der Punkte kann entschieden werden, ob die innere Orientierung völlig unbekannt ist, oder aber ausgehend von

einem Initialwert verbessert werden soll (KRAUS 1996). Zusätzlich können bei nicht kalibrierten Aufnahmesystemen noch ein Versatz des Bildhauptpunktes und Objektiv-Verzeichnungen auftreten. Auch diese Effekte können im Bündelblockausgleich durch weitere Passpunkte und Korrekturpolynome ausgeglichen werden. Diese AP haben sich als äußerst wirkungsvolle Zusatzinformation zur Kompensation systematische Fehler erwiesen und werden mittlerweile auch zur Auswertung von Messbildern eingesetzt (KRAUS 1997).

WOLF und DEWITT (2000) betonen, dass die Vielzahl von weiteren Parametern, die durch den Bündelblockausgleich bestimmt werden sollen, zu numerischer Instabilität führen können, wenn Vertikaltaufnahmen mit geringen Höhenunterschieden vorliegen. Sie schlagen vor, weitere Bilder mit unterschiedlichen Neigungswinkeln aufzunehmen, die zu besseren Ergebnissen beim Ausgleich führen. Hier erweisen sich die LASSIE-Systeme als konzeptionell besonders geeignet, da das Aufnahmeprinzip auf variablem Neigungswinkel beruht.

In der Praxis wird der Bündelblockausgleich durch die Bestimmung von Kontroll- und Verknüpfungspunkten erreicht. Die Parameter der inneren Orientierung werden grob als Initialwerte vorgegeben und durch die Selbstkalibrierung optimiert. Die Qualität der geometrischen Korrektur hängt also im wesentlichen von der Güte der im Gelände ermittelten Kontrollpunkte ab. Eine genaue Vermessung der Lage und der Höhe sind für die Bildverzerrung also unbedingt notwendig.

### 3.3.1.2 Feldvermessung

Für die Korrektur der Bilddaten werden genaue Kontrollpunkte im Gelände benötigt. Durch die Einführung des satellitengestützten globalen Positionierungssystems (GPS) im Jahre 1989 (GPSWORLD 2002) wurde die Vermessung von Koordinaten im Gelände stark vereinfacht. Zwar wird das Satellitensignal vom amerikanischen Militär durch Störsignale in der Genauigkeit beeinträchtigt, jedoch sind durch die Nutzung von Korrektursignalen (differentielles GPS) Lagegenauigkeiten im Zentimeter-Bereich für private Nutzer möglich.

Die Vermessung des Kontrollpunkte im Gelände wurde mit einem differentiellen GPS-Receiver der Firma *Trimble* (Geo-Explorer 3) durchgeführt. Die Messungen wurden anschließend am Computer mit der *GPS Pathfinder Office* (Version 2.8) Software, der Firma *Trimble* ausgewertet.



Während die Lagekoordinaten mit einer ausreichenden Genauigkeit von  $\pm 1,5$  m bestimmt werden konnten, reichen die vom GPS gewonnenen Höheninformationen in ihrer Anzahl nicht für einen Bündelblockausgleich aus.

Die Landesvermessungsämter bieten digitale Höhenmodelle an, die auf der Basis von terrestrischen und Laservermessungen bestimmt wurden. Die amtlichen digitalen Höhenmodelle stehen in einer räumlichen Pixel-Auflösung von  $12,5 \times 12,5$  m und einer Höhengenaugkeit von  $\pm 0,5$  m zur Verfügung (LGN 2002). Die Höhenmodelle geben die Geländehöhe am Boden an und berücksichtigen keine Oberflächenobjekte wie Wälder oder Gebäude.

Da das Untersuchungsgebiet „Südfeld“ ein sehr flaches Relief aufweist (mittlere Höhe 80,5 m; Minimum 79,68 m; Maximum 81,92 m), konnte das Höhenmodell auf eine Pixelgröße von 1 m interpoliert werden, um zur Korrektur der Bilddaten verwendet werden zu können.

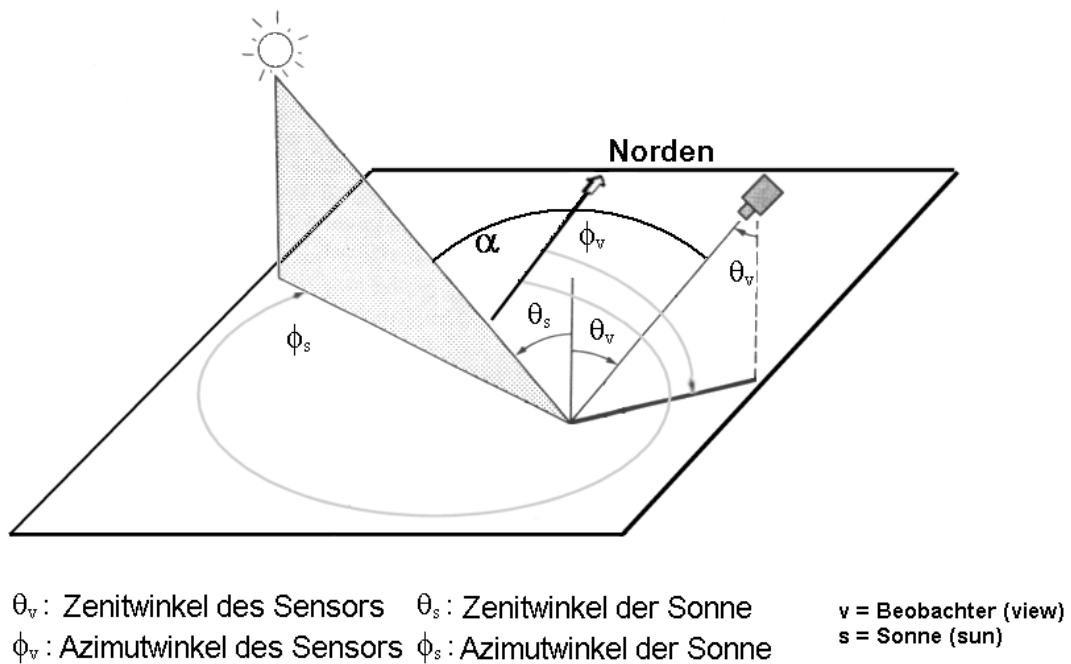
### 3.3.2 Radiometrische Korrektur

Die Aufnahmen des LASSIE von unterschiedlichen Tages- und Jahreszeiten weisen variierende Helligkeiten auf. Die Ursachen für diese Unterschiede liegen im wechselnden Sonnenstand und in richtungsabhängigen Reflexionseigenschaften begründet (Kap. 3.2.3). Um diese Bilder untereinander vergleichen zu können, müssen die Reflexionswerte normiert und die Daten von Grauwerten in Reflexionswerte umgerechnet werden.

#### 3.3.2.1 Reflexionsnormierung

Die Reflexion eines Objektes hängt nicht nur von den optischen Eigenschaften, sondern auch von der Aufnahmegeometrie und Beleuchtungssituation ab. Diese richtungsabhängigen Reflexionseigenschaften sind schwer zu erfassen, und nur durch aufwendige Algorithmen zu modellieren. Aufbauend auf den Arbeiten von ROYER ET AL. (1985) haben PICKUP ET AL. (1995) eine Methode zur Korrektur von winkelabhängigen Reflexionsunterschieden entwickelt. Dieses Verfahren eignet sich besonders zur Korrektur der LASSIE Bilddaten, da die Korrekturparameter nur auf den Bilddaten und den Winkelbeziehungen zum Aufnahmezeitpunkt basieren.

Die Aufnahmegeometrie lässt sich mit vier Winkeln beschreiben (Abb. 3-29).



**Abb. 3-29:** Schematische Darstellung der Aufnahmegeometrie und der daraus resultierenden Winkel.

Die Neigung des Sensors wird mit dem Zenitwinkel (synonym Einfallswinkel)  $\theta_v$  beschrieben. Analog wird für den Sonnenstand (sun elevation) der Zenitwinkel mit  $\theta_s$  angegeben. Um die Blickrichtung des Sensors bzw. der Sonne anzugeben, wird der Azimutwinkel  $\phi$  ( $0^\circ = \text{Norden}$ ) eingeführt.

ROYER ET AL. (1985) haben nachgewiesen, dass die Eigenschaften der richtungsabhängigen Reflexion eine Funktion des Winkels zwischen dem Sonnen- und dem Sensorvektor ( $\alpha$ ) sind (Abb. 3-29).

Dieser als *Scattering Angle* bezeichnete Winkel vereint die Anzahl aller variablen Winkel in einer Größe und wird wie folgt berechnet:

$$\cos \alpha = \cos \theta_s \cdot \cos \theta_v + \sin \theta_s \cdot \sin \theta_v \cdot \cos \phi \quad ; \quad \phi = |\phi_v - \phi_s| \quad [3.4]$$

Berechnet man nun diesen *Scattering Angle* für jedes Pixel im Bild, so enthält das Ergebnisbild die richtungsabhängige Reflexionskomponente für jeden Bildpunkt (COULTER 2001).

Aufbauend auf dem Konzept des *Scattering Angle* haben PICKUP ET AL. (1995) eine Normalisierungsfunktion entwickelt, die zunächst die einzelnen *Scattering Angles* in Klassen einteilt. Für diese Klassen werden Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Anschließend werden die Originalgrauwerte mit den für die Klassen entsprechenden Standardabweichungen und Mittelwerten verrechnet.

$$GW_{korr} = (GW_{orig} \cdot \sigma_r) + \mu_r \quad [3.5]$$

Der korrigierte Grauwert ( $GW_{korr}$ ) berechnet sich aus dem Produkt des originalen Grauwertes ( $GW_{orig}$ ) und der Standardabweichung der zugehörigen *Scattering Angle* Klasse ( $\sigma_r$ ) addiert mit dem Mittelwert der *Scattering Angle* Klasse ( $\mu_r$ ).

Die softwaretechnische Umsetzung dieser Korrekturprozedur wurde von COULTER (2001) für flugzeuggestützte Videographiedaten durchgeführt. Diese Korrektur wurde für die LASSIE-Aufnahmen modifiziert.

Da die Lage des Sensors für die Einzelbilder immer gleich ist und die Positionen immer wieder exakt angefahren werden kann, brauchen der Zenit- und Azimutwinkel des Sensors für jedes Pixel nur einmal ermittelt werden. Die Lage des Sensors kann also vorab berechnet werden, so dass nur die Lage der Sonne für jede Aufnahme neu bestimmt werden muss.

In die Modellrechnung gehen ein:

1. das geocodierte Originalbild,
2. die Sensor-Zenitwinkel für jedes Pixel
3. die Sensor-Azimutwinkel für jedes Pixel
4. der Sonnen-Zenitwinkel zum Aufnahmezeitpunkt
5. der Sonnen-Azimutwinkel zum Aufnahmezeitpunkt

In Abbildung 3-30 ist ein Ablaufdiagramm für die Reflexionsnormierung dargestellt.

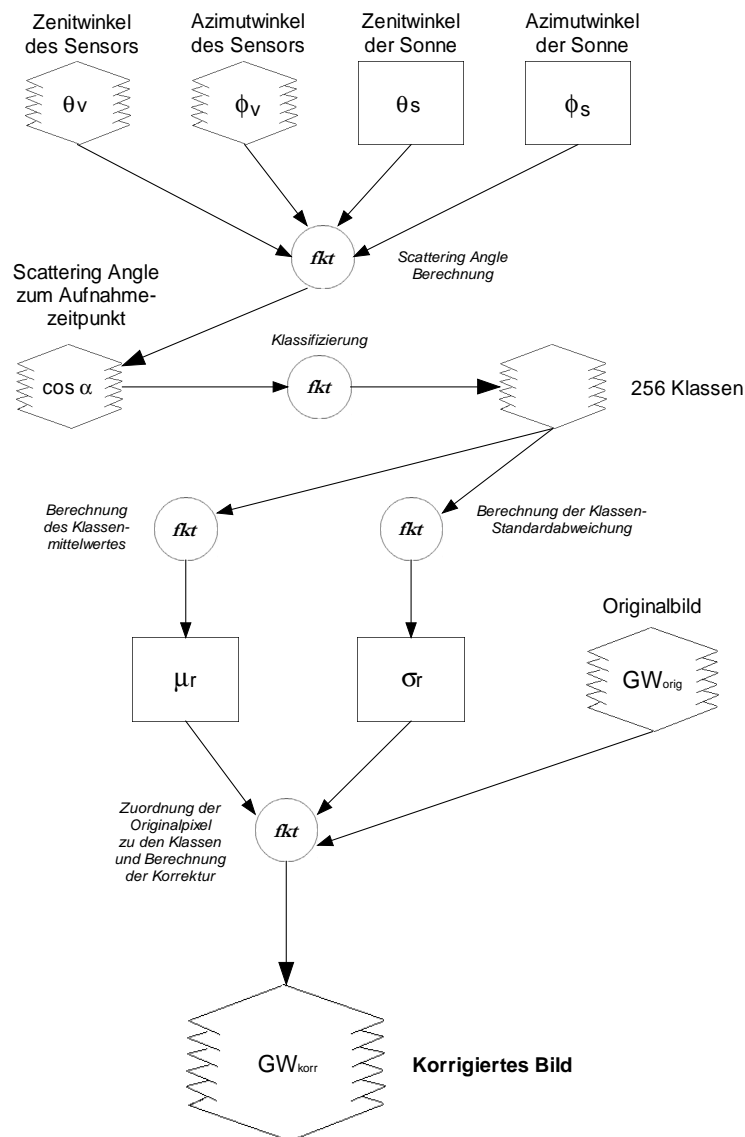


Abb. 3-30: Ablaufschema zur Reflexionsnormierung.

### 3.3.2.2 Kamerakalibrierung

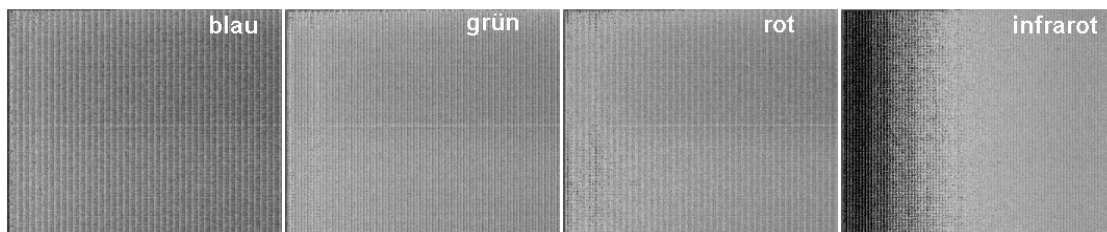
Das digitalisierte Bildmaterial der Videokameras liegt pro Spektralband in 8-Bit Grauwerten (GW) vor. Die Helligkeitsunterschiede im Bild werden in 256 verschiedenen Grauwertabstufungen pro Kanal aufgezeichnet. Dabei ist wichtig, dass die automatische Gain Kontrolle (AGC) der Kameras deaktiviert ist, da ansonsten die Kameraelektronik die Beleuchtungsunterschiede kompensieren würde (RICHARDSSON ET AL. 1993) und die Vergleichbarkeit der Bilder nicht mehr gewährleistet ist.

### *Dunkelstrom*

Durch thermische Schwingungen in den Siliziumkristallen der CCD entstehen auch ohne Lichteinfall freie Elektronen. Diese bilden den sogenannten Dunkelstrom. Die thermisch erzeugte Ladung ist proportional zur Zeit und temperaturabhängig (BÜCHNER 2002). Bei einer Temperaturerhöhung von 8 °C verdoppelt sich der Dunkelstrom. Eine Kühlung des Sensors kann den Dunkelstrom minimieren, eine genaue Quantifizierung ist aber schwierig, da gleichzeitig zum Aufnahmetermin die Außentemperatur gemessen werden müsste.

Bei Belichtung des Chips führt der immer vorhandene Dunkelstrom zu einem zusätzlichen Signal (additive Komponente), welches die Messung der einfallenden Lichtmenge vom Beobachtungsobjekt verfälscht (BÜCHNER 2002).

Um die Größenordnung des Dunkelstroms abzuschätzen wurden mit der Kamera Aufnahmen bei völliger Dunkelheit (Neumond) durchgeführt (Abb. 3-31). Aus den 46 Aufnahmen wurde der mittlere Grauwert jedes Pixels berechnet. Die Darstellung ist stark im Kontrast gestreckt, um die geringen Unterschiede (7 GW) sichtbar zu machen.



**Abb. 3-31:** Darstellung der Dunkelstrombilder der vier LASSIE Spektralbänder.

Die Korrektur des Bildes erfolgt durch Subtraktion des Dunkelstrombildes vom Originalbild. Damit ist der additive Teil des Dunkelstroms eliminiert.

### *Flatfield*

Bedingt durch die Herstellung ist nicht jedes Bildelement gleich empfindlich. Von einem Pixel zum nächsten kann der Empfindlichkeitsunterschied bis zu 1% und über die ganze Breite des Chips bis zu 10 % betragen (BÜCHNER 2002). Manche Pixel sind defekt (dead pixels) und andere erreichen die Sättigung sehr schnell (hot pixels).

Durch Belichtung einer gleichmäßig hellen Fläche (graue Pappe) erhält man ein Bild (Flatfield), das die Empfindlichkeitsunterschiede des CCD-Chips von Pixel zu Pixel widerspiegelt.

Dieses Flatfieldbild kann nun zur Wichtung der Empfindlichkeit der einzelnen Pixel herangezogen werden:

$$w = \frac{GW_{mean}}{GW}; \quad GW_{korr} = GW \cdot w \quad [3.6]$$

Der gemessene mittlere Grauwert ( $GW_{mean}$ ) der Fläche entspricht 100 % Empfindlichkeit. Teilt man nun den mittleren Grauwert durch jeden gemessenen Grauwert (GW), so erhält man für jedes Pixel einen Wichtungsfaktor (w). Werden die Originaldaten (GW) mit dem Wichtungsfaktor multipliziert erhält man ein korrigiertes Bild, in dem jedes Pixel die gleiche Empfindlichkeit aufweist.

Verwendet man eine spektral vermessene Fläche als Referenz (BaSO<sub>4</sub>, Spectralon), so kann man durch Division des Originalbildes durch das Flatfieldbild eine spektrale Normierung und absolute Kalibration erreichen.

In der Praxis kann jedoch nicht zu jeder Aufnahme eine Dunkelstrom- und Flatfield-Korrektur mit einer spektralen Referenz durchgeführt werden, da vor jeder Bildaufnahme die Optik verschlossen werden und anschließend das Kalibrationspanel aufgenommen werden müsste. Die spektrale Kalibration erfolgt daher über einen empirischen Ansatz.

#### *Empirical Line Methode*

Zur Kalibrierung von Grauwerten in Reflexionsgrade und gleichzeitigen Korrektur von Atmosphäreneinflüssen eignet sich die Empirical Line Methode (ELM) (ROBERTS ET AL. 1985, CONEL ET AL. 1987, KRUSE ET AL. 1990, FARRAND ET AL. 1994). Zur Anwendung der ELM werden Spektralmessungen von mindestens zwei homogenen Objekten benötigt, die einen deutlichen Helligkeitsunterschied aufweisen (z.B. Asphalt und Sand). Beide Objekte müssen groß genug sein, damit sie im Bild als homogenes Pixel erfasst werden können.

Aus den Reflexionsdaten der Oberflächen und den resultierenden Grauwerten aus den Bilddaten wird ein lineares Regressionsmodell für jeden Spektralkanal entwickelt. Mit Hilfe

des Regressionsmodells kann anschließend für jedes Pixel der Reflexionsgrad ermittelt werden. Die Transformation der gemessenen Grauwerte (GW) in absolute Reflexionswerte ( $\rho_i$ ) für den entsprechenden Spektralkanal (i) erfolgt über die lineare Beziehung:

$$\rho_i = a \cdot GW_i + b \quad [3.7]$$

Es wird davon ausgegangen, dass sich Atmosphäreinflüsse und Sensorkalibrierung ausreichend durch einen multiplikativen und einen additiven Anteil erklären lassen. Der multiplikative Teil bezieht sich auf Streuungs- und Absorptionsprozesse in der Atmosphäre, sowie den Kalibrierungsfaktoren des Sensors (FARRAND ET AL. 1994), der additive Teil wird durch das Himmelslicht (path radiance) sowie das Sensorrauschen (Dunkelstrom) hervorgerufen.

Der Einfluss der Atmosphäre ist beim LASSIE-System als eher gering einzuschätzen, da die Pfadlänge zwischen Objekt und Aufnahmesensor maximal 500 m beträgt.

Die ELM kann bereits für eine dunkle und eine helle Fläche angewendet werden. Statistisch besser abgesicherte Aussagen lassen sich jedoch durch Einbeziehung von mehreren Referenzflächen in ein lineares Regressionsmodell erreichen.

## 4 Ergebnisse

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine Methodenentwicklung. Das Ergebniskapitel behandelt daher nicht Forschungsergebnisse, die mit der neuen Methode erzielt wurden, sondern die Resultate der Methodenentwicklung.

Zunächst werden die Ergebnisse der geometrischen und radiometrischen Eigenschaften des LASSIE Systems vorgestellt. Danach wird die Erstellung dynamischer Karten demonstriert. Es folgt die Beurteilung des Informationsgehaltes der einzelnen Spektralkanäle, und abschließend werden einige Fallbeispiele für die landwirtschaftliche Praxis vorgestellt.

### 4.1 Eigenschaften und Leistungen des LASSIE-Systems

Das operationelle Sensorsystem liefert seit dem Frühjahr 2002 Bilddaten (LASSIE- $\alpha$ ). Im September 2002 wurde das Nachfolgesystem LASSIE- $\beta$  installiert, das eine bessere Radiometrie aufweist, sowie mit einer zusätzlichen Infrarot-Kamera ausgestattet wurde.

#### 4.1.1 Geometrie

Das Ziel einer geometrischen Korrektur ist die Entzerrung der Lagefehler, die durch die Aufnahmegeometrie hervorgerufen werden. Gleichzeitig werden die Bilddaten auf eine Kartenprojektion entzerrt. Damit wird es möglich, Strecken und Flächen in den korrigierten Bilddaten zu messen.

Die Entzerrung der Schrägaufnahmen erfolgt mit photogrammetrischen Techniken unter Verwendung von Kontrollpunkten, die im Gelände mit GPS vermessen wurden. Dabei entsteht beim korrigierten Bild der Eindruck, man würde senkrecht von oben auf das Gelände schauen. Dieser Eindruck ist genau genommen nur für geringe Einfallswinkel korrekt. Im Fernbereich wird sehr schräg auf die Oberfläche geschaut, und das entzerrte Bild gibt nur den Eindruck einer Draufsicht wieder. Aus diesem Grund wird der Begriff *Pseudo-Nadir* Aufnahme eingeführt, um Verwechslungen mit echten Nadiraufnahmen, wie beispielsweise Luftbildern, auszuschließen. Das Ergebnis einer Entzerrung ist in Abbildung 4-1, die eine Originalaufnahme (links) und das korrigierte Ergebnisbild (rechts) zeigt, dargestellt.





**Abb. 4-1:** Oben: Original Schrägaufnahme. Unten: Entzerrtes Pseudo-Nadirbild. Aufnahme vom 25. Mai 2003.

Das Bild wurde mit sieben GPS-vermessen Passpunkten auf die Gauß-Krüger Kartenprojektion entzerrt. Die Güte der Entzerrung wird über den RMS-Fehler (Root Mean Square) bestimmt. Der RMS Fehler gibt die Distanz zwischen der Eingabe Koordinate und der berechneten Position der Koordinate an. Anders ausgedrückt gibt der Fehler die Differenz zwischen der gewünschten Ausgabe Koordinate und der durch die Transformation berechneten Position an (ERDAS 1999). Der RMS Fehler berechnet sich wie folgt:

$$RMS = \sqrt{(x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2} \quad [4.1]$$

Die Kalibrierwerte für die Entzerrung der Aufnahme vom 25. Mai 2003 sind in der Tabelle 4-1 aufgeführt.

**Tab. 4-1:** Kalibrierwerte zur Bildentzerrung vom 25. Mai 2003

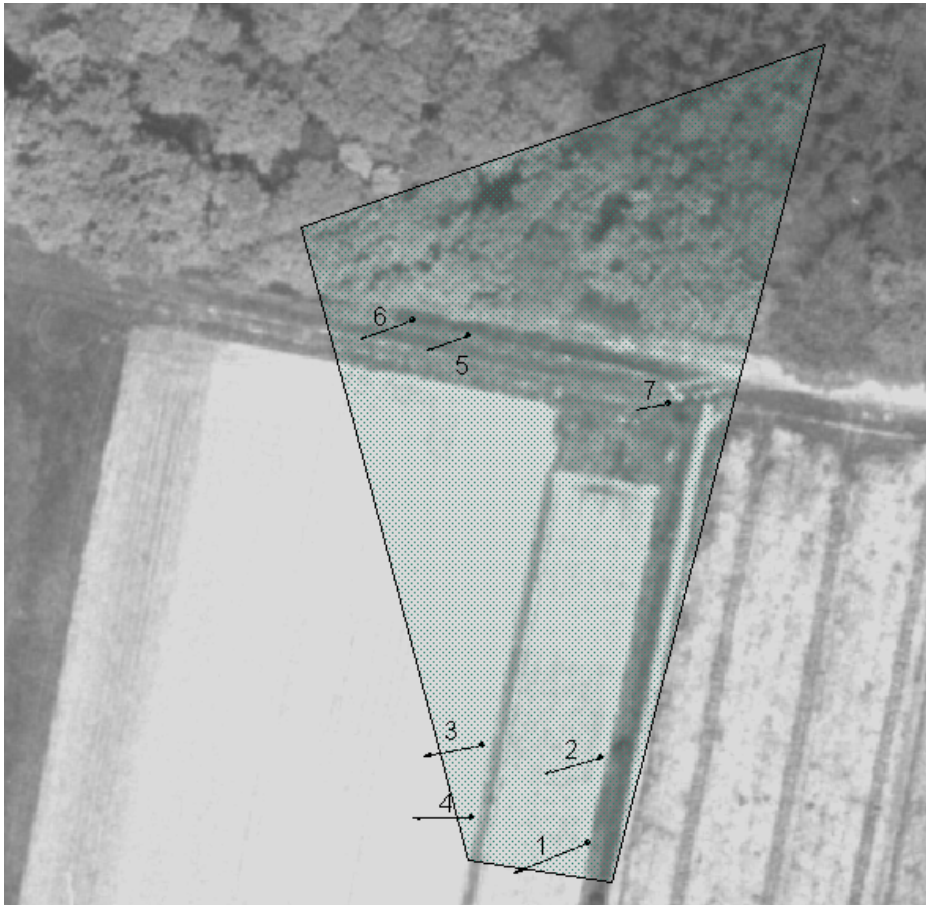
X <sub>0</sub> [m]	Y <sub>0</sub> [m]	Z <sub>0</sub> [m]	RMS X	RMS Y	RMS Z	Brennweite [mm]	Omega [°]	Phi [°]	Kappa [°]	RMS Ges.
3597846,89	5795874.64	101.48	0,75	0,21	0,68	8,00	82.27	-15.94	3.84	0,01

Der RMS Fehler gibt die Lagegenauigkeit in X- und Y-Richtung an. Differenzierter kann der Fehler betrachtet werden, wenn man die Abweichungen separat nur in X- bzw. Y-Richtung betrachtet. In Tabelle 4-2 sind die Fehlerwerte für das Beispiel aus Abbildung 4-1 aufgetragen:

**Tab. 4-2:** Geometrische Lagefehler einer Bildentzerrung.

Punkt	X Koordinate Bild	Y Koordinate Bild	Rechtswert [m]	Hochwert [m]	Höhe [m]	X Residuum [m]	Y Residuum [m]	Z Residuum [m]
1	564,125	513,875	3597853,858	5795911,916	79,492	-0,973	-0,395	-0,978
2	571,875	352,875	3597855,728	5795923,388	79,706	-0,751	-0,211	-0,777
3	170,125	325,125	3597839,884	5795925,007	80,324	-0,780	-0,1411	-0,077
4	70,000	441,000	3597838,4523	5795915,292	80,709	-0,784	-0,007	0,305
5	258,625	55,125	3597838,0207	5795979,840	79,538	-0,557	-0,200	-0,734
6	163,375	46,125	3597830,5202	5795981,889	79,454	-0,699	-0,254	-0,7161
7	599,375	93,875	3597864,703	5795970,759	79,703	-0,451	-0,095	-0,789

Die Lagedifferenz in nur einer Richtung wird als Residuum angegeben. Aus den X- und Y-Residuen können Fehlervektoren konstruiert werden, die anschließend eine räumliche Darstellung der Fehler erlaubt (Abb. 4-2).



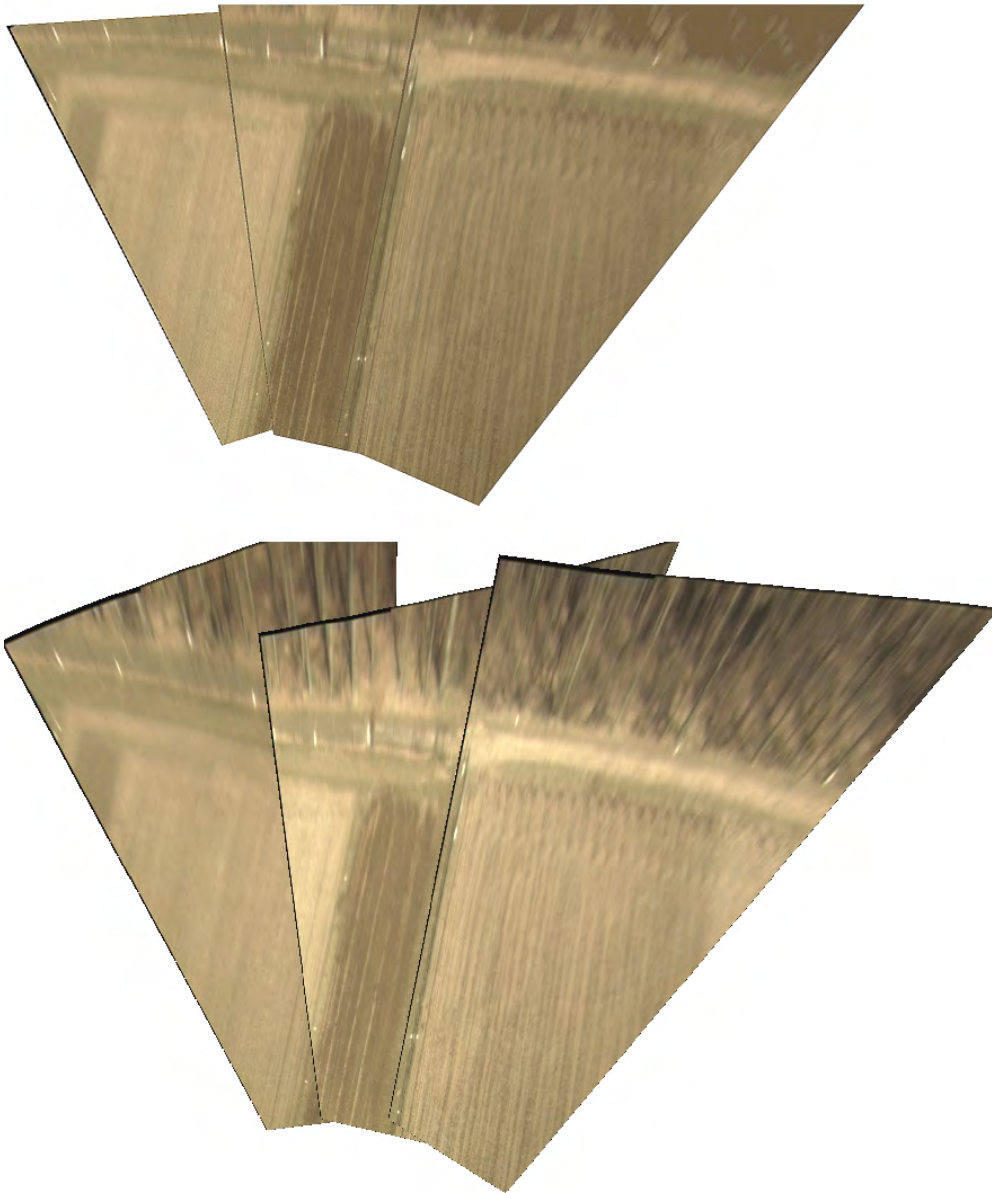
**Abb. 4-2:** Fehlervektoren der Entzerrung des LASSIE Bildes vom 25.05.03. Die Vektoren wurden zur besseren Sichtbarkeit um den Faktor 10 vergrößert.

Der Fehler aller Punkte lag durchgängig unter 1. Das bedeutet, die Abweichung der neu berechneten Koordinaten ist kleiner als ein Pixel. Bei einer angestrebten Pixelauflösung von 0,5 m für das Ergebnisbild ist der Lagefehler also geringer als ein halber Meter. Für landwirtschaftliche Fragestellung ist die geometrische Genauigkeit der Entzerrung als genau zu bewerten. Die Residuen und Fehler zur Entzerrung aller Einzelbilder sind im Anhang zu finden.

Eine komplette Erfassung der umgebenden Landschaft mit einem LASSIE kann nur durch die Montage der Einzelbilder zu einem Gesamtbild erreicht werden. Die Entzerrung kann

separat für jedes Einzelbild durchgeführt werden, oder gleichzeitig für alle Bilder als Block. Die Entzerrung im Block liefert eine deutlich bessere Geometrie, da die Überlappungsbereiche benachbarter Bilder zum selbstkalibrierenden Bündelblockausgleich verwendet werden können (vgl. Kap. 3.3.1.1).

Der Unterschied in der geometrischen Genauigkeit zwischen Einzelbildentzerrung und Blockausgleich ist in Abbildung 4-3 dargestellt.



**Abb. 4-3:** Unterschiedliche geometrische Genauigkeit bei der Mosaikerstellung.  
Oben: Entzerrung mit Bündelblockausgleich, unten: Einzelbildentzerrung.  
Aufnahme vom 24.03.2003.

Ausgehend vom Bündelblockausgleich können für jedes Einzelbild die Korrekturparameter berechnet werden. Diese Parameter sind die Kalibrierwerte, mit denen alle folgenden Bilder der entsprechenden Kameraposition entzerrt werden können. In Tabelle 4-3 sind die Werte für einige Bilder angegeben. Die vollständige Liste der Parameter findet sich im Anhang.

**Tab. 4-3:** Kalibrierparameter für einen Bündelblockausgleich für ausgewählte Bilder.

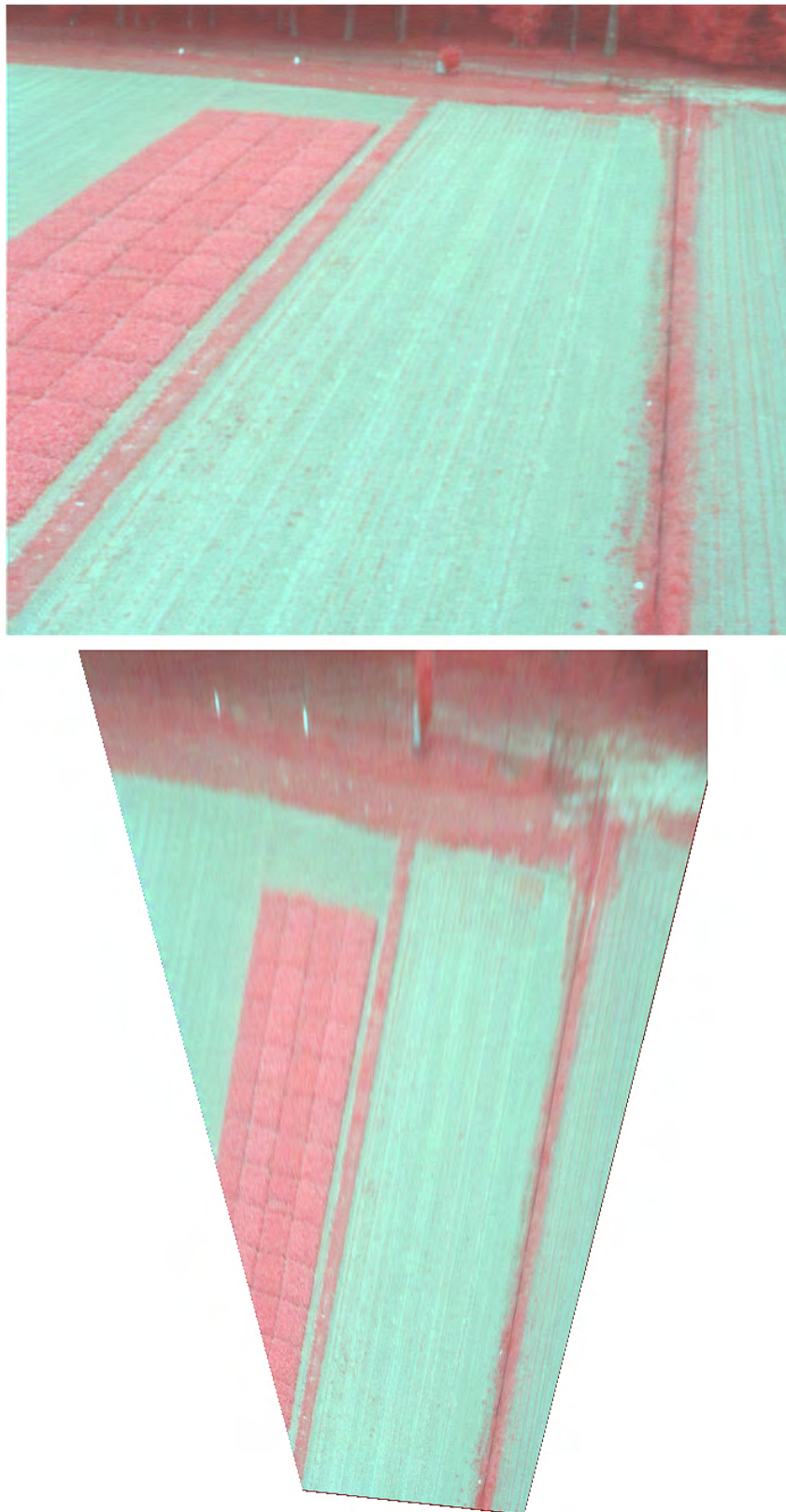
<b>Bild</b>	<b>Rechtswert</b> [m]	<b>Hochwert</b> [m]	<b>Höhe</b> [m]	<b>Omega</b> [°]	<b>Phi</b> [°]	<b>Kappa</b> [°]
1	3597850,71	5795874,29	103,58	80,87	1,25	3,72
2	3597845,94	5795871,14	104,60	80,91	-23,64	3,10
3	3597844,57	5795865,69	109,45	77,65	-41,63	-1,89

Die Parameter sind im Einzelnen: Die Position des Mastes, angegeben als Rechts- und Hochwert im Gauß-Krüger Koordinatensystem, die Höhe, in der der Sensor montiert ist, sowie der Neigungswinkel des Sensors zum Aufnahmezeitpunkt.

Diese bestehen aus:

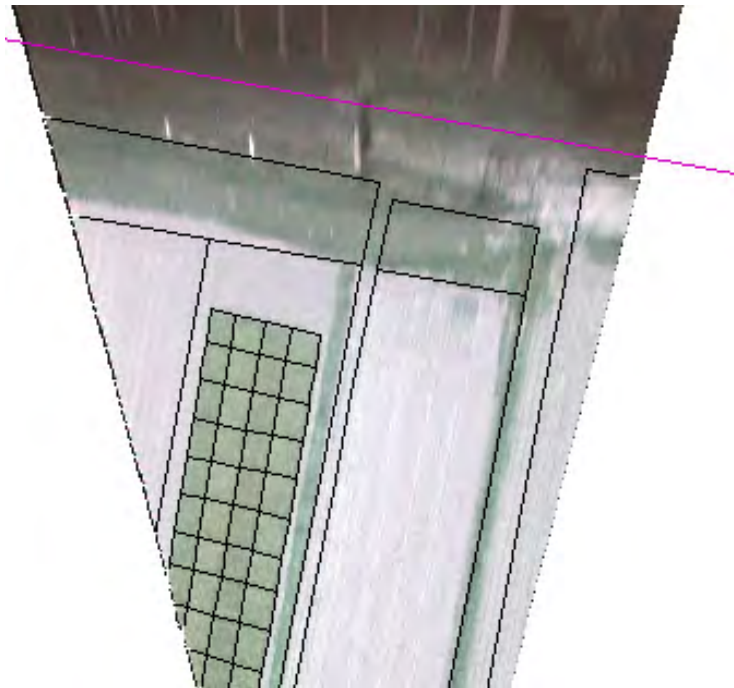
- a) der Drehung um die X-Achse (Omega), also einer Neigung des Sensors nach oben oder unten,
- b) einer Drehung um die Y-Achse (Phi), das entspricht einer Verkantung des Sensors und
- c) einer Drehung um die Z-Achse (Kappa), der Drehung des Sensors in die verschiedenen Himmelsrichtungen.

Das LASSIE- $\beta$  System ist mit zwei Kameras ausgerüstet. Der Abstand beider Kameras zueinander ist konstant. Die Einzelbilder der beiden Kameras wurden durch eine Co-Registrierung aufeinander angepasst. Anschließend wurden die Bilder der Infrarot-Kamera und der 3-CCD Kamera in einen multispektralen Datensatz überführt. Abbildung 4-4 zeigt visuell die Entzerrungsgüte der beiden Kameras durch Überlagerung beider Bilder.



**Abb. 4-4:** Überlagerung der co-registrierten Bilder der 3-CCD und der Infrarot-Kamera als Falschfarben-Infrarot Darstellung. Aufnahme vom 25. Mai 2003. (R= Infrarot, G = sichtbares Rot, B = sichtbares Grün)

Das geometrische Auflösungsvermögen von LASSIE ist mit 0,5 m deutlich besser als offiziell verfügbares Kartenmaterial, das eine Lagegenauigkeit von  $\pm 3$  m gewährleistet (LGN 2002). Die Güte der Entzerrung kann entweder über das statistische Maß des RMS-Fehlers bewertet werden, oder durch einen visuellen Vergleich. Dazu wurden die Testparzellen auf dem „Südfeld“ mit differentiell GPS eingemessen (Lagegenauigkeit  $\pm 1,5$  m) und in einem GIS übereinander gelegt. In Abbildung 4-5 sind die entzerrten LASSIE Bilder mit den GPS-vermessenenden Parzellengrenzen und den offiziellen ATKIS-Daten dargestellt.



**Abb. 4-5:** Entzerrtes LASSIE Bild mit ATKIS Linien Geometrie und GPS-vermessenenden Parzellengrenzen.

Aus Abbildung 4-5 ist die hohe Genauigkeit der geometrischen Entzerrung der Schrägaufnahmen in Pseudo-Nadir Aufnahmen zu erkennen.

#### *Fazit:*

Die Schrägaufnahmen konnten mit einem absoluten Lagefehler unter 0,5 m in Pseudo-Nadir Bilder entzerrt werden. Die Korrektur der Einzelbilder als Bündelblockausgleich lieferte eine höhere Passgenauigkeit, als eine separate Entzerrung für jedes einzelne Bild. Die Bilder der verschiedenen Kameras konnten durch separate Bündelblockausgleiche gut aufeinander angepasst werden.

#### 4.1.2 Radiometrie

Die Radiometrie des LASSIE Systems wird von zwei Faktoren beeinflusst:

1. Beleuchtungsverhältnisse
2. Richtungsabhängiges Reflexionsverhalten

*Beleuchtungsverhältnisse.* Die Beleuchtungsverhältnisse variieren im Tages- und Jahresgang (Abb. 4-6). Eine Vergleichbarkeit der Bilddaten untereinander kann unter diffusen Beleuchtungsverhältnissen durch eine relative Kalibrierung erreicht werden.

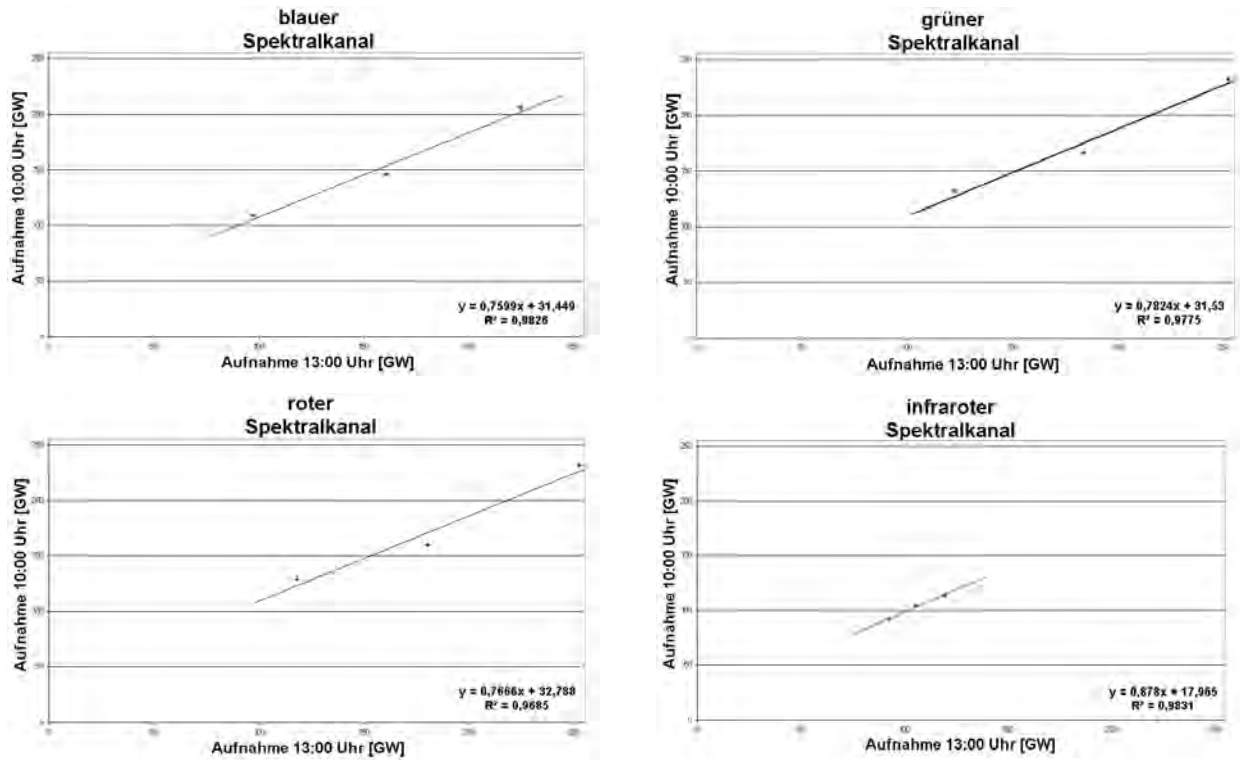


**Abb. 4-6:** Unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse im Tagesgang. Links: Aufnahme vom 25. Mai 2003, 10:00 Uhr. Rechts: Aufnahme vom 25. Mai, 13:00 Uhr.

Ein Bild, das eine gute Helligkeitsverteilung aufweist wurde als Masterbild verwendet. Das zweite Bild wurde radiometrisch auf das Masterbild angepasst. Dazu wurden Flächen in beiden Bildern gesucht, die sich über den Tagesverlauf spektral wenig oder gar nicht verändern, also pseudo- invariant sind. Durch Regressionsmodelle können die Bilder aufeinander angepasst werden.

Abbildung 4-7 zeigt die Regressionsgerade für die Anpassung der LASSIE Bilder vom 25.05.2003 von 10:00 Uhr und 13:00 Uhr. Zu sehen ist hier, dass spektralen Kanäle gut auf die Spektralmessungen angepasst werden konnten.





**Abb. 4-7:** Regressionsmodelle zur relativen Kalibrierung von LASSIE Aufnahmen vom 25.05.2003, 10:00 Uhr und 13:00 Uhr.

Werden die pseudo-invarianten Flächen mit einem Feldspektrometer vermessen, können die Bilddaten nach der Empirical Line Methode absolut spektral kalibriert werden. Anstatt der Grauwerte des Masterbildes gehen die gemessenen Reflexionsgrade in die Regressionsmodelle ein.

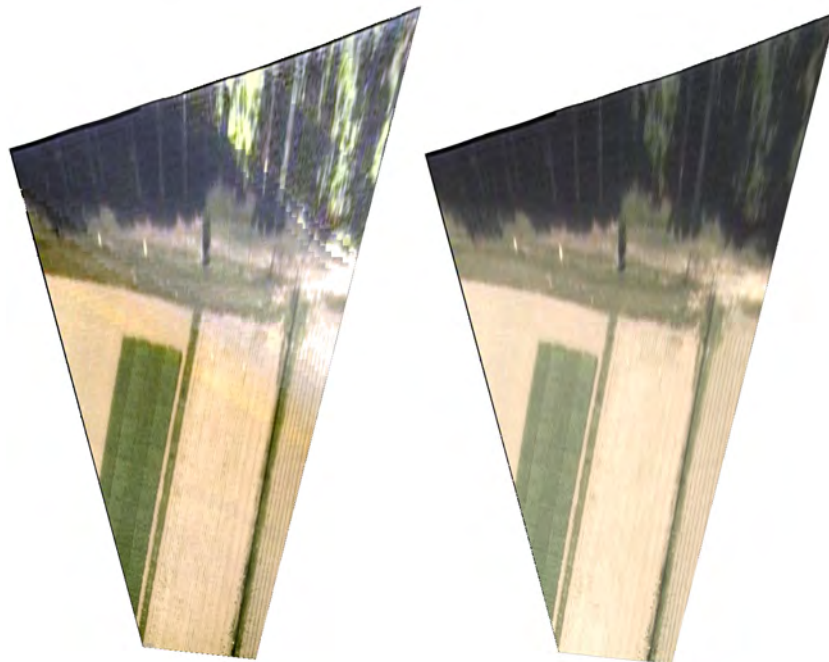
*Richtungsabhängiges Reflexionsverhalten.* Bilder, die bei direkter Sonneneinstrahlung aufgezeichnet wurden, können mit Hilfe einer Beleuchtungskorrektur angepasst werden. Als Korrekturfaktor wird der Scatteringwinkel verwendet (vgl. Kap. 3.3.2.1). Abbildung 4-8 zeigt das richtungsabhängige Reflexionsverhalten anhand des Scatteringwinkels für die Aufnahmesituation vom 27.05.2003, 13:05 Uhr Ortszeit.



**Abb. 4-8:** Das richtungsabhängige Reflexionsverhalten, dargestellt anhand des Scatteringwinkels für die Aufnahmesituation vom 27.05.2003, 13:05 Uhr. Helle Grauwerte bezeichnen eine geringe, dunkle eine hohe richtungsabhängige Reflexion.

In der Abbildung 4-8 wird der Scatteringwinkel als Wichtungsfunktion zur Korrektur der richtungsabhängigen Reflexion verwendet, starke Richtungsabhängigkeiten werden daher durch geringe Grauwerte dargestellt, das entspricht einer geringeren Wichtung bei der Korrektur der Bildbereiche.

In Abbildung 4-9 ist das Ergebnis einer Beleuchtungskorrektur dargestellt.



**Abb. 4-9:** Ergebnis einer Beleuchtungskorrektur. Links: Originalbild, rechts: Korrigiertes Bild.

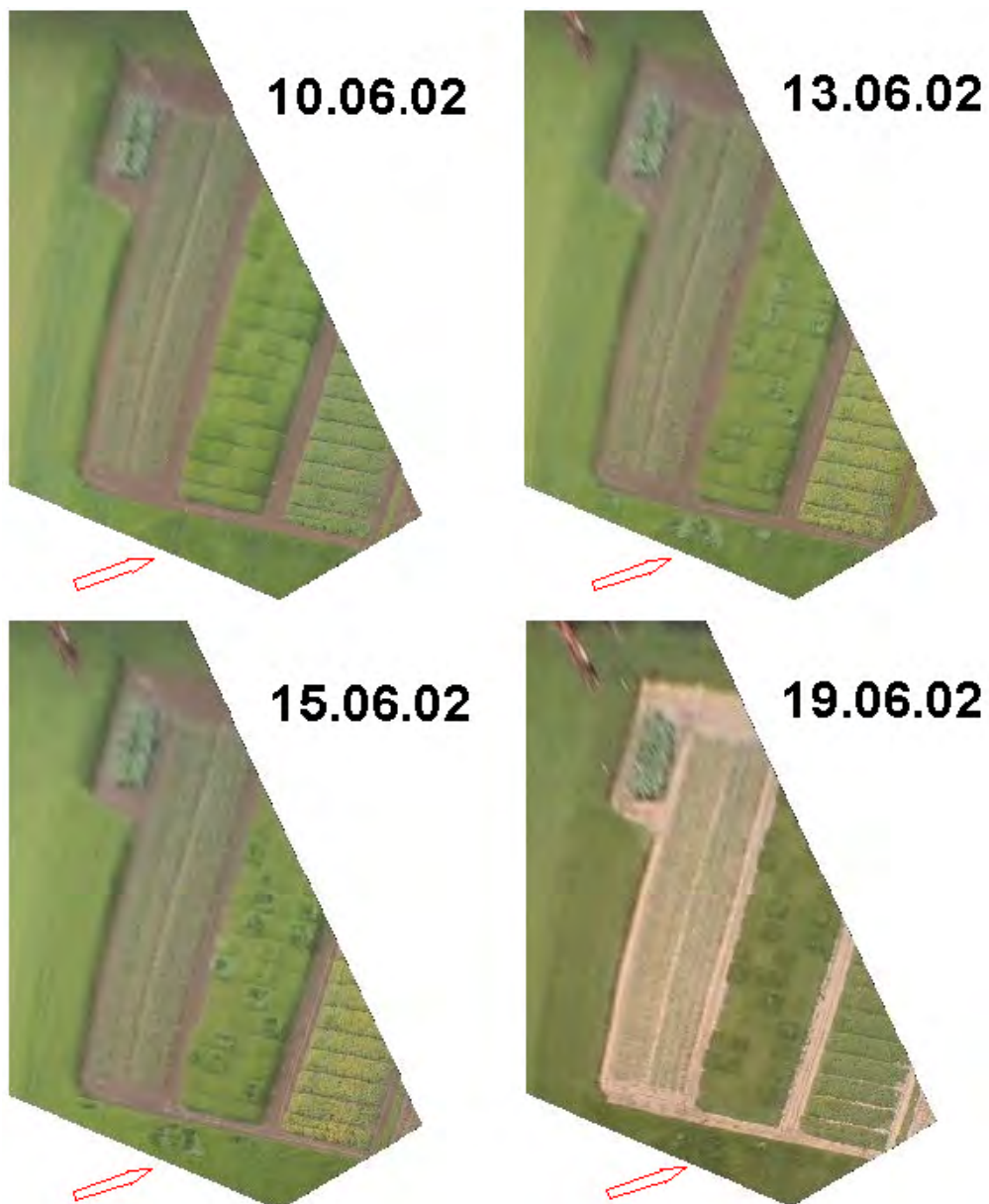
Das Ergebnis der Beleuchtungskorrektur liefert visuell zwar gute Ergebnisse. Die tatsächliche Güte der Korrektur kann jedoch nur über vergleichende Spektralmessungen mit einem Feldspektrometer erfolgen. Hier ergibt sich weiterer Forschungsbedarf.

*Fazit:*

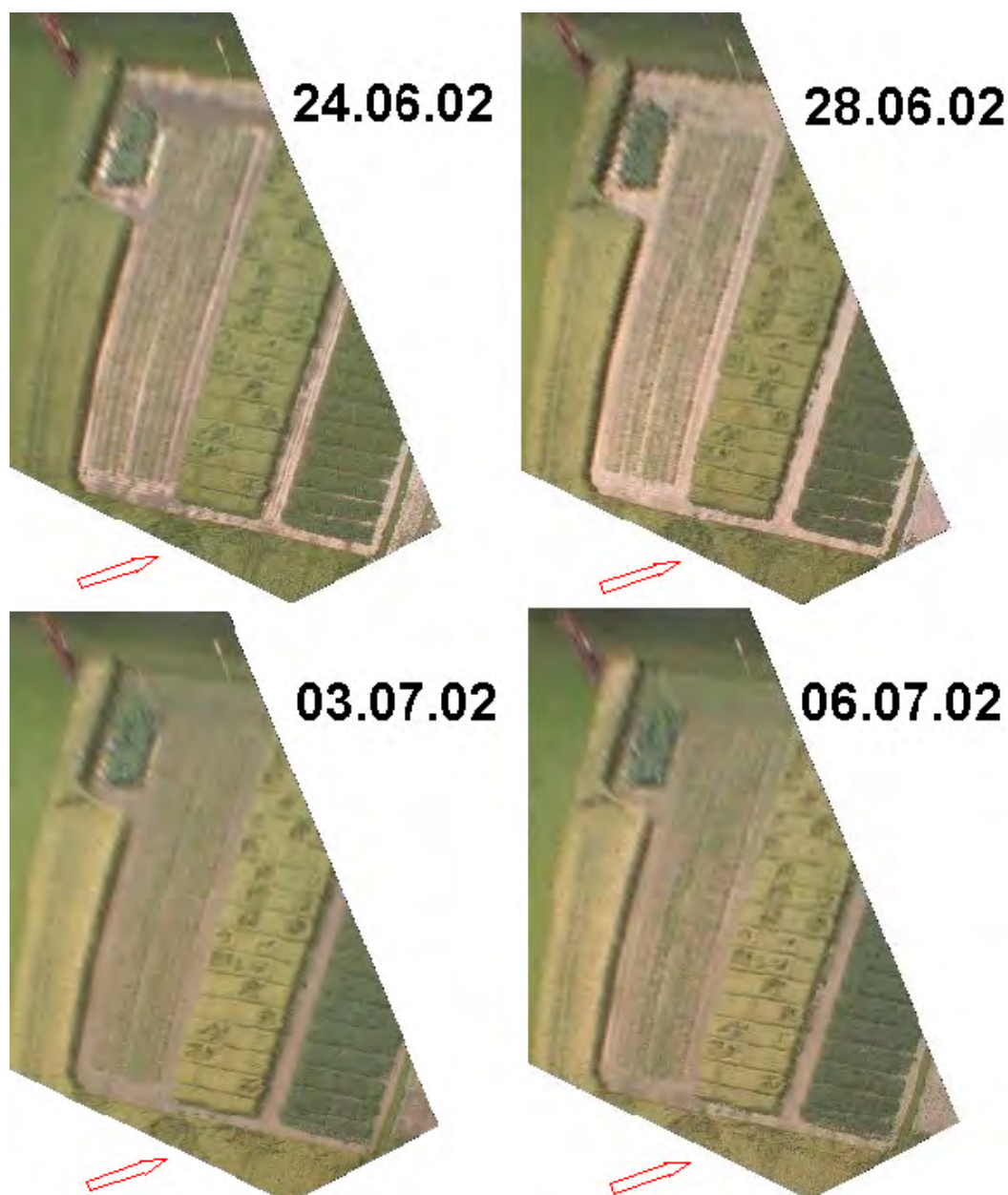
Die durch Tages- und Jahresgang der Sonne hervorgerufenen Helligkeitsunterschiede können durch eine radiometrische Korrektur ausgeglichen werden. Zur Korrektur eignet sich bei diffusen Beleuchtungsverhältnissen eine relative Kalibration über pseudo-invariante Flächen. Ist ein Feldspektrometer verfügbar, kann eine absolute Kalibration durchgeführt werden. Bei direkter Sonneneinstrahlung kann ein Modell zur Beleuchtungskorrektur eingesetzt werden. Die Qualität der Korrektur ist aber durch weitere Forschungsarbeiten zu überprüfen.

#### 4.1.3 Aufnahme dynamischer Karten

Die gute Datenverfügbarkeit mit dem LASSIE System erlaubt es, dynamische Karten zu generieren. Dazu wurden die korrigierten Tagesbilder zu einem fortlaufenden Film montiert. Das gedruckte Manuskript erlaubt keine Präsentation dieser dynamischen Karten. Zur Darstellung werden in den Abbildungen 4-10 und 4-11 Einzelbilder des Films gezeigt, um die Möglichkeiten der Beobachtung von Prozessen zu zeigen.



**Abb. 4-10:** Ausschnitte aus einer dynamischen Karte. Die Aufnahmen stammen aus der Zeit vom 10. Juni bis zum 19. Juni 2002 und zeigen die Abreife eines Düngeversuchs zu Weizen (FV 9). Informationen zum Versuchsaufbau sind im Internet unter [www.pb.fal.de](http://www.pb.fal.de) zu finden.



**Abb. 4-11:** Ausschnitte aus einer dynamischen Karte. Die Aufnahmen stammen aus der Zeit vom 24. Juni bis zum 6. Juli 2002

Die dynamischen Karten erlauben die Beobachtung und Dokumentation von Wachstumsprozessen. In Abbildung 4-10 ist der genaue Zeitpunkt (13.06.02) des Auftretens von Lager (markiert mit einem roten Pfeil), in diesem Falle bedingt durch partielle Überdüngung mit Stickstoff, zu erkennen.

*Fazit:*

Die ständige Verfügbarkeit von LASSIE Bildern ermöglicht es, dynamische Karten zu erstellen, die wiederum ein neues Werkzeug zur Beobachtung und Dokumentation der Entwicklung von Beständen, aber auch des Wassergehaltes im Boden bereitstellen.

*4.2 Informationsgehalt bodennaher Fernerkundung*

Die Verwendung einer Infrarot-Kamera erlaubt die Erstellung von Multispektralbildern. Zusätzliche Spektralkanäle sind jedoch nur dann sinnvoll, wenn sich die Grauwerte der verschiedenen Kanäle voneinander unterscheiden, also einen Informationszugewinn erwarten lassen. Mit Hilfe der deskriptiven Statistik und einer Kovarianzmatrix wurden die Korrelationskoeffizienten zwischen den einzelnen Kanälen berechnet (Tab. 4-5). Anhand einer multispektralen LASSIE Aufnahme vom 25.05.2003 wurde der Informationsgehalt für die Einzelkanäle berechnet. Tabelle 4-4 stellt die Ergebnisse der deskriptiven Statistik für die Einzelkanäle dar.

**Tab. 4-4:** Deskriptive Statistik für die Einzelkanäle der LASSIE Aufnahme vom 25. Mai 2003.

Spektralkanal	Min	Max	Mittelwert ( $\mu$ )	Varianz ( $\sigma$ )
<b>Blau</b>	58	153	107,6	11,7
<b>Grün</b>	71	188	145,3	12,7
<b>Rot</b>	68	205	151,1	16,4
<b>Infrarot</b>	96	179	135,6	17,3

**Tab. 4-5:** Kovarianzmatrix für die Einzelkanäle der LASSIE Aufnahme vom 25. Mai 2003.

Spektralkanal	Blau	Grün	Rot	Infrarot
<b>Blau</b>	137,4	140,7	187,7	-62,1
<b>Grün</b>		160,4	200,0	-26,8
<b>Rot</b>			268,7	-94,4
<b>Infrarot</b>				299,3

Ausgehend von den Varianzen der Einzelkanäle und der Kovarianzmatrix lassen sich die Korrelationskoeffizienten für die Einzelkanäle nach Formel 4.2 berechnen:

$$r_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad [4.2]$$

Der Korrelationskoeffizient zwischen Kanal 1 und 2 ( $r_{12}$ ) berechnet sich aus der Division der Kovarianz beider Kanäle ( $\sigma_{12}$ ) durch das Produkt der Varianzen der Einzelkanäle. Die Korrelationskoeffizienten zwischen den Einzelkanälen sind in Tabelle 4-6 dargestellt.

**Tab. 4-6:** Korrelationskoeffizienten für die Einzelkanäle der LASSIE Aufnahme vom 25.Mai 2003.

Spektralkanal	Blau	Grün	Rot	Infrarot
Blau	1,00**	0,95**	0,98**	-0,31**
Grün		1,00**	0,96**	-0,12**
Rot			1,00**	-0,33**
Infrarot				1,00**

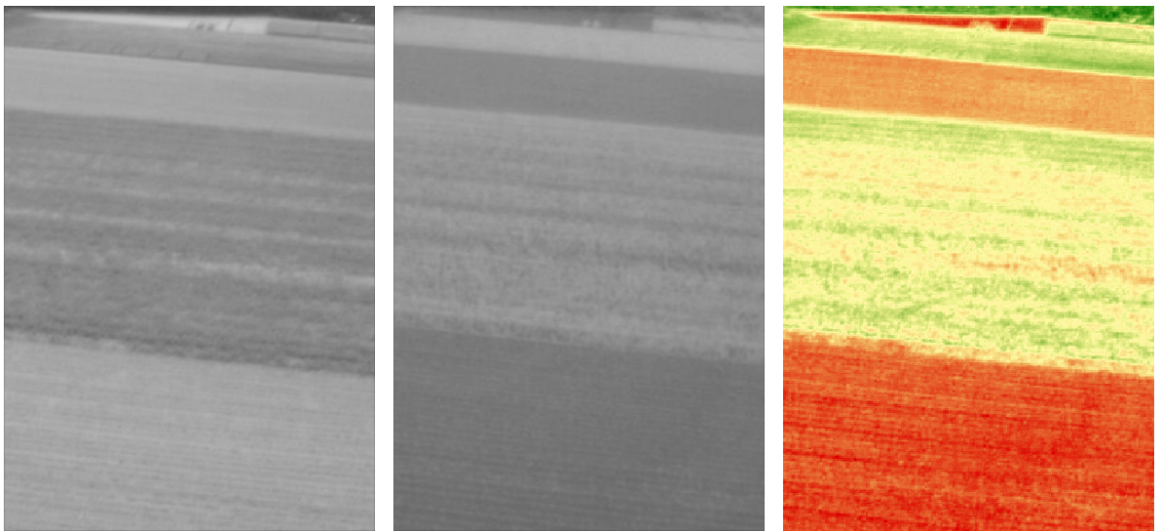
\*\* hoch signifikant,  $\alpha < 1\%$

Aus Tabelle 4-6 kann man erkennen, dass die Spektralkanäle aus dem sichtbaren Wellenlängenbereich untereinander sehr hoch korreliert sind, also redundante Information liefern. Der Infrarotkanal korreliert gering negativ mit dem sichtbaren blau und gering positiv mit dem grünen Kanal. Keine Korrelation besteht zwischen dem sichtbaren Rot und dem infraroten Spektralkanal. Der Einsatz einer Infrarot-Kamera bringt somit einen Informationszugewinn im Vergleich zu einer normalen Kamera im sichtbaren Wellenlängenbereich.

Der blaue Spektralkanal wird am stärksten von Streuungseffekten des Luftlichtes beeinflusst. Aus technischer Sicht ist daher eine Modifikation der 3 CCD-Kamera, bei der der blaue Spektralkanal durch einen infraroten Kanal ersetzt wird, sinnvoll. Neben einer besseren geometrischen Qualität der Bilddaten, kann dadurch auch eine komplette Datenprozessierung der zweiten Kamera eingespart werden. Gleichzeitig entsteht ein Kostenvorteil, da das Sensorsystem nur noch eine Kamera und eine Optik benötigt.

Die Berechnung des Vegetationsindex NDVI (Kap. 2.3) erlaubt es, Aussagen über die Vitalität eines Pflanzenbestandes zu treffen. Wird der Wasserhaushalt einer Pflanze gestört, so kollabiert das Schwamm-Parenchym und die Reflexion im nahen Infrarot geht zurück (Kap. 2.2). Der NDVI reagiert besonders empfindlich auf diesen Reflexionsrückgang, da das nahe

Infrarot in Beziehung zur relativ konstanten Reflexion im sichtbaren Rot gesetzt wird. Ferner eignet sich der NDVI auch zur Erkennung von spärlicher oder aufkommender Vegetation (HILDEBRANDT 1996). Die Bestandesunterschiede sind im Indexbild deutlicher, als in den Originalbildern zu erkennen. Das Einfärben des NDVI-Bildes verdeutlicht die Unterschiede (Abb. 4-12). Die roten Bereiche sind vegetationsfrei, gelbe Farbtöne zeigen eine leichte Vegetation an und die grünen Bereiche stellen eine gut entwickelte Vegetationsdecke dar.



**Abb. 4-12:** Erkennbarkeit von Bestandesunterschieden im Vergleich von Originalbildern (rot, infrarot) und dem Vegetationsindex NDVI. Aufnahme vom 25. Mai 2003, 12:06 Uhr.

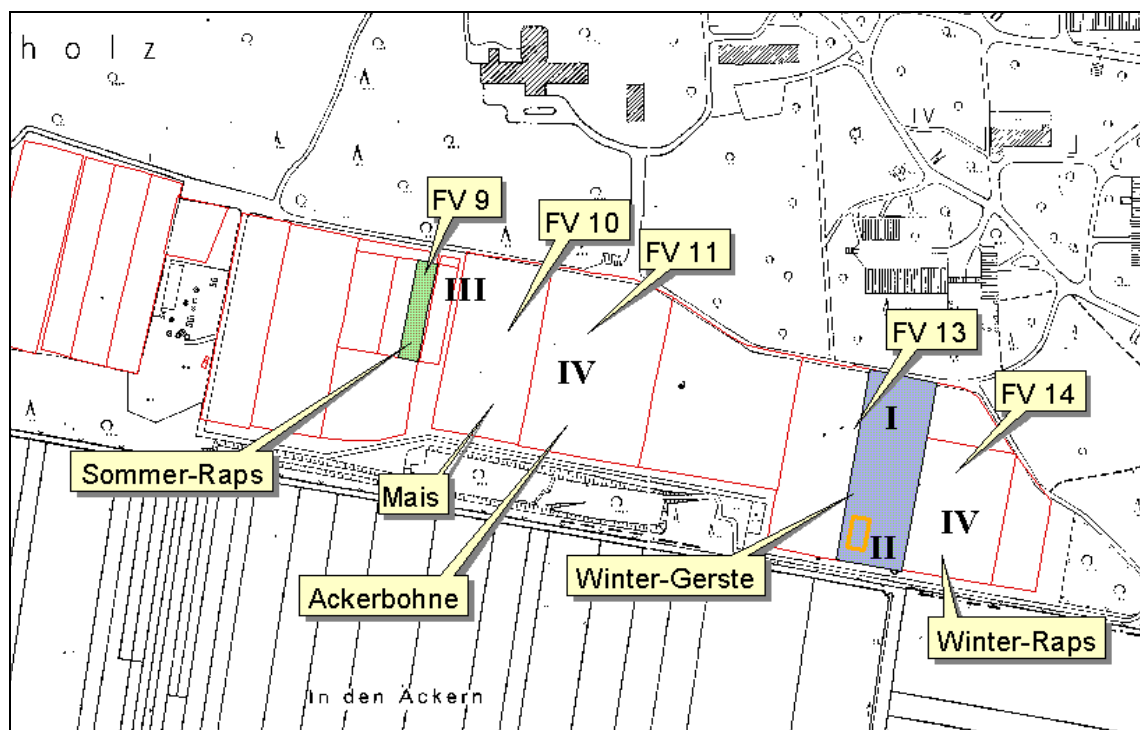
*Fazit:*

Die Verwendung eines infraroten Spektralkanals erhöht den Informationsgehalt der LASSIE Bilder. Außerdem erlaubt dieser zusätzliche Kanal die Berechnung von Vegetationsindizes, die eine bessere Erkennbarkeit von Bestandesunterschieden ermöglichen.



### 4.3 Fallstudien mit bodennaher Fernerkundung

Neben dem regulären Versuchsbetrieb 2002 wurde im Frühjahr 2003 auf dem „Südfeld“ der FAL einige Versuche angelegt, die bewusst Variationen im Pflanzenwachstum erzeugen sollten. Das Ziel dieser Fallstudien war die Frage, ob das LASSIE System in der Lage ist, diese Effekte zu erfassen. Allgemein können mit Fernerkundung nur Phänomene erfasst werden, ohne dabei die Kausalitäten für diese Erscheinungen zu kennen. Daher wurden die Wachstumsunterschiede für die Fallstudien auf verschiedene Arten erzeugt. In Abbildung 4-13 ist die Lage der Versuchsflächen auf dem „Südfeld“ dargestellt:

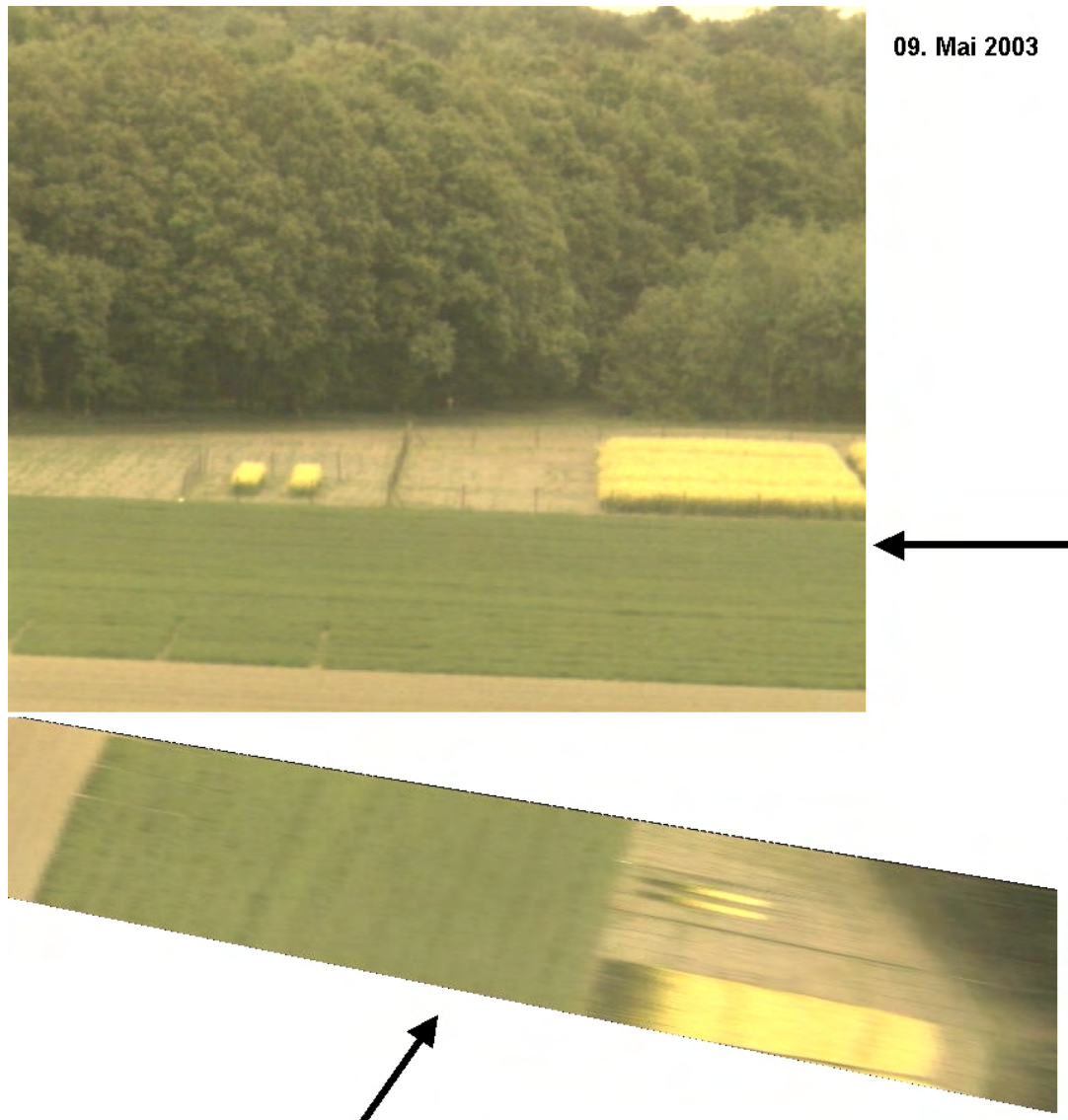


**Abb. 4-13:** Versuchsflächen für die Fallbeispiele: I Bewässerung, II Herbizidschaden, III Dünge- und Sortenunterschiede, IV Phänologie

#### 4.3.1 Bewässerung

Der östliche Teil des Winter-Gerste Schlags des Feldversuchs 13 wurde am 8. Mai 2003 mit ca. 30 mm Wasser beregnet. Durch diese Bewässerung sollten Wachstumsunterschiede innerhalb eines Feldes hervorgerufen werden. Einen Tag später, am 9. Mai, war eine leichte Struktur im Feld zu erkennen. Offensichtlich war jedoch die Wassermenge zu gering, um

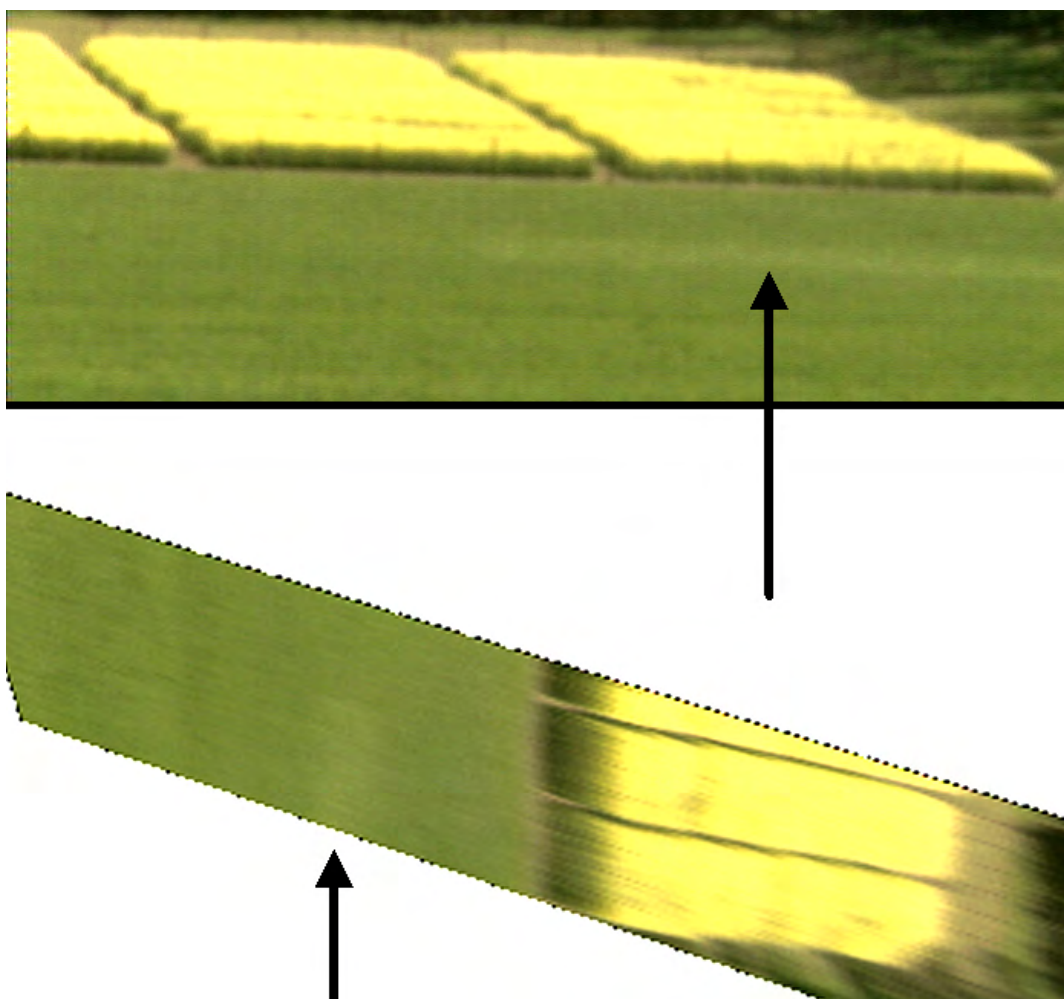
deutliche Unterschiede im Wachstum hervorzurufen. Die bewässerten Bereiche sind im Originalbild etwas besser zu erkennen, als in der Pseudo-Nadiraufnahme (Abb. 4-14). In den folgenden Tagen wurden die Unterschiede durch einsetzende Niederschläge weiter verwischt.



**Abb. 4-14:** Schwache Wachstumsunterschiede durch Beregnung. Oben: Originalbild, unten: entzerrte Pseudo-Nadiraufnahme

### 4.3.2 Pflanzenschutzschaden

Innerhalb des Feldversuchs 13 (Winter-Gerste) wurde eine ca. 280 m<sup>2</sup> große Fläche mit der dreifachen Herbizidmenge im Vergleich zum Rest des Versuches behandelt. Ziel dieses Versuchs war es, die durch den Herbizidschaden hervorgerufenen Wachstumsunterschiede mit dem LASSIE-System zu detektieren. Zudem wurde untersucht, wann die Wuchsunterschiede zu erkennen sind. Der Herbizidschaden wurde am 14. April 2003 angelegt, die ersten Veränderungen waren jedoch erst am 4. Mai in den LASSIE-Bildern zu beobachten. Dieser Zeitverzug ist mit der anhaltenden Trockenheit im April zu begründen, die das Wachstum insgesamt verlangsamt hat.



**Abb. 4-15:** Herbizidschaden in Winter-Gerste. Aufnahme vom 4. Mai 2003.

### 4.3.3 Düngeunterschiede, Düngeschaden

Eine unterschiedliche Nährstoffversorgung wirkt sich direkt im Pflanzenwachstum aus. Im Feldversuch 9 wurden im Jahr 2002 Winter-Weizen Parzellen mit unterschiedlichen Stickstoff- und Schwefel-Düngestufen angelegt. Die Wachstumsunterschiede konnten mit dem LASSIE-System deutlich dokumentiert werden.



**Abb. 4-16:** Düngeunterschiede und Lager durch partielle Überdüngung.

Ebenfalls konnte der negative Einfluss partieller Überdüngung mit Stickstoff und der dadurch resultierende Schaden durch Lager mit dem LASSIE-System dokumentiert werden.

#### 4.3.4 Phänologie

Die Eignung von dynamischen Karten zur Erfassung der Phänologie wurde bereits in Kapitel 4.1.3 angesprochen. Neben der Dokumentation der gesamten Vegetationsperiode können auch phänologische Einzelereignisse wie zum Beispiel der Beginn der Rapsblüte zeitlich genau dokumentiert werden.

Insbesondere in der frühen Vegetationsperiode eignet sich das System, um das Auflaufen der Pflanzen zu beobachten. In Abbildung 4-17 ist das Auflaufen von Sommer-Raps dargestellt.

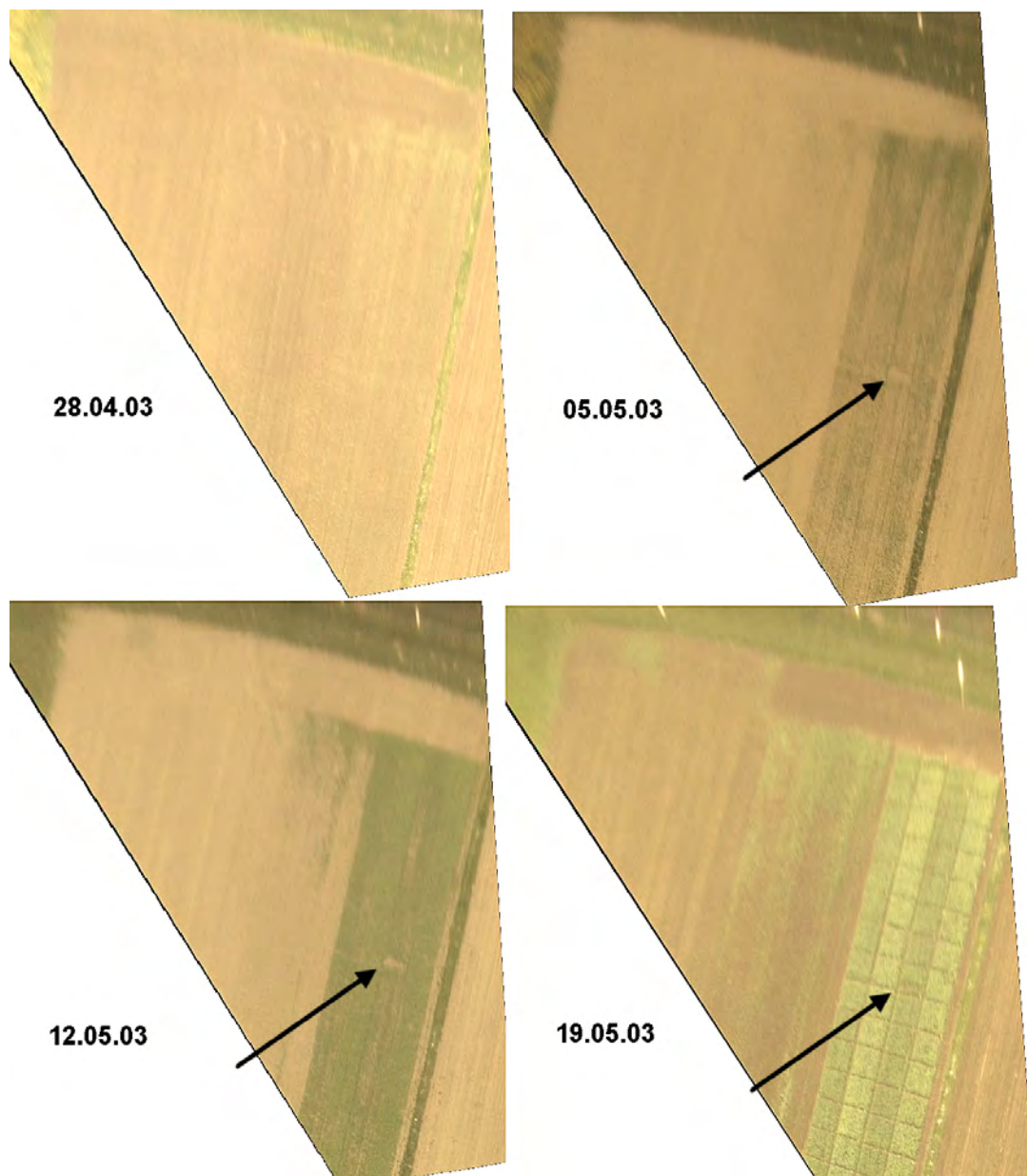
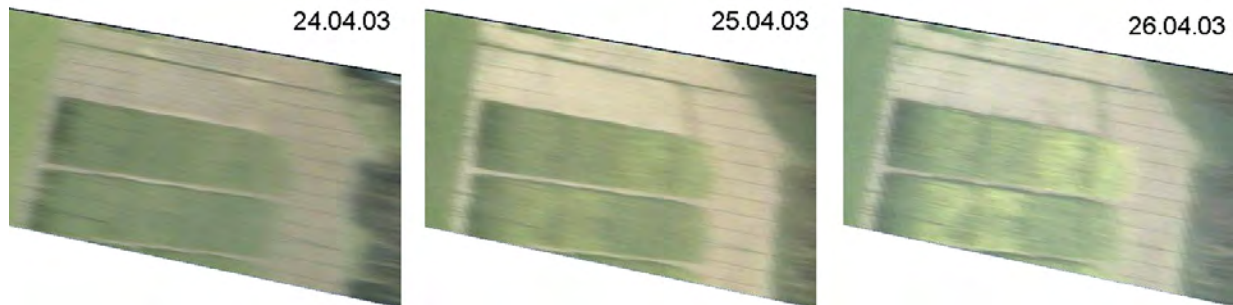


Abb. 4-17: Auflaufen von Sommer-Raps. Mit den Pfeilen ist ein Auflaufschaden markiert.

Der Beginn der Rapsblüte, hier Winter-Raps, lässt sich mit dem LASSIE System auch bei extremen Beobachtungsgeometrien (Teleobjektiv 120 mm) erfassen (Abb. 4-18).



**Abb. 4-18:** Beobachtung des Zeitpunktes der Rapsblüte.

Für die Beobachtung von Einzelpflanzen und lockeren Beständen eignet sich besonders der Einsatz einer infrarotempfindlichen Kamera, welche die Reflexionsunterschiede von Vegetation und Boden besser auflösen kann, als eine Kamera aus dem sichtbaren Spektralbereich (Abb. 4-19).



**Abb. 4-19:** Mais in einem frühen Entwicklungsstadium. Links: Aufnahme aus dem sichtbaren Wellenlängenbereich, rechts: Infrarotaufnahme. Aufnahme vom 23. Mai 2003.

## 5 Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde das Konzept für den bodengestützten Fernerkundungssensor LASSIE in eine Prototypenentwicklung umgesetzt. Im folgenden Kapitel wird das System zu den bestehenden Fernerkundungsanwendungen eingeordnet, sowie die sich neu ergebenden Problemfelder und Anwendungsmöglichkeiten diskutiert. Es werden drei Konzepte für die Organisation des Systembetriebes von LASSIE besprochen und mögliche Anwendungsfelder erörtert. Abschließend werden die ökonomischen Aspekte von LASSIE behandelt.

### 5.1 Vergleich bodennaher mit operationeller Fernerkundung

Die operationelle Fernerkundung<sup>1</sup> kann dem Bedarf der Landwirtschaft nach Informationen über den aktuellen Zustand von Böden und Pflanzenbeständen auf Betriebsebene derzeit nicht Rechnung tragen. Einerseits stellen landwirtschaftliche Anwendungen hohe Anforderungen an die zeitliche Auflösung von Bilddaten (alle vier bis 14 Tage, ALLAN 1990), andererseits führen die Vorprozessierungen (geometrische Entzerrung und radiometrische Korrektur) zu einem Verzug bei der Datenauslieferung. Hinzu kommt eine unsichere Verfügbarkeit von optischen Fernerkundungsdaten durch die Abhängigkeit von den aktuellen Witterungsverhältnissen (s. Kap. 1).

Zu einem gewissen Grad kann die Datenverfügbarkeit durch den Start immer neuer Sensoren verbessert werden; so geschehen durch die Tandemmission von *Landsat 5* und *7* bis Juni 2001, die durch eine geschickte Orbitwahl wöchentliche Daten bereitstellen konnten. Allerdings sind die neuen Satelliten oft nicht in ihrer geometrischen oder spektralen Auflösung kompatibel, was zu einem erhöhten Prozessierungsaufwand bei der Co-Registrierung der Daten führt.

Der Verkauf von Satellitendaten erfolgt in der Regel in Form von Bildausschnitten mit einer vordefinierten Größe, sogenannten Szenen. *Landsat* Daten werden beispielsweise als Voll-

---

<sup>1</sup> Unter operationeller Fernerkundung werden hier ausschließlich die Satellitensysteme verstanden, da diese regelmäßig Daten liefern. Luftbilder sind derzeit nur durch Spontanbefliegungen oder aus langen Zeitintervallen (alle 5 Jahre) verfügbar.

(180 x 180 km), Viertel- (90 x 90 km), Mini- (50 x 50 km) und Mircoszenen (25 x 25 km) angeboten, wobei die Preise für kleinere Ausschnitte aufgrund des höheren Bearbeitungsaufwandes des Datenvertreibers nur geringfügig günstiger sind, als die der Vollszenen (EURIMAGE 2003b). In Deutschland beträgt die durchschnittliche Größe landwirtschaftlicher Betriebe (ab 2 ha landwirtschaftlich genutzte Fläche, LF) 41,4 ha (BMVEL 2002). Diese kleinräumige Struktur stellt ein Vertriebsproblem für die Datenanbieter dar. Für den landwirtschaftlichen Kleinbetrieb ist der Zugang zu Satellitendaten damit eingeschränkt. Eine Bündelung der Datenbestellung über Maschinenringe und Lohnunternehmer könnten die Datenbeschaffung optimieren.

Es lässt sich zusammenfassen: Der operationelle Einsatz von Fernerkundung in der landwirtschaftlichen Praxis ist limitiert durch:

1. Unzureichende Repetitionsraten
2. Ungünstige Datenverfügbarkeit durch Bewölkung
3. Langwierige Vorprozessierung der Daten
4. Ungünstige Datengrößen für Kleinbetriebe

Das LASSIE System kann Alternativen für die Fernerkundung auf Betriebsebene anbieten. Die kontinuierliche Datenbereitstellung auch zu ungünstigen Witterungsbedingungen, sowie eine automatisierbare Prozessierungskette entschärfen die entscheidenden Schwachstellen der Fernerkundung. Eine voll automatisierte Prozessierungskette ist derzeit noch nicht verfügbar, da die kommerzielle Auswertungssoftware noch auf die speziellen Anforderungen des LASSIE-Systems angepasst werden muss. Die Funktionalitäten zur Datenprozessierung sind vorhanden, allerdings sind noch mehrere manuelle Bearbeitungsschritte notwendig. Der zeitliche Aufwand zur Erstellung der Sensorkalibrierung ist in der Tabelle 5-1 wiedergegeben.

**Tab. 5-1:** Prozessierungszeiten für das LASSIE-Prototyp System

<b>Arbeitsschritt</b>	<b>geschätzte Zeitdauer</b>
1. Vermessung von Geländepunkten	ca. 3 Tage
2. Programmierung der Kamerapositionen	ca. 2 Stunden
3. Entzerrung und Bestimmung der Kalibrierparameter	ca. 2 Stunden pro Bild
4. Entzerrung von Folgebildern	manuell ca. 5 min. / automatisch 1 min.
5. Radiometrische Modellierung	ca. 2 Stunden



Die Arbeitsschritte 1 bis 3 sind nur einmalig zur Aufstellung der Kalibrierparameter durchzuführen. Der Arbeitsschritt 4 beinhaltet derzeit noch viele manuelle Arbeiten, wie zum Beispiel Konvertierungen des Dateiformates. Durch die Anpassung der Auswertungssoftware an die Anforderungen des LASSIE-Systems ist hier eine große Zeitersparnis in der Auswertung zu erwarten. Die radiometrische Modellierung befindet sich noch in einem experimentellen Stadium und bedarf weiterer Entwicklung und Validierung. Hier ist eine deutliche Optimierung der Modellierungsprozesse anzustreben. Insgesamt zeigt sich, dass der Automatisierungsgrad der Prozessierungskette deutlich erhöht werden muss, und die bestehenden Softwarepakete speziell auf die Anforderungen des LASSIE-Systems angepasst werden müssen.

Die Möglichkeit einer feinen zeitlichen Auflösung von LASSIE stellt völlig neuartige Auswertungsmöglichkeiten zur Verfügung. Herkömmliche Fernerkundungsdaten sind immer nur Momentaufnahmen, die durch technische Rahmenbedingungen (Flugbahn, Überflugszeit) vorgegeben sind. Die Satellitenfernerkundung setzt hauptsächlich sonnensynchrone Flugbahnen ein, das bedeutet, dass eine Region immer wieder zur gleichen Uhrzeit überflogen wird. Phänomene im Bestand, die einem Tagesverlauf folgen, z. B. Turgorveränderung bei Zuckerrüben zur Mittagszeit, konnten daher bisher kaum erfasst werden. Hier bieten sich mit LASSIE neue Möglichkeiten an, wie Zeitrafferaufnahmen, die Veränderungen im Bestand über einen Zeitraum (Tag, Woche, Monat) dokumentieren. Die Erfassung dynamischer Prozesse und ihre gleichzeitige Kartierung (dynamic mapping) werden damit erstmalig möglich und versprechen ein großes Informationspotenzial, da nun aus räumlichen Strukturen Prozesse abgeleitet werden können (z. B. räumlicher Verlauf von Pflanzenkrankheiten, räumliche Muster beim Abtrocknen von Böden).

Die Stärke der klassischen Fernerkundung ist die schnelle bildhafte Aufnahme größerer Regionen, bis hin zur globalen Abdeckung. Eine komplette flächendeckende Erfassung der Landschaft mit LASSIE ist nicht realistisch. Die LASSIE-Systeme sind eine Ergänzung der bestehenden Fernerkundungssensoren und sollen diese nicht ersetzen, sondern deren Anwendungsspektrum erweitern.

Fernerkundung kommt ohne Referenzdaten (ground truth) nicht aus (LILLESAND & KIEFER 1994). Die hochaufgelösten LASSIE Bilder können als Referenz für weniger detailreiche Luft- und Satellitenbilder verwendet werden, und deren Analyse und Interpretation unterstützen.

Liegen die LASSIE Daten radiometrisch korrigiert vor, können sie zur Kalibrierung anderer Fernerkundungssensoren eingesetzt werden. Zudem eignen sich Daten zur Validierung der Informationen, die aus den Satellitendaten extrahiert wurden.

Verteilt man mehrere LASSIEs repräsentativ über ein Gebiet, können aus den Bilddaten Aussagen für eine ganze Region gefolgert werden (z. B. Phänologie). Denkbar ist ein ganzes Netzwerk von LASSIEs über ein Land verteilt, ähnlich dem meteorologischen Messnetz des Deutschen Wetterdienstes.

Bevor LASSIEs großmaßstäbig eingesetzt werden können, sind noch einige technische Probleme zu lösen.

Für den Einsatz des Prototypen auf dem Gelände der FAL wurde das Versuchsfeld mit einer Stromversorgung und Anbindung an das Datennetz ausgerüstet. Diese Infrastruktur besteht für die meisten Standorte nicht. Während eine autonome Versorgung mit Strom über Solarenergie sichergestellt werden kann, ist der Transfer der Bilder über Datenfunk oder drahtlose Netzwerke (Wireless LAN, Bluetooth) bis 500 m Umkreis möglich. Denkbar sind hier Verstärkeranlagen, die zur Überbrückung größerer Entfernungen genutzt werden können. Die Planung muss für jeden Standort individuell erfolgen und an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden.

Der Betrieb eines LASSIEs auf einem eigens dafür aufgestellten Masten erfordert eine Reihe von Sicherheitsvorschriften, insbesondere beim Arbeiten in Höhen (Sicherheitsausrüstung und Fortbildungen für sicheres Arbeiten), die zusätzliche Kosten verursachen. Eine Installation auf bestehenden Anlagen oder Gebäuden (Hausdächer, Silos, Strommasten) ist kostengünstiger, da oftmals die benötigte Infrastruktur (Strom) bereits vorhanden, oder schnell zu erstellen ist.

Das System ist hinsichtlich der Witterungsbeständigkeit zu optimieren. Gerade die exponierte Lage des Sensors in größerer Höhe bietet dem Wind eine große Angriffsfläche. Im praktischen Einsatz haben sich hängende Kabelverbindungen, die aufgrund der Lageveränderung des Neigekopfes etwas Spiel benötigen, als besonders anfällig gegen Wind erwiesen. Hier ist eine Modifizierung des Gehäuses und die Verkleidung sämtlicher Kabel ratsam, um den Wartungsaufwand möglichst gering zu halten.

Die starken Temperaturschwankungen, die auf das System einwirken, werden durch Heizungen, die sich im Kameragehäuse befinden, ausgeglichen. Trotzdem haben z. B. im

Versuchsbetrieb des LASSIE- $\beta$  Systems starke Fröste Spannungen auf das Infrarotfilter ausgeübt, was zum Reißen der Filterfolie geführt hat. Der Einsatz von Glasfiltern stellt hier eine Alternative dar.

Bei einem Masten im freien Feld stellt Blitzschlag eine besondere Gefahr für das System dar. Derzeit sind keine standardmäßigen Lösungen für einen Blitzschutz verfügbar. Für einen serienmäßigen Einsatz besteht diesbezüglich weiterer Entwicklungsbedarf. Das Risiko von Schäden durch Vandalismus ist als gering einzuschätzen, da sich Sensor und Steuerelektronik in großer Höhe befinden und der Zugang zum Mast schon aus versicherungstechnischen Gründen sicher versperrt sein muss.

## 5.2 Geometrische Eigenschaften von LASSIE Aufnahmen

Die geometrischen Eigenschaften von LASSIE ergeben sich aus der Auflösung der einzelnen Pixel und der Lagegenauigkeit der Einzelbilder, die zu einem Mosaik zusammengeführt werden. In der Regel kann eine Landschaft nicht komplett mit einem LASSIE erfasst werden, da Teilbereiche durch Bäume oder Häuser verdeckt werden. Ein geostatistischer Ansatz zur Interpolation solcher nicht sichtbaren Bereiche wird im Abschluss diskutiert.

*Geometrische Auflösung.* Die geometrische Auflösung von LASSIE ist abhängig vom verwendeten Objektiv und dem Neigungswinkel des Sensors. Im praktischen Einsatz konnte gezeigt werden, dass eine flächendeckende Pixelauflösung von 0,5 m gewährleistet werden kann. LASSIEs können als Informationsquelle für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung verwendet werden. Die für die Landwirtschaft benötigte geometrische Auflösung richtet sich derzeit noch nach der Arbeitsbreite der Landmaschinen, bzw. ist durch die verfügbare Regelungstechnik vorgegeben. Sie wird von MORAN (2000) mit 10–20 m angegeben. Das LASSIE System ist in der Lage eine vielfach bessere Auflösung zu liefern, die auch die Beobachtung kleinräumiger Phänomene, wie z. B. Verunkrautung oder Lagerschäden, erlaubt. Damit eignet sich LASSIE als Instrument zur Datenbeschaffung, auf deren Basis die Bestandesführung geplant und überwacht werden kann.

Der spektrale Informationsgehalt der Pixel nimmt vom Nahbereich zum Fernbereich ab. Das bedeutet, im Fernbereich wird eine größere Fläche von einem Bildpunkt abgebildet. Dieser Informationsverlust kann durch eine variierende Fokussierung zum Teil kompensiert werden.

Die Bestimmung des genauen Neigungswinkels, bei dem der Fokus nachgeführt werden muss, wird die Aufgabe zukünftiger Forschungsarbeiten mit Feldspektrometermessungen sein.

*Lagegenauigkeit.* Die Lagegenauigkeit der geometrisch entzerrten Bilddaten kann über das statistische Maß des RMS-Fehlers bestimmt werden. Dieser Fehler lag durchgängig unter 1. Das bedeutet der Lagefehler für die Bilddaten ist kleiner als ein Pixel, also geringer als 0,5 m. Die Beurteilung der absoluten Lagegenauigkeit kann nur über diese statistische Größe erfolgen, da keine geometrischen Referenzdaten in dieser hohen Auflösung (0,5 m) verfügbar sind. Als offizielle Daten der Landesvermessungsämter liegen die digitalen Daten des Amtlichen-Topographisch-Kartographischen-Informationen-Systems (ATKIS) vor. Diese Daten wurden auf der Basis der Deutschen Grundkarte (DGK) 1 : 5000 digitalisiert und weisen eine Genauigkeit von  $\pm 3$  m auf (LGN 2002). Das LASSIE System ist mit zwei Kameras ausgerüstet, die eine leicht versetzte Aufnahmegeometrie aufweisen. Zur Verschneidung der Bilddaten beider Kameras ist eine Referenzierung der infraroten Bilder zu denen der 3-CCD Kamera notwendig. Diese Referenzierung konnte mit hinreichender Genauigkeit ( $\text{RMS} < 1$ ) (s. Kap. 4.1.1) erreicht werden. Deutliche Unterschiede zeigten sich bei der Mosaikbildung aus den Einzelbildern. Eine Einzelkorrektur der Bilder und anschließende Zusammenführung führte zu starken Lagefehlern und geometrischen Ungenauigkeiten. Die Verwendung des Bündelblockausgleiches erzielte deutlich bessere Ergebnisse.

*Verdeckte Objekte.* Eine ideale flächendeckende Erfassung der umliegenden Landschaft ist mit einem LASSIE in der Praxis oft nicht realisierbar. Bäume, Gebäude oder starkes Relief verringern oft die Einsehbarkeit des gesamten Geländes. Die Ableitung teilflächenspezifischer pflanzenbaulicher Maßnahmen erfordert aber eine komplette Abdeckung der Schläge. Geeignete Verfahren ermöglichen eine Extrapolation der Daten auf der Basis der LASSIE Daten sowie Zusatzinformationen. Generell gilt, je mehr räumliche Information vorhanden ist, desto besser können unbekannte Flächen simuliert werden.

Am Beispiel eines landwirtschaftlichen Betriebs werden die für den Pflanzenbau wichtigen Standortparameter zusammengetragen und deren Modellierung aus den verfügbaren Informationen dargestellt. Die Standortparameter lassen sich in zwei Kategorien unterteilen: a) Basisparameter, b) veränderliche Parameter.

*Basisparameter.* Die Ausprägung des Reliefs und daraus resultierend die Höhenunterschiede, die Verteilung von Kuppen, Hängen und Senken, die Hangneigung und die Exposition, ist entscheidend für die Variabilität eines Standortes verantwortlich (SCHRÖDER 1999). Stoffverlagerungen, der Wasserhaushalt und das Mikroklima ergeben sich aus dem Relief und führen zur Bildung der vorherrschenden Böden. Die Basisparameter stehen in einem engen funktionalen Zusammenhang zum Relief, dieses wiederum kann in Form eines digitalen Geländemodells (DGM) repräsentiert werden. Geländemodelle liegen flächendeckend für das Gebiet der Bundesrepublik mit einer Auflösung von 12,5 x 12,5 m vor, zudem werden sie zur geometrischen Korrektur der LASSIE Bilddaten benötigt und liegen damit für eine Interpolation vor.

*Veränderliche Parameter.* Die Verfügbarkeit von Nährstoffen unterliegt kurzfristigen Schwankungen, die hauptsächlich durch den Witterungsverlauf verursacht werden (SCHRÖDER 1999). Das Mikroklima beeinflusst den Wasser- und Wärmehaushalt der Pflanzen und des Bodens, es lässt sich auch als eine Funktion des Reliefs modellieren. Der tatsächliche Zustand der Pflanzen dokumentiert sich in der spektralen Signatur.

Zur Interpolation der verdeckten Bereiche innerhalb eines Schläges werden als Minimalanforderung nur ein Höhenmodell, und daraus abgeleitete Derivate, und die LASSIE Bilddaten benötigt. Sind weitere flächenhafte Informationen, wie z. B. Bodenkarten verfügbar, können diese zur Verbesserung der Extrapolation verwendet werden. Ziel der Extrapolation ist die Berechnung von aktuellen Zustandsinformationen (z. B. NDVI) für die verdeckten Bereiche. Geeignete Verfahren hierzu sind die multiple Regression oder Techniken der Geostatistik wie Kriging oder Co-Kriging.

Beispielhaft wurde für einen 1000 ha großen Betrieb in Mecklenburg-Vorpommern eine Modellierung durchgeführt, mit dem Ziel eine Position für ein LASSIE zu finden, die alle Unterschiede der Schläge repräsentativ abbilden kann.

Als Ausgangsinformationen standen ein digitales Höhenmodell und eine digitale Karte der Reichsbodenschätzung zur Verfügung. Aus dem digitalen Höhenmodell wurde die potentielle Globalstrahlung pro Jahr für das Gelände ermittelt (Abb. 5-1).

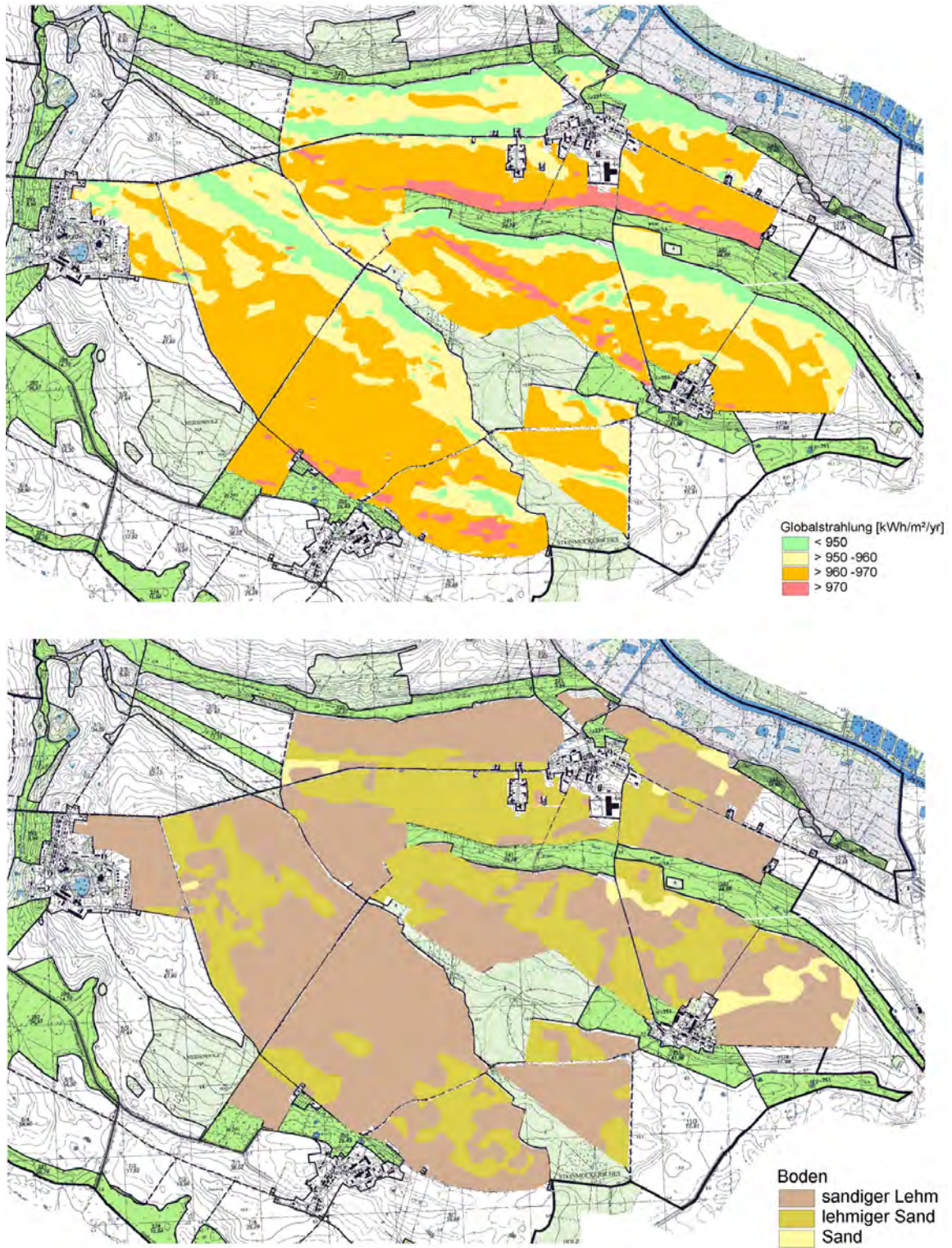
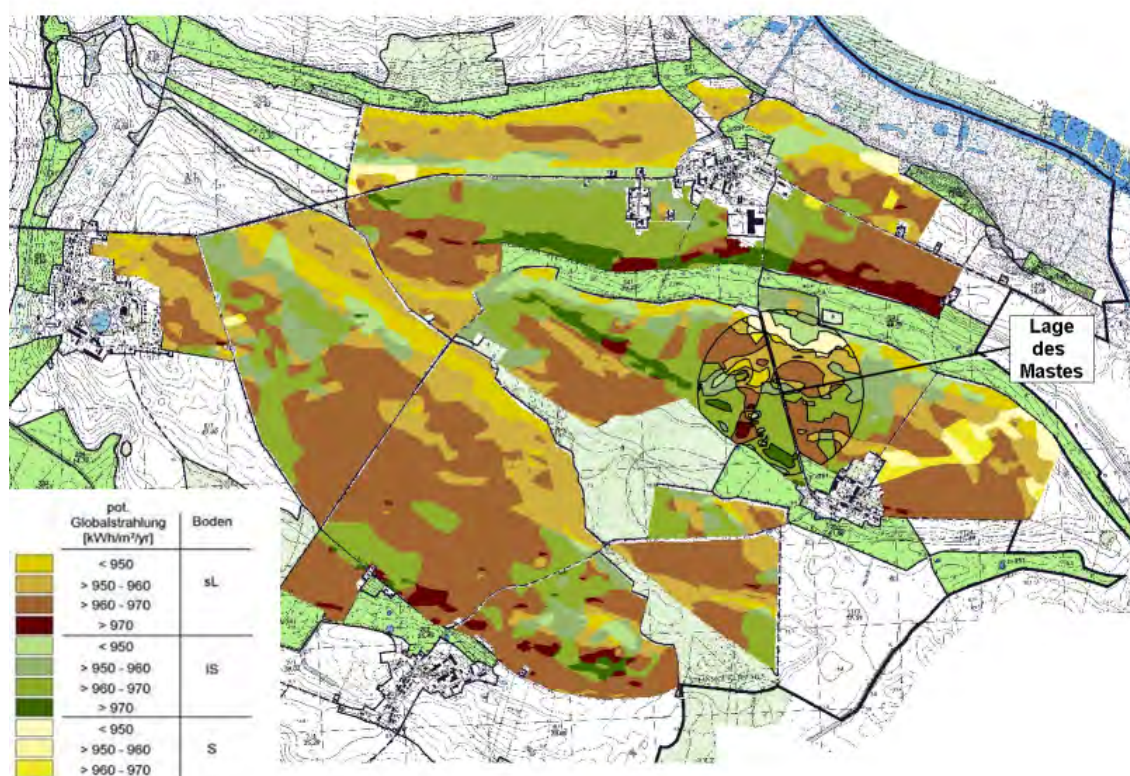


Abb. 5-1: Karte der Globalstrahlung (o.) und Bodenkarte (u.) zur Bestimmung des Standortes eines LASSIE.

Durch die Verschneidung der Globalstrahlungs- und der Bodenkarte in einem GIS konnten zwölf verschiedene Ausprägungsklassen für den Betrieb ermittelt werden, die das Geländeklima und die Bodenverhältnisse beschreiben (Abb. 5-2).

PANTEN (2002) hat gezeigt, dass derartige Monitorpedozellen zur Beschreibung von Bestandesunterschieden geeignet sind. Die Lage des Mastes wurde nun so gewählt, dass alle Ausprägungsklassen erfasst wurden (Abb. 5-2). Somit kann mit nur einem Mast ein kompletter Großbetrieb mit über 1000 ha abgebildet werden.



**Abb. 5-2:** Verschneidungskarte aus Globalstrahlungs- und Bodenkarte.

Ein spezieller Fall verdeckter Objekte sind Flächen außerhalb der Reichweite eines LASSIEs. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach der sinnvollen Bedeckung einer Betriebsfläche mit LASSIE Sensoren.

Hier lässt sich das oben genannte Modell um eine Reihe von Parametern erweitern, die anhand von Ähnlichkeiten produktionstechnischer Grundfaktoren eine Modellierung verdeckter Flächen ermöglicht. Zu diesen Faktoren zählen neben der Kulturart und Sorte noch der Aussattermin und die unterschiedlichen Bodenbearbeitungstechniken.

### 5.3 Radiometrische Eigenschaften von LASSIE Aufnahmen

Die Radiometrie des LASSIE-Systems wird durch drei Faktoren beeinflusst:

1. Beleuchtungsverhältnisse
2. Richtungsabhängiges Reflexionsverhalten
3. Steuerelektronik des Sensors

#### *Beleuchtungsverhältnisse*

Die Beleuchtungsverhältnisse ergeben sich aus dem Sonnenstand und den Witterungsverhältnissen. Unter diffusen Einstrahlungsbedingungen, also ohne direktes Sonnenlicht, können die resultierenden Helligkeitsunterschiede zwischen zwei Bildern unterschiedlicher Aufnahmetermine über eine relative Kalibrierung ausgeglichen werden. Dazu werden Objekte mit relativ stabilem (pseudo-invariantem) Reflexionsverhalten in beiden Bildern gesucht und die Grauwerte des dunkleren Bildes auf das hellere Bild über ein Regressionsmodell angepasst. Die Objekte in beiden Bildern sind zueinander relativ normiert und können verglichen werden.

Bei direkter Sonneneinstrahlung ergibt sich ein richtungsabhängiges Reflexionsverhalten der Oberflächen, das über Reflexionsmodelle korrigiert werden muss. Sehr komplex ist die Radiometrie bei Bildern, bei denen zum Aufnahmezeitpunkt Wolken an der Sonne vorbeizogen. In den Bilddaten ergeben sich dann zum einen diffus beleuchtete und zum anderen Bereiche, die direkt beleuchtet wurden. Eine Korrektur der einzelnen Bildbereiche ist zwar technisch möglich, aber nicht automatisierbar.

#### *Richtungsabhängiges Reflexionsverhalten*

Unter direkter Sonneneinstrahlung kommt es zur richtungsabhängigen Reflexion der Oberflächen. Bisher wurden diese Anisotropieeffekte entweder aufwendig korrigiert oder einfach vernachlässigt (SCHNEIDER & MANAKOS 2000). Verfügbare Modelle, die die Aufnahmekonstellationen und Beleuchtungsgeometrien für jeden Zeitpunkt genau berechnen, und eine Korrektur der Bilddaten erlauben, sind zwar verfügbar (ROYER ET AL. 1985, PELLIKKA 1998, DISNEY 2002), aber noch nicht ausreichend getestet. Die richtungsabhängigen Reflexionsspektren enthalten zusätzliche Informationen, die nicht in der spektralen Signatur enthalten sind.



Die Beleuchtungsrichtung eines Objektes kann auch zur visuellen Diagnose bei Wachstumsstörungen von Pflanzen verwendet werden. SCHNUG und HANEKLAUS (1998) berichten von Wachstumsstörungen bei Raps durch Schwefelmangel, deren Effekte am besten bei transluzenter Beleuchtung der Blätter erkannt werden können.

Für die landwirtschaftliche Fernerkundung spricht GERSTL (1986) den richtungsabhängigen Komponenten den höchsten Informationsgehalt zu. Das LASSIE System kann hier ein wichtiges Hilfsmittel für die Grundlagenforschung darstellen, da beliebige Aufnahmekonstellationen realisiert werden können. Für die Interpretation des Informationsgehaltes richtungsabhängiger Reflexion ergibt sich weiterer Forschungsbedarf.

#### *Steuerelektronik des Sensors*

Die Digitalkameras sind mit einer automatischen Belichtungskontrolle (Automatic Gain Control, AGC) ausgestattet. Diese regelt zur optimalen Belichtung der Bilder die Empfindlichkeit der CCD-Chips. Im praktischen Einsatz mit LASSIE führt die AGC zu unterschiedlich stark belichteten Einzelbildern. Ein Objekt, das während der Rotation des Schwenk-/Neigekopfes in zwei Bildern aufgezeichnet wurde, kann eine unterschiedliche Radiometrie aufweisen, da die Belichtung nach der Grauwerte Verteilung aller im Bild vorkommenden Objekte bestimmt wird. Sind in einem Bild sehr helle und sehr dunkle Objekte vorhanden, wird eine mittlere Empfindlichkeit gewählt. Befinden sich einheitlich dunkle Objekte im Bild, so wird die Empfindlichkeit der Kamera erhöht, um den Dynamikbereich voll auszunutzen. Die AGC führt zu einer nicht mehr kontrollierbaren Reflexionsaufzeichnung der Objekte. In der Regel lässt sich die AGC abschalten, allerdings wird zum Schutz vor Überlastung einzelner Pixel die Empfindlichkeit des CCD-Chips bei sehr helle Flächen (z. B. Schnee) heruntergeregelt.

Für eine quantitative Auswertung der LASSIE Bilder ist eine absolute radiometrische Kalibrierung der Bilddaten erforderlich. Diese kann durch parallele Messungen im Gelände mit einem Spektrometer durchgeführt werden. Durch die spektrale Vermessung pseudo-invarianter Flächen, kann nach der Empirical Line Methode (vgl. Kapitel 3.3.2.1) eine Kalibrierung erreicht werden. Pseudo-invariante Flächen können beispielsweise Asphalt, Betonflächen oder aber speziell ausgelegte Kalibrationspanele sein, deren Reflexionsverhalten bekannt ist.

Durch eine einmalige absolute Kalibration aller Einzelbilder kann ein radiometrisch korrektes Gesamtbild erstellt werden (Masterbild). Dieses kann dann verwendet werden, um Bilddaten relativ auf das Masterbild zu kalibrieren.

Liegen die Bilddaten in kalibrierten Reflexionswerten vor, können die Techniken der Spektrometrie auf die Bilddaten angewendet werden. Diese Techniken erlauben quantitative Analysen. Konzeptionen wie die spektrale Entmischung (linear spectral unmixing) (ADAMS ET AL. 1989) erlauben die Abschätzung der Anteile von photosynthetisch aktiver und toter Biomasse innerhalb eines Pixels oder das Verhältnis zwischen Boden- und Pflanzenreflexion und damit die Ableitung des Bedeckungsgrades.

Durch die Erweiterung der Sensorik mit Kameras, die eine Empfindlichkeit im mittleren Infrarot (1300 – 2500 nm) aufweisen wird es möglich, Aussagen über den Wassergehalt der Pflanzen zu treffen (BACH ET AL. 1995). Damit kann der Feuchtegrad von Getreide bestimmt werden, der zur Festlegung des Erntetermins verwendet werden kann (BACH 1995). Die Verwendung von thermalem Infrarot (3500 – 50.000 nm) kann zur Analyse der Temperaturverhältnisse verwendet werden (BOEGH ET AL. 2000). Damit kann Wasserstress innerhalb des Bestandes erkannt und notwendige Bewässerungsmaßnahmen geplant werden. Allerdings steigt der technische Aufwand bei der Verwendung von Wellenlängen ab dem mittleren Infrarot, da hier Kühlsysteme für die Sensoren benötigt werden.

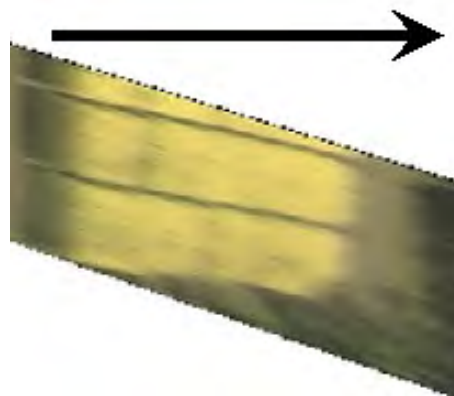
Durch den Einsatz von Kameras mit schmalbandigen Filtern können zukünftig gezielt Absorptionsbereiche untersucht werden, die Informationen über biochemische Inhaltstoffe (Proteingehalt, Stärke, Zucker) zulassen (CURRAN 1989, LILIENTHAL ET AL. 2000). Damit können aus den Bilddaten wichtige Informationen zu Düngung und Pflanzenschutzmaßnahmen abgeleitet werden. Insbesondere der Bereich der Spektrometrie und die hyperspektrale Fernerkundung (bildhafte Information aus zahlreichen schmalbandigen Wellenlängenbereichen) lässt für die Zukunft eine Fülle neuer Analysetechniken erwarten.

#### *5.4 Informationsgehalt von LASSIE Aufnahmen*

Die schräge Aufnahmegeometrie von LASSIE führt mit zunehmendem Einfallswinkel und zunehmender Entfernung der Fläche vom Mast zu einem Verlust an Information (Kap. 3.2.2). Durch den Einsatz von Teleobjektiven ist im Falle des „Südfeldes“ eine geometrische Auflösung von mindestens 0,5 m für die gesamte Fläche möglich. Störend wirkt sich dagegen

die radiale Versetzung von Objekten aus (Kap. 3.2.2). Das Höhenwachstum der Pflanzenbestände führt dazu, dass sich die Pflanzen von der Bezugsebene des Bildes entfernen und durch die zentralperspektivische Geometrie des Bildes nach der Entzerrung radial nach außen versetzt werden (Abb. 5-3).

Dieser Fehler ist nur durch eine Nachführung der Höhenwerte des DGM um den Wert der Wuchshöhe der Pflanzen möglich.



**Abb. 5-3:** Radialer Versatz durch Pflanzenwachstum. Aufnahme vom 4. Mai 2003.

Diese Nachführung ist im praktischen Einsatz nicht zu realisieren. Die geometrischen Unzulänglichkeiten der Bilddaten werden aber durch eine bessere zeitliche Auflösung und Datenverfügbarkeit im Vergleich zu den herkömmlichen Fernerkundungsdaten kompensiert.

Die tägliche Verfügbarkeit der LASSIE-Daten und die Auswertung dynamischer Karten eröffnen neue Möglichkeiten in der Bestandesführung. Die Analyse von räumlichen Phänomenen über die Zeit kann als Hilfsmittel für die Ableitung von aktuellen oder zukünftigen Bewirtschaftungsmaßnahmen herangezogen werden.

Die räumliche Abdeckung, die mit einem LASSIE-System erreicht wird, kann durch die Beobachtung von Monitorpedozellen erweitert werden. Diese erlauben es für einen Betrieb oder sogar eine ganze Landschaft repräsentative Flächen zu erfassen, die Aussagen über die unbeobachteten Flächen zulassen (HANEKLAUS ET AL. 1998, SCHNUG ET AL. 1998, HANEKLAUS ET AL. 2000, PANTEN 2002). Die Ableitung von Ähnlichkeitsflächen, basierend auf Relief, Klima, Boden oder Bearbeitungseigenschaften lässt die Modellierung von verdeckten, nicht beobachteten Flächen zu, so dass mit wenigen LASSIEs Aussagen über ganze Betriebe bis hin

zu ganzen Landschaftsbereichen möglich werden (vgl. Kap. 5.2), da die Variabilität innerhalb eines Schlages oftmals so groß wie die der Landschaft sein kann (SCHNUG ET AL. 1993).

Der Einsatz von infraroten Spektralkanälen bringt einen statistisch belegbaren Informationszugewinn, denn insbesondere in frühen phänologischen Stadien und bei geringer Vegetationsbedeckung können Pflanzen deutlich besser im infraroten als im sichtbaren Spektralkanal differenziert werden.

Die variierende Aufnahmegeometrie zwischen Objekt und Sensor, die bisher als radiometrischer Störfaktor betrachtet wurde, enthält auch ein großes Informationspotential: Die geometrisch bedingten Reflexionsunterschiede beinhalten Informationen über die erfassten Objekte, die nur spezifisch in dieser Objekt-Sensor Konstellation auftreten. Der Bedeutung des Informationsgehaltes von Fernerkundungsaufnahmen aus unterschiedlichen Aufnahmerichtungen wurde von der NASA durch den Start des *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR) an Bord des *Terra* Satelliten 1999 Rechnung getragen (CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY 2003). Derzeit handelt es sich um Grundlagenforschung, die im Bereich der *multi-angle* Fernerkundung betrieben wird, zukünftig ist auch für das LASSIE-System mit neuen Analysemöglichkeiten für die verschiedenen Aufnahmegeometrien zu rechnen.

### 5.5 Systembetrieb

Der Betrieb eines LASSIE kann aus verschiedenartigen Interessen heraus geschehen. Dabei kann die Informationsgewinnung, Nutzung und Vermarktung in unterschiedlichen Händen liegen. Im Folgenden werden drei verschiedene Betreiberkonzepte diskutiert und deren Vor- und Nachteile näher betrachtet, wobei die ökonomischen Aspekte ausgeklammert bleiben. Ihnen ist ein eigenes Kapitel (5.7) gewidmet.

#### *Installation auf einem landwirtschaftlichen Betrieb*

Die typische Anwendung ist die Errichtung eines LASSIE auf dem Gelände eines landwirtschaftlichen Betriebes. Der einzige Nutzer der Daten ist der Betriebsleiter/Landwirt selbst, die Informationen werden zur Bestandesführung und zur Dokumentation der pflanzenbaulichen Maßnahmen verwendet.

Gesetzlichen Auflagen und die Pflicht zur Dokumentation nehmen in der Landwirtschaft immer mehr zu. Zur Subventionskontrolle gegen die missbräuchliche Verwendung von EU-

Fördermitteln (InVeKoS, Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem) werden bereits operationell Fernerkundungsdaten eingesetzt. Diese Verfahren erzeugten Vorbehalte der Landwirte gegenüber einer Kontrolle durch Dritte, Stichwort: *Gläserner Landwirt*. Da der Landwirt selbst über die Nutzung und Weitergabe der Daten entscheidet, ist mit einer höheren Akzeptanz der LASSIE Technologie zu rechnen.

Als nachteilig ist der zeitliche Mehraufwand für den Landwirt zu bewerten. Der Betrieb und die Wartung des Systems ist neben der normalen Bewirtschaftungspraxis praktisch kaum zu leisten. Zudem müssen die Daten in einem Geographischen Informationssystem implementiert und analysiert werden, um eine Maßnahme auf der Basis der Bildinformation abzuleiten. In der Regel werden diese Arbeiten nicht vom Landwirt selbst durchgeführt, sondern an einen Dienstleister oder Berater übergeben.

Dabei stellt sich die Frage nach dem Automatisierungsgrad innerhalb des LASSIE-Systems. In der Phase der Prototypentwicklung wurden viele Prozessierungsschritte manuell durchgeführt, da mit unterschiedlichen Softwarelösungen gearbeitet wurde. Die Datenauswertung beinhaltet aber einen hohen Anteil von Routineabläufen, die sich automatisieren lassen. Zukünftig sind hier Softwareentwicklungen zu leisten, die alle Prozessabläufe automatisieren und vereinen, so dass der Anwender gar nicht mit der Datenprozessierung konfrontiert wird.

#### *Betrieb des Systems durch einen Dienstleister*

Wird ein LASSIE durch Dienstleister, wie Lohnunternehmer oder landwirtschaftliche Berater betrieben, wird der Landwirt zum reinen Datennutzer.

Denkbar sind hier Kompensationsgeschäfte zwischen Landwirt und Dienstleister. Der Landwirt stellt die Fläche, bzw. den Standort, sowie die Infrastruktur (Strom, Telefonanschluß) für ein LASSIE zur Verfügung und erhält als Gegenleistung die aktuelle Bildinformation vom Dienstleister. Anstatt Geld fließen Informationen an den Landwirt zurück. Die zusätzlichen Informationen (vgl. Kapitel 5.6) werden vom Dienstleister genutzt und vermarktet. Dabei sind Regelungen über den Datenschutz und die Datenweitergabe zwischen Landwirt und Dienstleister zu treffen, damit der Landwirt nicht den Eindruck bekommt, er werde fremd kontrolliert oder Konkurrenten könnten Informationen über seine Art der Bewirtschaftung erhalten.

Der Vorteil für den Landwirt besteht in der kostenneutralen Beschaffung aktueller Bilddaten seines Betriebes. Zudem braucht er sich nicht um die Technik und Wartung des Systems zu kümmern. Der Vorteil für den Dienstleister ist eine günstige Infrastruktur für das LASSIE System, sowie dem Effekt einer Kundenbindung des Landwirts. Die Bilddaten kann der Landwirt kostenlos beziehen, für Informationsprodukte und abgeleitete Managementstrategien für die Bestandesführung muss er bezahlen.

#### *Betrieb durch einen überregionalen Dienstleister*

Bisher wurde nur der Einsatz eines einzelnen LASSIE betrachtet. Deutliche Vorteile ergeben sich aber durch ein Netzwerk von LASSIEs, die überregional verteilt sind (vgl. Kapitel 5.6).

Als Betreiber eines überregionalen Verbundes von LASSIEs bieten sich aufgrund der bestehenden Infrastruktur Großunternehmen, wie Energieversorger (vgl. Kap. 5.7.2) oder die landwirtschaftliche Zulieferindustrie an. Der LASSIE Verbund wird zentral organisiert und verwaltet. Die Vermarktung der Daten kann über das Internet oder als regelmäßiges Abonnement erfolgen. Die Landwirte können von den Betreibern aktuelle Bilddaten des eigenen Betriebes, oder wenn kein LASSIE auf dem eigenen Betrieb installiert ist, die Daten des nächstgelegenen Betriebes kaufen. Werden die Bilddaten zusätzlich mit Informationen über die Fruchtart und den Aussattermin vertrieben, so kann der Landwirt Rückschlüsse auf die phänologische Entwicklungen sowie Dünge- und Spritztermine für seinen eigenen Betrieb ziehen.

Wenn für den LASSIE Verbund vorab Verträge mit ausgewählten Landwirten geschlossen werden, die regional verteilt ihre Flächen als Referenzflächen zur Verfügung stellen, können auf diese Weise regionale Empfehlungen für die Düngung und den Pflanzenschutz ausgesprochen werden. Durch eine vertragliche Regelung ist die Weitergabe der Betriebsinformationen der Referenzlandwirte geregelt, der Eindruck einer Kontrolle kann verhindert werden.

Tritt die landwirtschaftliche Zulieferindustrie als Verbundbetreiber auf, so kann zudem eine enge Kundenbindung des Landwirts erreicht werden, da direkte Empfehlungen für die Verwendung und Applikation von bestimmten Produkten ausgesprochen werden können. Die LASSIE Informationen können auch als Zugabe (Add-on) für die Produktvermarktung genutzt

werden: Wird ein bestimmtes Pflanzenschutzmittel gekauft, so liefert die Firma anhand der LASSIE Daten auch die Information über den optimalen Applikationstermin.

Die Vermarktung über die LASSIE Daten kann zur Motivation der Landwirte führen, sich selbst auch ein System zu installieren, oder installieren zu lassen. Dadurch kann der Verbund ausgebaut werden. Für den Landwirt entsteht der Vorteil, dass er über regionale Information verfügen kann, ohne selbst ein LASSIE System betreiben zu müssen. Daten kauft er nur dann, wenn er sie auch wirklich benötigt. Für den Systembetreiber ergibt sich eine neue Möglichkeit der Kundenbindung, oder wenn es sich um fachfremde Firmen wie Energieversorger handelt ergeben sich neue Absatzmärkte und Geschäftsfelder (vgl. Kapitel 5.6 und 5.7).

Zusammenfassend kann man für den Betrieb von LASSIE Verbundsystemen drei räumliche Entwürfe unterscheiden:

#### Lokaler Betrieb

Ein landwirtschaftlicher Betrieb oder eine Agrargenossenschaft betreibt ein oder mehrere LASSIEs. Der Hauptanwendungsbereich ist die Ableitung von Maßnahmen zur Bestandesführung und die Dokumentation und Erfolgskontrolle bereits durchgeführter Maßnahmen. Die räumliche Verbreitung der Systeme umfasst einen Betrieb bis hin zu einem Gemeindegebiet.

#### Regionaler Betrieb

Ein Dienstleister oder Berater betreibt mehrere LASSIEs. Insbesondere Lohnunternehmer planen aufgrund der LASSIE Informationen den Einsatz der Landmaschinen (z. B. Mähdrescher zur Erntezeit). Das Einsatzgebiet umfasst eine Region in der Größe eines Landkreises.

#### Überregionaler Betrieb

Großunternehmen, wie die landwirtschaftliche Zulieferindustrie oder Energieversorger oder staatliche Forschungseinrichtungen, betreiben ein Netz von LASSIEs. Die Informationen werden zur Ableitung überregionaler Phänomene genutzt, um Vorhersagen zu optimieren, oder zur Unterstützung der Vermarktung von landwirtschaftlichen Produktionsmitteln und zur Kundenbindung verwendet. Das Einsatzgebiet umfasst Bezirke, Bundesländer und Staaten.

## 5.6 Anwendungsfelder für LASSIE

Im Folgenden werden potentielle Anwendergruppen für den Einsatz eines LASSIE Systems vorgestellt. LASSIE liefert auch eine Vielzahl zusätzlicher (sekundärer) Information, die nicht nur spezifisch für die landwirtschaftliche Bestandesführung genutzt werden kann. Diese Daten sind auch für andere Nutzergruppen von Interesse und stellen ein wirtschaftliches Potenzial für den LASSIE Betreiber dar.

### 5.6.1 Landwirtschaftliches Versuchswesen

Ein besonders geeigneter Anwendungsbereich für LASSIE ist das landwirtschaftliche Versuchswesen. Im Gegensatz zum landwirtschaftlichen Betrieb steht hier nicht die Gewinn- und Ertragsmaximierung im Vordergrund, sondern die Untersuchung und der Vergleich von Wachstumsunterschieden unter veränderten Rahmenbedingungen.

Für das Versuchswesen sind dabei drei Kernfragen von Interesse:

1. Wo tritt ein Unterschied auf?
2. Wann tritt der Unterschied auf?
3. Wie entwickeln sich Unterschiede (insbesondere in sehr kurzen Zeitabständen, die die klassische Fernerkundung nicht auflösen kann)?

Die Unterschiede werden durch eine visuelle Bonitur, also die Feldbegehung und Bewertung von Wachstumsunterschieden und/oder Krankheitsausprägungen, erfasst. Diese gängige Arbeitsmethode verlangt viel Erfahrung vom Bewerter.

Hier liegt aber auch ein Hauptkritikpunkt von Bonituren: Die Vergleichbarkeit zwischen Bonituren, die von mehreren Bewertern durchgeführt wurden ist nicht gegeben, da es sich um ein subjektives Verfahren handelt. Neben den räumlichen Strukturen ist die zeitliche Komponente von Bedeutung. Der Zeitpunkt, wann ein Phänomen auftritt, ist sehr schwer durch Bonituren zu erfassen, die Erfahrungen des Bewerter spielen eine wichtige Rolle. Trotzdem kommt es vor, dass eine Bonitur zum falschen Zeitpunkt durchgeführt wird. Pilzbefall in Getreide wird beispielsweise zu mehreren Terminen in der Vegetationsperiode bonitiert. Das Auftreten von Pilzbefall ist aber stark von der Witterung abhängig. Wird der falsche Zeitpunkt zur Bonitur gewählt, kann es vorkommen, dass der Befall zu spät erkannt wird. Andererseits



kann es passieren, dass überhaupt kein Pilzbefall vorliegt, und der Bonitierer vergeblich angereist ist.

LASSIEs können für derartige Bonituraufgaben eingesetzt werden. Das System kann wie eine herkömmliche Kamera eingesetzt werden, und bei entsprechend ausgestatteter Optik bis zur Auflösung eines Einzelblattes zoomen. Die Bonitierergebnisse werden auf eine objektive Basis gestellt und gleichzeitig bildhaft dokumentiert. Durch den Einsatz von LASSIE wird eine Standardisierung des Bonitierverfahrens erreicht. Mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung können beispielsweise exakte, prozentuale Angaben über den Pilzbefall getroffen werden. Die Bonituren können auf der Basis von LASSIE Bilddaten geplant und auch für schlecht zugängliche Bereiche innerhalb eines Schlates durchgeführt werden.

Für Versuchsansteller, die räumlich weitverbreitete Testflächen betreiben, bietet das LASSIE System die Möglichkeit, aktuelle Informationen über den Fortgang der Versuchsreihen zu gewinnen. Beispielsweise können die regionalen phänologischen Abstände bei Versuchen mit unterschiedlichen Getreidesorten auf diese Art schnell dokumentiert werden, ohne Personal für die Bonitur zu beauftragen.

Das LASSIE System kann von staatlichen Umweltbehörden zur Kontrolle der Einhaltung von Umweltauflagen und zur Beweissicherung bei Verstößen eingesetzt werden. Da das System aber nicht flächendeckend verfügbar ist, ist mit erheblichem Widerstand betroffener Landwirte zu rechnen.

### *5.6.2 Einsatz von Produktionsmitteln in der landwirtschaftlichen Praxis*

Die einheitliche Bewirtschaftung von Feldern hat zur Folge, dass die Produktionsmittel, deren Einsatz von räumlich stark variierenden Bodenmerkmalen abhängen, bislang nicht optimal eingesetzt werden konnten (HANEKLAUS ET AL. 1999). Die räumliche Variabilität von Standortmerkmalen kann innerhalb eines einzigen Schlates größer als in der gesamten umgebenden Landschaft sein (HANEKLAUS ET AL. 1997). Gleichmäßiges, einheitliches Düngen über den heterogenen Schlag kann den Ansprüchen der Pflanzen nicht Rechnung tragen. Es führt vielmehr einerseits zu unterversorgten Bereichen, die das volle Ertragspotenzial aufgrund von Nährstoffmangel nicht erreichen, andererseits zu Regionen im Schlag, die überversorgt werden und zu ökologisch kritischen Stoffausträgern führen (HANEKLAUS & SCHNUG 2000).

Das Konzept der teilflächenspezifischen Landwirtschaft hat dagegen die Berücksichtigung homogener Untereinheiten innerhalb eines heterogenen Schlages zum Ziel. Durch den Einsatz von satellitengestützter Navigation (Global Positioning System, GPS) auf den Landmaschinen und computergesteuerter Spritz- und Streutechnik können Dünge- und Pflanzenschutzmittel positions- und mengengenau appliziert werden. Bevor eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung durchgeführt werden kann, müssen die Heterogenitäten innerhalb des Schlages in Form von geocodierten Daten erfasst werden. Die LASSIE Systeme eignen sich zur Erfassung dieser räumlichen Unterschiede. Die untersuchten Fallbeispiele (vgl. Kap. 4.3) haben gezeigt, dass sowohl natürliche, standortbedingte Heterogenitäten, als auch durch Bewirtschaftungsmaßnahmen explizit erzeugte Unterschiede erfasst werden konnten.

Nach der Identifizierung und Lokalisierung von gestressten Teilen eines Bestandes kann LASSIE zur räumlichen und zeitlichen Optimierung des Produktionsmitteleinsatzes beitragen.

Ein Identifizieren von Stresszuständen ist mit und ohne „ground truth“ möglich. Auf eine „ground truth“ kann unter Umständen verzichtet werden, wenn für den betreffenden Standort bereits Vorinformationen in einer mit LASSIE verbundenen Datenbank (z.B. LORIS, SCHRÖDER ET AL. 1997) verfügbar sind. Ein Beispiel hierfür ist, dass bei Vergleich der LASSIE Aufnahme mit einer in LORIS abgelegten Texturkarte des Beobachtungsareals in frühen Wachstumsstadien auftretende räumlich verteilte chlorotische Teilflächen in Beständen mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Schwefelmangel zurückgeführt werden kann. Ein weiteres Beispiel ist der in Abbildung 4-10 sich entwickelnde Lagerschaden in Getreide, der bei Vergleich mit der in der Datenbank verfügbaren Information über die tatsächlich applizierte Düngermenge eindeutig einer überhöhten Stickstoffversorgung zugeordnet werden kann.

Die Optimierung des Einsatzes von Produktionsmittel (Dünger, Pflanzenschutzmittel, Beregnung) beginnt ebenfalls mit der bloßen Identifizierung (z. B. NDVI) und Lokalisierung von Wachstumsunterschieden durch das LASSIE. Wird anschließend durch eine „ground truth“ oder durch Verknüpfung mit anderen in LORIS gespeicherten Informationen festgestellt, dass es sich um einen produktionstechnisch nicht beeinflussbaren Faktor (z.B. Verdichtungen o.a.) handelt, lautet die Optimierungsstrategie Limitierung des Produktionsmittelaufwandes an das dem beschränkenden Faktor maximal erreichbare Ertragsniveau.

Bei einem produktionstechnisch beeinflussbaren Faktor (z.B. Nährstoffmangel) lautet die Optimierungsstrategie „Ergänzung des Mangelfaktors“ bis auf ein für Maximalertrag erforderliches Niveau.

Es ist zukünftig zu klären, wie sensitiv LASSIE Wachstumsanomalien aufzeichnen kann. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, ob man mit LASSIE eine Information über einen bevorstehenden, noch korrigierbaren Mangel bekommt, oder ob das spektrale Signal das Resultat eines bereits irreparablen Schadens ist.

Der Einsatz von Produktionsmitteln kann auch im zeitlichen Verlauf optimiert werden. Die Terminierung von Bewirtschaftungsmaßnahmen kann anhand der tagesaktuellen LASSIE Daten geplant werden. Neben der Entscheidung wann gedüngt werden soll, liefert LASSIE Hinweise zum Einsatz von Pflanzenschutzmitteln. Unkräuter beispielsweise sind ortsgebunden und sind in der frühen Entwicklungsphase des Bestandes ein wichtiger Nährstoffkonkurrent gegenüber der Nutzpflanze. Durch eine kontinuierliche Beobachtung der Unkrautnester kann deren Entwicklung gegenüber der Nutzpflanze beurteilt werden, und gegebenenfalls durch geeignete Maßnahmen eingegriffen werden. Pilzkrankheiten sind weit verbreitet und erfordern eine häufige Bonitur der Flächen. Auch hier eignet sich die hohe zeitliche Auflösung von LASSIE zur Abschätzung des kritischen Befalls, um dann entsprechende Maßnahmen einzuleiten.

Die Information wann eine pflanzenbauliche Maßnahme am besten durchgeführt werden kann, gibt Lohnunternehmern Anhaltspunkte zur Flottenplanung. Der regionale Einsatz von Landmaschinen kann besser organisiert und abgestimmt werden. Werden mehrere LASSIE im Verbund betrieben, kann zum Beispiel bei der Kenntnis des Abreifegrades von Getreide, der vorrangige Einsatzort für Mähdrescher während der Erntezeit bestimmt werden.

Rechtliche Auflagen (§5 (4) BNatSchG, §17 (2) BBodSchG) erfordern zunehmend eine Dokumentationspflicht für die Landwirtschaft. Mit Hilfe von LASSIE kann die Bearbeitung dokumentiert und räumlich verortet werden. Ferner können aus den LASSIE Daten auch bei ständig wechselndem Zuschnitt der Schläge flächentreue Karten abgeleitet werden, die als Grundlage zur Beantragung von Ausgleichszahlungen verwendet werden können.

### 5.6.3 Nutzer außerhalb der Landwirtschaft

Die Informationen des LASSIE Systems sind nicht nur für die Landwirtschaft von Interesse, sondern auch für Nutzer anderer Wirtschaftsbereiche. Im Folgenden werden exemplarisch einige potentielle Anwender vorgestellt, ohne dabei den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Für einige Abnehmer ist ein LASSIE Verbundsystem von besonderem Interesse, für andere reicht ein einzeln stehendes LASSIE aus.

*Jagd- und Wildbeobachtung.* Landwirtschaftliche Kulturen sind auch Äsungsflächen von Wildtieren. LASSIEs ermöglichen Tierbeobachtungen für Verhaltensstudien oder auch Inventuren.

*Tourismus.* Der Einsatz von Webcams über das Internet erfährt immer mehr Zulauf. Für touristische Zwecke kann das aktuelle Wetter vor Ort oder ein erster Eindruck von der Region vermittelt werden. Durch die exponierte Lage in der Landschaft eignen sich LASSIE Systeme optimal für derartige Zwecke.

*Rückversicherer.* Die Versicherung gegen Hagelschäden ist in der Landwirtschaft eine gängige Praxis. Die Begutachtung der Schäden wird derzeit von sachkundigen Schätzern mittels Feldbegehung durchgeführt. In einem regional engmaschigen Verbund von LASSIEs können die Bewertung und die Dokumentation der Schäden optimiert werden.

*Forschung.* Mit Unterstützung eines Verbundsystems regional verteilter LASSIEs können aktuelle Referenzdaten für die Auswertung von Fernerkundungsdaten geliefert werden. Die LASSIE Daten werden als Maß für die Reflexion am Boden verwendet und können zur radiometrischen Korrektur, sowie zur Abschätzung des Atmosphäreinflusses auf die Satellitendaten verwendet werden.

*Wetterdienst.* Der Wetterdienst erfasst phänologische Daten, wie die periodisch wiederkehrenden Wachstums- und Entwicklungserscheinungen der Pflanzen. Diese charakteristischen Vegetationsstadien (z. B. die Kirschblüte) werden in Zukunft verstärkt für Trendanalysen zur Klimadiagnostik herangezogen werden, da sich die Eintrittsdaten vieler phänologischer Phasen sehr gut in Beziehung zu Temperatur-Trends setzen lassen (DWD

2003). LASSIEs eignen sich zur Erfassung phänologischer Stadien. In einem räumlichen Verbund können die regionalen Unterschiede aufgezeichnet werden.

*Polleninformationsdienst.* Ähnlich wie die Erfassung der Phänologie, können durch Erfassung der Entwicklungsstadien der Pflanzen Aussagen über die potentielle Gefahr einer Belastung der Luft durch Pollen gegeben werden. Mit Hilfe von LASSIE werden die phänologischen Daten erfasst. Diese können zur Verbesserung der Pollenflugvorhersage Verwendung finden.

### 5.7 Ökonomische Aspekte von LASSIE

Eine konkrete Abschätzung der Kosten für ein LASSIE System ist schwierig, da es sich derzeit noch um ein Experimentalsystem handelt. Vorläufig können nur die Kosten der Anlage abgeschätzt werden. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass Synergieeffekte durch bestehende Standorte und Infrastruktur (z. B. Dach eines Silos) die Kosten der Anlage reduzieren können.

Die Kosten lassen sich in drei Bereiche aufteilen:

1. Sensor und Steuerelektronik
2. Mast und Infrastruktur
3. Auswertung-/Prozessierungssoftware

*Sensor und Steuerelektronik.* Der verwendete Sensor entspricht einem sehr hohen Qualitätsstandard, da das System für Forschungsaufgaben konzipiert wurde. Für eine spätere praktische Anwendung sind Abstriche bei der Kameraqualität akzeptabel. Durch weitere Entwicklungen lässt sich das LASSIE System in Zukunft möglicherweise mit nur einer Kamera ausstatten. Zudem ist ein deutlicher Preisverfall bei CCD-Chips zu erwarten, da der Zuwachs in der Amateur-Digitalfotografie zu geringeren Produktionskosten führt.

*Mast und Infrastruktur.* Für die Entwicklung des Prototypen musste extra ein Mast auf dem Versuchsfeld installiert werden. Zudem wurde das Testgelände mit Strom und Internetanbindung ausgerüstet. In einer späteren praktischen Anwendung kann, durch eine geschickte Standortwahl (Nutzung von Synergieeffekte, siehe Kapitel 5.7.3), dieser Kostenpunkt für die Infrastruktur erheblich reduziert werden.

*Auswertung-/Prozessierungssoftware.* Die Funktionalität, die zur Auswertung der Daten benötigt wird, ist derzeit nur in professionellen Bildverarbeitungsprogrammen verfügbar. Von diesen Programmen wird jedoch nur ein Bruchteil der Softwareroutinen zur Verarbeitung der LASSIE Daten benötigt. Hier besteht ein Entwicklungsbedarf, einerseits um den Prozessierungsablauf zu automatisieren, andererseits um eine bedarfsorientierte Software zu entwickeln. Das Ziel ist eine neue Softwareentwicklung auf der Basis bestehender Routinen, die, abgestimmt auf die Steuerung des Sensorsystems, gebrauchsfertige geocodierte Bildinformationen liefert. Diese kann dann vom Landwirt direkt genutzt werden. Eine grobe Abschätzung über die Gesamtkosten ist in Tabelle 5-2 dargestellt.

**Tab. 5-2:** Geschätzte Kosten für ein operationelles LASSIE.

<i>Sensor und Steuerelektronik</i>		8.000 €	8.000 €
<i>Mast und Infrastruktur</i>	Mast inkl. Fundament	6.000 €	9.000 €
	pers. Schutzausrüstung (pro Person)	1.000 €	
	Verwaltungskosten, technische Abnahme	1.000 €	
	Fortbildungskosten, Sicherheitstraining	1.000 €	
<i>Auswertungs,- Prozessierungssoftware</i>		1.000 €	1.000 €
<b>Summe</b>			<b>18.000 €</b>

Die Kosten können im Einzelfall abweichen und sind abhängig von den lokalen Standortbedingungen.

### 5.7.1 Ökonomische Aspekte für Anwendungen im landwirtschaftlichen Versuchswesen

Die Testflächen des Versuchswesen sind oftmals räumlich weit verteilt, um einen repräsentativen Überblick über das Wachstumsverhalten in unterschiedlichen Regionen zu erhalten. Zur Beobachtung und Überprüfung der Experimente sind eine Vielzahl von Bonituren notwendig, die von geschultem Personal durchgeführt werden müssen. LASSIE bietet hier ein Potenzial zur besseren Personalplanung. Wird ein Verbund von LASSIEs eingesetzt, so können die phänologischen Unterschiede zwischen den Testflächen besser erkannt werden, und das Bonitierpersonal gezielt entsendet werden. In einigen Bereichen kann das Personal reduziert

werden, da die Bonituren direkt mit LASSIE durchgeführt werden können und eine Feldbegehung nur noch zur Probennahme notwendig ist.

Ein LASSIE Verbundsystem führt zur schnelleren Verfügbarkeit der Ergebnisse von regional weit verbreiteten Versuchen. Die Dokumentation der Versuche mit LASSIE lässt frühzeitig Fehler im Versuchsaufbau oder während der Bearbeitung erkennen. Im Extremfall können Versuche frühzeitig abgebrochen werden, beziehungsweise neu angelegt werden. Dadurch kann sich ein zeitlicher und ökonomischer Vorteil ergeben, da nicht bis zur nächsten Vegetationsperiode gewartet werden muss, um den Versuch zu wiederholen.

Der Vorteil von LASSIE ergibt sich nicht nur durch die Einzelbeobachtung von Flächen, sondern durch flächenhafte Multiplikationseffekte. Untersuchungen zur Phänologie neuer Sorten können beispielsweise mit LASSIE Aufzeichnungen begleitet werden. Wenn die Saattermine der unterschiedlichen Flächen bekannt sind, kann aus den Daten der komplette phänologische Verlauf der neuen Sorte zeitlich fortwährend dokumentiert werden. Die Ergebnisse liegen deutlich früher vor, als wenn erst alle Boniturergebnisse zusammengetragen werden müssen. Die kontinuierliche Beobachtung lässt Entwicklungen und Schäden (z. B. Lagerschäden) zeitlich genau festlegen. Die Bonituren sind immer nur eine Stichprobe innerhalb der Bestandesentwicklung.

Für das landwirtschaftliche Versuchswesen ergeben sich ökonomische Vorteile hinsichtlich der Personalkosten, sowie einer schnellen Feststellbarkeit von fehlerhaften Versuchen. Diese können vorzeitig abgebrochen werden und verursachen keine weiteren Kosten ohne verwertbare Ergebnisse zu liefern.

### *5.7.2 Ökonomische Aspekte für außerbetriebliche Nutzer*

Neben den landwirtschaftlich relevanten Daten, können zusätzlich weitere vermarktbare sekundäre Informationen aus den LASSIE Bildern abgeleitet werden (vgl. Kap. 5.6.3).

Aus technischen und ökonomischen Gründen ist der Betrieb von LASSIE, insbesondere von mehreren im Verbund, einfacher über einen Dienstleister als über den Landwirt selbst zu organisieren. Der ökonomische Vorteil vegetationsbezogener Daten ist die permanente Veränderung des Informationsgehaltes über die Vegetationsperiode. Damit liefert LASSIE ein

Produkt, das häufig neu angefordert werden muss, um den Veränderungen Rechnung zu tragen. Für den Datenanbieter lässt sich hier eine gute Kundenbindung aufbauen. Werden die Daten erst einmal im landwirtschaftlichen Produktionsprozess eingesetzt, besteht ein großer Folgebedarf an dieser Information. Hinzu kommt, dass sich das Produkt aufgrund seiner digitalen Struktur schnell vervielfältigen lässt und mehrfach an unterschiedliche Kundengruppen verkauft werden kann.

Als interessantester potentieller Anbieter von LASSIE Daten sind die Energieversorger anzusehen. Einerseits besitzen sie das notwendige Kapital, um einen größeren Flächenverbund von LASSIEs aufzubauen und zu betreiben, andererseits sind eine Vielzahl optimaler Standorte durch die Hochspannungsmasten bereits vorhanden. Diese sind weit über die Landschaft verteilt, haben eine große Höhe und stehen oft inmitten der Ackerflächen. Außerdem ist die notwendige Infrastruktur an Strom und qualifiziertem Wartungspersonal gegeben. Es ergibt sich auch ein neues Anwendungspotential für das eingestellte *Powerline* Konzept (CHIP ONLINE 2002). Die Idee von *Powerline* ist die Übertragung von Daten über die Stromnetze. Technische Probleme, insbesondere durch Überlastung bei der Nutzung durch zu viele Anwender, haben zum Aus dieser Technologie geführt. Die Nutzung von *Powerline* zur Übertragung von Daten von LASSIE, die auf Hochspannungsmasten montiert sind, wären ein interessantes Anwendungsgebiet, insbesondere da die Daten nur in eine Richtung gesendet werden müssten, eine Rückantwort zum Sensor ist in der Regel nicht notwendig.

Zwar verfügen die Energieversorger über die Technologie und Infrastruktur, ihnen fehlt aber der Zugang zum Kunden. Hier sind strategische Kooperationen zwischen der landwirtschaftliche Zulieferindustrie und den Energieversorgern denkbar. Während die Daten von den Energieversorgern prozessiert und produziert werden, könnte der Vertriebsbereich der landwirtschaftlichen Zulieferindustrie das Produkt an den Landwirt liefern.

Im regionalen Bereich ist der Betrieb eines LASSIE Verbundes über Lohnunternehmer oder durch landwirtschaftliche Genossenschaften denkbar. Der Vorteil liegt hier in der zentralen Organisation der Datenerfassung, Prozessierung und der Vermarktung, wobei die Kapitalbelastungen auf mehrere verteilt werden können.



### 5.7.3 *Ökonomische Aspekte für den betrieblichen Einsatz von Produktionsmittel und Synergieeffekte*

Der Einsatz von Düngemitteln in der Pflanzenproduktion ist, unabhängig von der Betriebsform, unerlässlich. Das Konzept der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung wird als effektives Instrument für eine bessere Düngestrategie, die einerseits Kosteneinsparung, andererseits die Umweltbelastungen minimiert und gleichzeitig die Produktivität sichert, angesehen (HANEKLAUS & SCHNUG 2002). Seit zehn Jahren ist die Idee der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung Gegenstand der Forschung, allerdings ist der Anteil der praktischen Umsetzung immer noch sehr gering. Die Ursache hierfür liegt in den hohen Investitionen, die für die technische Grundausrüstung getätigt werden müssen. Diese Kosten können nicht durch die Einsparung von Dünger oder die Erhöhung der Ernteerträge gedeckt werden, da einerseits die Preise für Düngemittel zurückgehen und andererseits die Ernteerträge nicht beliebig gesteigert werden können.

Teilflächenspezifische Düngung kann sich bei Spezialkulturen lohnen. Braugerste zum Beispiel darf nur einen geringen Proteingehalt (< 11,5 %) aufweisen. Steigt der Proteingehalt an, ist die Gerste nur noch als Futtergerste zu einem Zehntel des Preises zu vermarkten. Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass es möglich ist den Proteingehalt mit Fernerkundung abzuschätzen (CURRAN 1989, LILIENTHAL ET AL. 2000). Durch eine Modifikation des LASSIE Systems könnte in der Zukunft eine Abschätzung des Proteingehaltes aus den LASSIE Daten möglich werden. Der Landwirt könnte dann teilflächenspezifisch ernten und die proteinarmeren Partien als Braugerste, den Rest als Futtergerste vermarkten.

Lohnunternehmer können mit Hilfe eines LASSIE Verbundes ihre Flottenplanung optimieren, und unproduktive Zeiten der Fahrzeuge reduzieren.

Der Einsatz autonomer, GPS gesteuerter Landmaschinen kann zukünftig zu einem letzten Rationalisierungsschritt in der Landwirtschaft führen (HANEKLAUS & SCHNUG 2002). Damit können geräuscharme Landmaschinen 24 Stunden am Tag (auch nachts) eingesetzt werden, was zu einer deutlichen Effizienzsteigerung des Maschinenparks führen würde. Die Anweisungen für die lokalen Bearbeitungsschritte werden vorher aus den LASSIE Daten abgeleitet und später mittels LASSIE überwacht.

Der Großteil (50 %) der Kosten entsteht durch den Aufbau des Mastes und die Bereitstellung der zugehörigen Infrastruktur (Tab. 5-2). Hinzu kommen Ausbildungsgebühren

für ein Sicherheitstraining und Fortbildung für die Arbeit an hochgelegenen Arbeitsplätzen. Der Großteil der Kosten entsteht also durch die Einrichtung des Beobachtungsstandortes. Diese können durch die Nutzung bereits vorhandener Standorte erheblich minimiert werden. Hochgelegene Standorte, wie Hochspannungsmasten, Windräder oder Siloanlagen, können anstatt eines Mastneubaus genutzt werden. Die Synergieeffekte können noch erhöht werden, wenn gleichzeitig die Infrastruktur mitgenutzt wird. Strom ist in der Regel vorhanden, die Datenübertragung kann über Richtfunk, Wireless LAN zum nächsten Telefonanschluß weitergeleitet werden.

Nicht alle Informationen, die durch das LASSIE System gewonnen werden können, sind ausschließlich für den Landwirt verwertbar. Die Weitervermarktung dieser Sekundär-Information lassen die Investitionskosten amortisieren.

## 6 Zusammenfassung

Luftaufnahmen können ein effizientes Hilfsmittel für die landwirtschaftliche Bestandesführung sein. Die operationelle optische Fernerkundung ist derzeit aber nicht in der Lage, die Landwirtschaft zeitnah mit aktuellem Bildmaterial zu versorgen. Der Zeitverzug durch eine langwierige Datenprozessierung, für Kleinbetriebe ungünstige Datengrößen und das Problem der Bewölkung in Mitteleuropa haben bisher den Einsatz von Fernerkundung in der praktischen Landwirtschaft behindert und auf den Forschungsbereich reduziert.

Das innovative Konzept des bodengestützten Sensors LASSIE (Low Altitude Stationary Surveillance Instrumental Equipment) bietet die Möglichkeit, einer kontinuierlichen Datenbereitstellung für die Landwirtschaft, auch unter diffusen Beleuchtungssituationen.

In der vorliegenden methodischen Arbeit wurde das Konzept LASSIE in eine Prototypentwicklung umgesetzt. Dazu wurden zwei Sensoren eingesetzt und auf ihre Eigenschaften hin untersucht. Die Untersuchungen wurden in den Jahren 2001 bis 2003 auf dem Versuchsgelände „Südfeld“ des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft in Braunschweig durchgeführt und lieferten folgenden Ergebnisse:

1. Das Konzept LASSIE konnte in ein operationelles System umgesetzt werden, ein funktionsfähiger Prototyp wurde auf dem Versuchsgelände installiert.
2. Die mit LASSIE gewonnenen Bilddaten lassen sich mit einer hohen Genauigkeit entzerren und geocodieren. Die Lagegenauigkeit ist von der Präzision der vermessenen Kontrollpunkte im Gelände abhängig und erreichte  $\pm 1,5$  m. Das geometrische Auslösungsvermögen des LASSIE-Systems beträgt 0,5 m für das gesamte Untersuchungsgebiet, im Nahbereich konnte eine Pixelgröße von 0,1 m abgebildet werden.
3. Die radiometrische Qualität der eingesetzten 3-CCD Kamera ist deutlich besser als eine Kamera mit nur einem CCD-Chip. Das System lieferte dadurch unkomprimierte und nicht interpolierte Bilddaten ohne Artefakte. Eine absolute

radiometrische Kalibration des Kamerasystems ist mit Hilfe eines Spektroradiometers möglich.

4. Der Einsatz einer zusätzlichen Infrarot-Kamera bringt einen signifikanten Zugewinn an Information. Insbesondere in der frühen Vegetationsperiode eignet sich der infrarote Spektralkanal, um den Entwicklungsverlauf der Pflanzen zu beobachten.
5. Die Co-Registrierung einer zweiten Kamera ist technisch mit einer Genauigkeit von unter einem Pixel Abweichung zur realisieren. Die Co-Registrierung bedingt aber einen hohen zusätzlichen Arbeitsaufwand. Zudem ist ein parallel arbeitendes Kamerasystem bauartbedingt sehr störanfällig und erhöht den Wartungsaufwand.
6. Die Spektralkanäle im sichtbaren Wellenlängenbereich weisen einen hohen Grad an Redundanz (bis zu 98 %) auf. Wird die 3 CCD-Kamera so modifiziert, dass der blaue Spektralkanal, der am stärksten vom diffusen Himmelslicht beeinträchtigt wird, durch einen infraroten Kanal ersetzt wird, kann eine bessere geometrische Qualität der Bilddaten erreicht werden. Gleichzeitig entsteht ein Kostenvorteil, da das Sensorsystem nur noch eine Kamera und Optik benötigt und der Wartungsaufwand reduziert wird.
7. LASSIE eignet sich für die Zustandsbeobachtung von Pflanzenbeständen. Erfolgreich konnten Wachstumsunterschiede, die durch Düngung, Bewässerung und den Einsatz von Pflanzenschutzmittel erzeugt wurden, dokumentiert werden.
8. Mit dem System können erstmals Prozesse in Form von dynamischen Karten dokumentiert werden. Damit können räumliche Prozesse in ihrer zeitlichen Abfolge dokumentiert und erfasst werden. Die Auswertung dynamischer Karten erlaubt die Ableitung und Erfolgskontrolle von Bewirtschaftungsmaßnahmen.
9. Die mit LASSIE gewonnenen Bilddaten lassen sich als sekundäre Informationen auch außerhalb der Landwirtschaft vermarkten und bieten ein Potenzial, um die Installationskosten zu amortisieren.

## **Development of a ground based remote sensing system for agriculture**

### **Summary**

Aerial images offer an efficient tool for planning agricultural management strategies. At present, operational optical remote sensing systems are not able to supply farmers with topical image data. The time span for pre-processing, the unfavourable size of data for small farms and the severe problem of cloud coverage over central Europe hampers the use of remote sensing in practical farming and have limited its use to the research community.

The innovative concept of the ground based sensor LASSIE (Low Altitude Stationary Surveillance Instrumental Equipment) offers new possibilities of a continuous data acquisition for agricultural topics, even under diffuse radiation conditions.

In this methodical study the LASSIE concept was realized in a prototype development of a ground based system. Two different sensors were tested with regard to their properties. The research was performed from 2001 to 2003 on the test site „Südfeld“ of the Institute of Plant Nutrition and Soil Science (PB) of the Federal Agricultural Research Centre of Germany (FAL). The research yielded the following results:

1. The concept LASSIE was realized in a prototype development. An operational prototype system was installed at FAL's test site.
2. An accurate correction of several distortions and geo-coding of the imagery acquired by LASSIE can be performed. Position accuracy is highly depended on ground control points. An accuracy of  $\pm 1.5$  m was obtained by GPS measurements. The geometric accuracy of the LASSIE-System was 0.5 m for the complete test area, and in the near range 0.1 m.
3. The radiometric quality using a camera equipped with a 3-CCD is better than using a simple one chip camera. The system delivered uncompressed and un-interpolated image data without producing artefacts at image acquisition. Absolute radiometric calibration is possible using a spectroradiometer.

4. Using a camera sensitive to the infrared part of the wavelength spectrum gains significant additional information, particularly at in early growth stages, sparse vegetation can be separated from soil background.
5. A co-registration of two different cameras is possible within an accuracy of one pixel but leading to additional expenditure in pre-processing.
6. The information in the visible part of the wavelength spectrum is highly correlated (up to 98 %). A better geometric fit of the imagery can be achieved by modifying the 3-CCD camera in such way that the blue channel (affected mostly by diffuse skylight) is replaced by an infrared channel. Thus the costs decrease too, due to reduced technical effort using only one camera system.
7. With LASSIE crop parameters can be assessed during the vegetation period. For instance differences in crop growth caused by different application of fertilization, irrigation and agro chemicals can be detected by the system.
8. A completely new source of information becomes available with LASSIE. Dynamic maps showing processes in plant development can be produced using LASSIE. Spatial processes can be observed in their temporal behaviour. By analysing dynamic maps, effects of farm management strategies can be developed or evaluated.
9. The LASSIE imagery can be commercialised as secondary information for users outside agricultural business. This results in a high potential to amortize installation costs of the system.

## 7 Literatur

**Adams J B, Smith M O, Gillespie A R** (1989) Simple models for complex natural surfaces A strategy for the hyperspectral era of remote sensing. Proceedings of the IGARSS Symposium 10-14 July 1989, Vancouver, Canada pp 16-21

**Albertz J** (1991) Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 204 p, ISBN 3-534-07838-1

**Allan J D** (1990) Sensors, platforms and applications; Acquiring and managing remotely sensed data. In Steven M D, Clark J (eds) Applications of remote sensing in agriculture. Kent: Butterworths, pp 1-18, ISBN 0-408-04767-4

**Asrar G, Fuchs M, Kanemasu E T, Hatfield J L** (1984) Estimating absorbed photosynthetic Radiation and Leaf Area index from Spectral Reflectance in Wheat. Agron. J. 76, pp 300-306

**Atzberger C** (1998) Estimates of winter wheat production through remote sensing and crop growth modelling. Berlin: Verlag für Wissenschaft und Forschung 261 p, ISBN 3-89700-013-X

**Axis** (2002) What is a video server. Axis White paper. USA, zu finden in <[http://www.axis.com/documentation/whitepaper/video/video\\_server.pdf](http://www.axis.com/documentation/whitepaper/video/video_server.pdf)> [zitiert am 15.01.2003]

**Bach H** (1995) Die Bestimmung hydrologischer und landwirtschaftlicher Oberflächenparameter aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten. Münchener Geographische Abhandlungen, B21, 175 p ISBN 3-925-308-81-4

**Bach H, Demircan A, Mauser W** (1995) The use of AVIRIS data for the determination of agricultural plant developing and water content. MAC Europe'91 Final Results Workshop Proceedings, Lenggries, ESA WPP-88 pp 91-101

**Bannari A, Bonn F, Huete A, Morin D** (1995) A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews 13, pp 95-120

**Baumgardner M F, Kristof S J, Johannsen C J, Zachary A L** (1970) Effects of organic matter on multi-spectral properties of soils. Proc. Indiana Acad. Sci. 79, 413-422

**Baumgardner M F, Silva L F, Biehl L L, Stoner E R** (1985) Reflectance Properties of Soils. Advances in Agronomy 38, pp 1-44

**Baret F, Jacquemoud S** (1994) Modelling canopy spectral properties to retrieve biophysical and biochemical characteristics. In: Hill J, Mégier J (eds) Imaging spectrometry – a new tool for environmental observations. Dordrecht, Bosten, London: Kluwer, pp 145-167, ISBN 0-7923-2965-1

**Billings W D, R J Morris** (1951) Reflection of visible and infrared radiation from leaves of different ecological groups. American Journal of Botany 38:327-331

**Boegh E, Schelde K, Soegaard H** (2000) Estimating transpiration rates in a danish agricultural area using Landsat thermal mapper data. Physics and chemistry of the earth, 25, 7-8 pp 685-689

**Boissard P, Guyot G** (1994) Factors affecting the radiative temperature of a vegetation canopy. In: Steven M D, Clark J A (eds) Applications of remote sensing in agriculture. Kent: Butterworths, pp 45-72, ISBN 0-408-04767-4

**Bowers S A, Hanks R J** (1965) Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science* 100, 130-138

**Bowers S A, Smith S J** (1972) Spectrophotometric determination of soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36, 978-980

**Büchner M** (2002) Die CCD-Kamera.- In Pollmann E (2002): Einführung in die Spektroskopie für Amateure [online]. Deutschland, zu finden in <<http://www.astronomie.de/fachbereiche/spektroskopie/einfuehrung/6-2-ccd.htm>> [zitiert am 30.06.2002]

**BMVEL, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft** (2002) Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2002. Landwirtschaftsverlag Münster Hilstrup p537, ISBN 3-7843-3208-0

**California Institute of Technology** (2003) MISR Multi-angle Imaging SpectroRadiometer [online]. USA, zu finden in <<http://www-misr.jpl.nasa.gov/>> [zitiert 20.05.2003]

**Campbell J B** (1987) Introduction to remote sensing. New York: The Guilford Press, ISBN 1-572-30640-8

**Camacho-de Coca F, Gilabert M A, Meliá J** (2001) Bidirectional Reflectance Factor analysis from field radiometry and HyMAP data. In: Wooding M, Harris R A (eds) Proceedings of the Final Results Workshop on DAISEX (Digital Airborne Imaging Spectrometer EXperiment), ESA SP-499, ESA Pub, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, pp 163- 176, ISBN 92-9092-809-3

**Chip online** (2002) RWE Powerline wegen 11. September eingestellt [online]. Deutschland, zu finden in <[http://www.chip.de/news\\_stories/news\\_stories\\_8838744.html](http://www.chip.de/news_stories/news_stories_8838744.html)>, 04.09.2002 [zitiert 15.02.2003]

**Clevers J P G W** (1986) Application of remote sensing to agricultural field trials. Waageningen, Niederlande, Univ., Diss. 227 p

**Conel J E, Green R O, Bruegge C J, Alley R, Curtis B J** (1987) Airborne imaging spectrometer II; radiometric spectral characteristics and comparison of ways to compensate. *Proc. SPIE* 834 pp140-157

**Coulter L** (2001) Anisotropic Reflectance Normalization Model [online].USA, zu finden in <[http://www2.erdas.com/supportsite/downloads/models/user\\_models/user\\_model\\_1.html](http://www2.erdas.com/supportsite/downloads/models/user_models/user_model_1.html)> [zitiert 01.10.2001]

**Curran P J** (1989) Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sensing of Environment* 30 pp 271-278

**Deutsches Institut für Normung e.V.** (1997) DIN 18716-3, Photogrammetrie und Fernerkundung - Teil 3: Begriffe der Fernerkundung.

**Disney M** (2002) Improved estimation of surface biophysical parameters through inversion of linear BRDF models. London, UK, Univ. College 280 p



**DLR** (2002) DLR EOWEB - Satellite Data Information Service. A Service of the German Remote Sensing [online]. Deutschland, zu finden in <<http://eoweb.dlr.de:8080/servlets/template/welcome/entryPage.vm>> [zitiert am 15.02.03]

**Drury S A** (1991) A guide to remote sensing. Interpreting images of the earth. Oxford University press ISBN 0-198-54997-0

**DWD, Deutscher Wetterdienst** (2003) Phänologie im Deutschen Wetterdienst [online]. Deutschland, zu finden in <<http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/nkdz/fachdatenbank/datenkollektive/phaenologie/>> [zitiert am 15.02.2003]

**Elachi C** (1987) Introduction to the physics and techniques of remote sensing. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: Wiley & Sons, 413 p, ISBN 0-471-84810-7

**Eneo** (2002) Schwenk-/Neigeköpfe (Serie VPT-40/41/42) [online]. Deutschland, zu finden in <<http://www.eneo.de/pdf/db/73206dt.pdf>> [zitiert am 15.01.2003]

**Erasmí S** (2002) Analyse spektroradiometrischer in situ Messungen als Datenquelle für die teilflächenspezifische Zustandsbeschreibung von Winterweizenbeständen. Göttingen, Deutschland, Univ., Diss. 201 p

**Erdas** (1999) Field guide. Fifth edition. Atlanta USA 672 p

**Erdas** (2001) Imagine Orthobase user's guide. Atlanta USA 524 p

**Escadafal R** (1994) Soil spectral properties and their relationships with environmental parameters – Examples from arid regions. In: Hill J, Mégier J (eds) Imaging spectrometry – a new tool for environmental observations. Dordrecht, Bosten, London: Kluwer, pp71-87, ISBN 0-7923-2965-1

**Eurimage** (2003a) EiNet Service - Landsat 5 & 7 TM European archive [online]. Italien, zu finden in <[http://www.eurimage.com/einet/einet\\_home.shtml](http://www.eurimage.com/einet/einet_home.shtml)> [zitiert am 15.02.2003]

**Eurimage** (2003b) European Price List [online]. Italien, zu finden in <[http://www.eurimage.com/Products/price\\_eur.pdf](http://www.eurimage.com/Products/price_eur.pdf)> [zitiert am 15.02.2003]

**Farrand W H, Singer R B, Merenyi E** (1994) Retrieval of apparent surface reflectance from AVIRIS data: a comparison of empirical line, radiative transfer and spectral mixture methods. Remote Sensing of Environment 47 pp311-321

**Gerstl S A W, Simmer C, Powers B J** (1986) The canopy hot-spot as crop identifier. Proceedings on Remote Sensing for resources development and environmental management Enschede, August 1986 pp 261-263.

**Goel N S** (1988) Models of vegetation canopy reflectance and their use in the estimation of biophysical parameters from reflectance data. Remote sensing reviews 4 pp 1-222

**Guyot G** (1990) Optical properties of vegetation canopies. In: Steven M D, Clark J A (eds) Applications of remote sensing in agriculture. Kent: Butterworths, pp 19-43, ISBN 0-408-04767-4

**GPSworld** (2002) GPS Development Timeline [online]. USA, zu finden in <<http://www.gpsworld.com/gpsworld/static/staticHtml.jsp?id=7956>> [zitiert am 31.01.2003]

**Grenzdörffer G** (1999) Dokumentation und Analyse kleinräumiger Heterogenität mit Fernerkundung und GIS. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (ed) Erfassung kleinräumiger Heterogenität. Münster-Hiltrup, pp 93-105, ISBN 3-7843-1993-9

**Haneklaus S, Rühling I, Schröder D, Schnug E (1997)** Studies on the variability of soil and crop fertility parameters and yields in different landscapes of Northern Germany. In: Stafford J V (ed) Precision Agriculture 1997, Vol. II, Proceedings of the 1st European Conference on Precision Agriculture, Warwick, 7 –10 .9.1997. Oxford: BIOS pp 785-792, ISBN 1-85996-136-3

**Haneklaus S, Paulsen H M, Schröder D, Leopold U, Schnug E (1998)** Self-Surveying: A strategy for efficient mapping of the spatial variability of time constant soil parameters. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29 (11-14): 1593-1601

**Haneklaus S, Panten K, Schnug E (1999)** Teilflächenspezifische Pflanzenproduktion: Konzepte - Chancen - Grenzen. DLG-Wintertagung, 19.-21. Januar 1999 Berlin, 14-18

**Haneklaus S, Schnug E (2000)** Nachhaltige Landwirtschaft mittels Precision Agriculture. *Landbauforschung Völkenrode Sonderheft* 212; 171-181, ISBN 3-933140-34-X

**Haneklaus S, Schnug E (2002)** Site specific nutrient management-objectives current status and future research needs. In: Srinivasan, A (ed) Precision farming - a global perspective, in press

**Hatfield J L, Kanemasu E T, Asrar G, Jackson R D, Pinter P J Jr, Reginato R J, Idso S B (1985)** Leaf Area Estimates from Spectral Measurements Over Various Planting Dates of Wheat. *International Journal of Remote Sensing* 6, pp 167-175

**Hildebrandt G (1996)** Fernerkundung und Luftbildmessung. Wichmann, Heidelberg, ISBN 3-87907-238-8

**Hill J, Mehl W (2002)** Geo- und radiometrische Aufbereitung multi- und hyperspektraler Daten zur Erzeugung langjähriger kalibrierter Zeitreihen [online]. Deutschland, zu finden in <[http://www.feut.uni-trier.de:8080/pdf/atcpro/hill\\_radiometrie.pdf](http://www.feut.uni-trier.de:8080/pdf/atcpro/hill_radiometrie.pdf)> [zitiert am 15.02.2003]

**Jordan C F (1969)** Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50, 663-666

**Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde (2003)** Führer zu den Feld- und Gefäßversuchen 2002 [online]. Deutschland, zu finden in <<http://www.pb.fal.de/index.htm>> [zitiert am 15.01.2003]

**Irons J R, Weismiller R A, Petersen G W (1989)** Soil Reflectance. In: Asrar G (ed) Theory and Application of Optical Remote Sensing. New York: Wiley & Sons, pp 66-106, ISBN 0-471-62895-6

**Jacquemoud S, Baret F (1990)** PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment* 34, 75-91

**JAI** (2000) JAI Vision. 1. Edition 2000. Dänemark, zu finden in <[http://www.jai.dk/db\\_brochures/1.edi2002.pdf](http://www.jai.dk/db_brochures/1.edi2002.pdf)> [zitiert am 15.01.2003]

**Knipling E B** (1970) Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment* 1: 155-159

**Kraus K, Schneider W** (1988) Fernerkundung. Band 1 Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken. Bonn: Dümmler, 291 p, ISBN 3-427-78661-7

**Kraus K** (1997) Photogrammetrie. Band 1 Grundlagen und Standardverfahren. Bonn: Dümmler, 394 p, ISBN 3-427-78646-3

**Kraus K** (1996) Photogrammetrie. Band 2 Verfeinerte Methoden und Anwendungen. Bonn: Dümmler, 488 p, ISBN 3-427-78653-6

**Kruse F A, Keirin-Young K S, Broadman J W** (1990) Mineral mapping at cuprite, Nevada with a 63-channel imaging spectrometer. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 56 pp83-92

**Kühbauch W** (2002) Fernerkundung – Eine Zukunftstechnologie im Präzisionspflanzenbau. In: Werner A, Jarfe A (ed) Precision Agriculture- Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. pp 79-87, ISBN 3-9808279-0-9

**Lacaze B** (1996) Spectral characterisation of vegetation communities and practical approaches to vegetation cover changes monitoring. In: Hill J; Peter D (eds) The use of remote sensing for land degradation and desertification monitoring in the mediterranean basin - State of the art and future research. Proceedings of an experts workshop, Valencia, Spain 13-15 June 1994. Brussels, Luxembourg 1996. p 149-166, ISBN 92-827-7784-7

**Leblon B** (1997) Soil and vegetation optical properties.- In: The Remote Sensing Core Curriculum, Volume 4 Applications in Remote Sensing [online]. Canada, zu finden in <<http://umbc7.umbc.edu/~tbenja1/index.html>> [zitiert am 15.01.2003]

**LGN, Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen** (2002) ATKIS - Digitale Geländehöhenmodelle - DGM [online]. Deutschland, zu finden in <<http://www.lgn.de/>> [zitiert am 15.12.2002]

**Lilienthal H, Haneklaus, S, Schnug E, Haveresch E** (2000) Utilisation of hyperspectral data for the evaluation of the spatial variability of the nitrogen status of wheat. *Aspects of Applied Biology* 60 pp 189-194

**Lillsand T M, Kiefer R W** (1994) Remote sensing and image interpretation. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore. John Wiley & Sons, 750 p ISBN 0-471-57783-9

**Löffler E** (1985) Geographie und Fernerkundung. Teubner Studienbücher. 244 p, ISBN 3-519-03423-9

**Lucht W, Schaaf C** (2000) BRDF explained. [online]. USA, zu finden in <<http://geography.bu.edu/brdf/brdfexpl.html>> [zitiert am 20.01.2003]

**Martonchik J V** (1994) Retrieval of surface directional reflectance properties using ground level multiangle measurements. *Remote Sensing of Environment* 50, 3 pp 303-316

**Moran M S, Inoue Y, Barnes E M** (1997) Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote sensing of environment* 61 319-346

**Moran M S** (2000) New imaging sensor technologies suitable for agricultural management. *Asp Appl Biol* 60:1-10

**Mortimer E** (1987) Chemie. Stuttgart, New York: Thieme Verlag, 660 p, ISBN 3-13-484305-6

**Nicodemus F E** (1970) Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity. *Applied Optics* 9 pp 1474-1575

**Panten K, Haneklaus S, Schröder D, Schnug E** (1998) Remote Sensing as an Aid for the Spatial Management of Nutrients. *Proc. 4th Int. Conf. Prec. Agric.*, 19-22. July 1998, St. Paul, Minnesota Part A pp 1501-1511

**Panten K** (2002) Ein Beitrag zur Fernerkundung der räumlichen Variabilität von Boden- und Bestandesmerkmalen. *Landbauforschung Völkenrode Sonderheft* 232, 135 p, ISBN 3-93314-57-9

**Pearson R L, Miller L D** (1972) Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. In: *Proc. Of the 8th International symposium on Remote sensing of the Environment II*: pp 1355-1379

**Pelikka P** (1998) Development of correction chin for multispectral irborne video camer data for natural resource assessment. *Fennia* 176, 1 pp 1-110

**Pulnix** (1990) Single Chip CCD Camera Resolution vs color filters. Technical note: No. TH-1060, 09.07.1990[online]. USA, zu finden in <<http://www.pulnix.com/Imaging/TechNotes/TH-1060.pdf>> [zitiert am 10.01.2003]

**Pickup G, Chewings V H, Pearce G** (1995) Procedures for correction high resolution airborne video imagery. *International Journal of Remote Sensing* 16, 9 pp 1647-1662

**Privette J L, Eck T F, Deering D W** (1997) Estimating spectral albedo and nadir reflectance through inversion of simple BRDF model with AVHRR/MODIS-like data. *Journal of Geophysical Research* 102, 24 pp 29529-29542

**Ray T W** (1994) A FAQ on vegetation in remote sensing [online]. USA, zu finden in <<http://www.yale.edu/ceo/Documentation/rsvefaq.html>> [zitiert am 20.01.2003]

**Richards J A** (1994) Remote sensing digital image analysis: An introduction. Berlin: Springer-Verlag, 340 p, ISBN 3-540-58219-3

**Richardson A J, Everitt J H, Escobar D E** (1994) Reflectance calibration of aerial video imagery with automatic gain compensation on and off. *International Journal of Remote Sensing* 14, 15 pp 2791-2801

**Roberts D A, Yamaguchi Y, Lyon R J P** (1985) Calibration of airborne imaging spectrometer data to percent reflectance using field spectral measurements - Proc. 19th International Symposium of remote sensing of environment, Ann Arbor, Michigan Usa, 21-25 Oct

**Rogasik J, Panten K, Schroetter S, Schnug E** (2002) Relations between soil fertility and plant yield influencing variable rate fertilization. In: Proceeding of the International Conference on Long-term Experiments, Sustainable Agriculture and Rural Development, June 6-8, 2002 in Debrecen, Hungary, Vol. 1, 65-70 ISBN 963-472-654-2 (963-472-655-0)

**Rouse J W, Haas R H, Schell J A, Deering D W, Harlan J C** (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md. p 371

**Royer A, Vincent P, Bonn F** (1985) Evaluation and correction of viewing angle effects on satellite measurements of bidirectional reflectance. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 51, 12 pp 1899-1914

**Selige T** (2002) Multispektrale Fernerkundung von Bodeneigenschaften und Aufwuchszuständen. In: Werner A, Jarfe A (ed) Precision Agriculture- Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. pp 117-127, ISBN 3-9808279-0-9

**Schellberg J** (1990) Die spektrale Reflexion von Weizen. Ein Beitrag zur Zustandsbeschreibung landwirtschaftlicher Kulturpflanzenbestände durch Fernerkundung. Bonn, Univ., Diss. 160 p

**Schmidt G, Kücke M, Helal H M** (1996) Führer zu den Feld- und Gefäßversuchen. Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde (FAL) 61 p

**Schneider T, Manakos I** (2000) Anisotropie der Rückstrahlung - Störfaktor oder Informationsquelle? Erörterung anhand des Beispiels "precision farming". In: Berichte der GIL. 13, pp 187-190 Berlin/Weihenstephan

**Schnug E, Murphy D P L, Haneklaus S, Evans E** (1993) Local resource management in computer-aided farming: A new approach for sustainable agriculture. - In: Fragoso M A C, Beusichem M L van (ed) Optimization of plant nutrition. Pp 657-663

**Schnug E, Panten K, Haneklaus S** (1998) Soil sampling and nutrient recommendations – the future. Commun. Soil Sci. Plant anal. 29 (11-14): 1455 - 1462

**Schnug E, Haneklaus S** (1998) Diagnosis of sulphur nutrition. In Schnug E, Beringer H (ed.) Sulphur in Agro-Ecosystems. Vol. 2 Kluwer Academic Publ. Dordrecht 1-38

**Schnug E, Haneklaus S, Lilienthal H, Panten K** (2000) LASSIE : An innovative approach for the continuous remote sensing of crops. Asp Appl Biol 60:147-153

**Schröder D, Haneklaus S, Schnug E** (1997) Information management in precision agriculture with LORIS.- Precision Agriculture 1997, Vol. II pp 821-826. IN: Stafford J V (ed) BIOS Scientific Publishers Ltd., UK

**Schröder D** (1999) Strategien zur Erfassung der kleinräumigen Heterogenität. In: Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, KTBL/ATB-Workshop 15.-16. Januar 1998 in Potsdam. Münster: KTBL pp 47-52 ISBN 3-7843-1993-9

**Sellers P** (1985) Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing* 6, 8 pp 1335-1375

**Spotimage** (2003) Sirius – The spot image online catalogue [online]. Frankreich, zu finden in < <http://sirius.spotimage.fr/>> [zitiert am 15.02.2003]

**Sony** (1999) ICX207AK Diagonal 4.5 mm (Type ¼) CCD Image Sensor for PAL Color Video Cameras. USA, zu finden in <<http://products.sel.sony.com/semi/PDF/ICX207AK.pdf>> [zitiert am 10.01.2003]

**Stadt Braunschweig** (2002) Umweltatlas Braunschweig. Schriftenreihe kommunaler Umweltschutz Heft 7, lose Blattsammlung

**Tucker C J** (1979) Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8, pp127-150

**USGS** (2003): Global Visualization Viewer [online]. USA, zu finden in < <http://glovis.usgs.gov/>> [zitiert am 15.02.2003]

**Verdebut J, Jacquemoud, Schmuck G** (1994) Optical properties of leaves: Modeling and experimental studies. In: Hill J, Mégier J (eds) *Imaging spectrometry – a new tool for environmental observations*. Dordrecht, Bosten, London: Kluwer, pp 169-193, ISBN 0-7923-2965-1

**Wagner G** (1970) *Infrarot-Fotographie*. Stuttgart.

**Wanjura D F, Hatfield J L** (1987) Sensitivity of Spectral Vegetation Indices to Crop Biomass. *Trans. ASAC*. 30, pp 810-816

**Wiegand CL, Richardson AJ, Kanemasu E T** (1979) Leaf area index estimates for wheat from LANDSAT and their implications for evapotranspiration and crop modeling. *Agronomy Journal* 71, pp 336-342

**Wiegand C L, Maas S J, Aase J K, Hatfield J L, Pinter P J Jr, Jackson R D, Kanemasu E T, Lapitan R L** (1992) Multisite analysis of spectral-biophysical data for wheat. *Remote Sensing of Environment* 42, pp 1-21

**Wolf P R, Dewitt B A** (2000) *Elements of photogrammetry with applications in GIS*. Bosten USA: McGraw Hill 608 p ISBN 0-07-292454-3

**Woolley J T** (1971) Reflectance and transmittance of light by leaves. *Plant Physiol.* 47; 656-662

## 8 Anhang

**Tab. A-1:** Kalibrierparameter aller verwendeter LASSIE Aufnahmen.

Datum	Uhrzeit	X0	Y0	Z0	RMS X	RMS Y	RMS Z	f [mm]	Omega [°]	Phi [°]	Kappa [°]	RMS ges.
10.06.02	13:01:12	3597862,22	5795867,55	110,06	0,41	0,78	0,80	4	84,35	24,62	6,78	0,02
13.06.02	13:59:22	3597862,22	5795867,55	110,06	0,41	0,78	0,80	4	84,35	24,62	6,78	0,02
15.06.02	13:01:40	3597862,22	5795867,55	110,06	0,41	0,78	0,80	4	84,35	24,62	6,78	0,02
19.06.02	12:00:20	3597849,30	5795877,44	101,81	0,36	0,33	0,25	4	85,49	24,51	6,06	0,01
24.06.02	13:01:30	3597850,35	5795876,37	103,65	0,49	0,31	0,27	4	82,01	21,43	7,33	0,01
28.06.02	13:01:30	3597850,35	5795876,37	103,65	0,27	0,31	0,49	4	82,01	21,43	7,33	0,01
03.07.02	11:59:19	3597850,14	5795876,51	103,59	0,52	0,34	0,29	4	82,02	21,62	7,33	0,01
06.07.02	13:00:01	3597850,07	5795876,38	103,72	0,52	0,36	0,22	4	81,94	21,39	7,65	0,01
24.03.03	12:04:55	3597850,71	5795874,29	103,58	0,87	0,19	0,23	8	80,87	1,25	3,72	0,14
24.04.03	12:07:55	3597849,45	5795877,39	102,00	0,02	0,36	0,72	120	74,03	77,48	17,67	0,09
25.04.03	12:07:55	3597849,45	5795877,39	102,00	0,02	0,36	0,72	120	74,03	77,48	17,67	0,09
26.04.03	15:07:55	3597849,45	5795877,39	102,00	0,03	0,48	0,72	120	73,40	77,47	18,57	0,10
28.04.03	12:04:55	3597851,12	5795873,22	104,34	0,28	0,17	0,59	8	82,00	1,36	5,24	0,04
04.05.03	12:07:40	3597849,45	5795877,39	102,00	0,07	0,21	0,12	120	81,44	70,31	11,15	0,01
05.05.03	12:04:56	3597851,49	5795871,75	105,67	0,71	0,15	0,42	8	81,26	1,91	5,24	0,02
09.05.03	13:08:24	3597849,45	5795877,39	102,00	0,08	0,44	0,22	120	79,26	78,01	12,08	0,01
12.05.03	12:04:55	3597851,40	5795871,31	105,87	0,46	0,14	0,36	8	81,56	1,36	5,36	0,02
19.05.03	12:04:54	3597849,45	5795877,39	107,37	0,42	0,16	0,31	8	80,96	0,98	5,42	0,02
25.05.03	12:05:10	3597846,89	5795874,64	101,48	0,75	0,21	0,68	8	82,27	-15,94	3,84	0,01
27.05.03	13:05:11	3597849,45	5795877,39	107,79	0,43	0,16	0,34	8	80,64	1,52	5,35	0,02

## Protokoll zur Entzerrung der Aufnahmen vom 10., 13., und 15.06.2002

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 2

Point ID	x	y
1	566.875	119.125
4	610.000	93.000
5	148.875	208.625
6	211.625	256.125
7	190.875	287.875
8	283.125	364.375
13	330.000	345.000
14	386.000	321.000
15	443.000	304.000
16	491.000	291.000
17	537.000	272.000
18	578.000	260.000
19	614.000	247.000
21	649.000	235.000

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-1.8208	0.005180	0.000000	1.3685	-0.000000	-0.004760

### THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

the no. of iteration =1 the standard error = 0.0168  
 the maximal correction of the object points = 1.19267  
 the no. of iteration =2 the standard error = 0.0168  
 the maximal correction of the object points = 0.05391  
 the no. of iteration =3 the standard error = 0.0168  
 the maximal correction of the object points = 0.00047

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
2	3597862.2181	5795867.5534	116.7407	84.3497	24.6182	6.7799

The residuals of exterior orientation parameters

image ID	rXs	rYs	rZs	rOMEGA	rPHI	rKAPPA
2	12.7681	-9.8376	14.7407	-0.0000	-0.0000	0.0000

The accuracy of the exterior orientation parameters

image ID	mXs	mYs	mZs	mOMEGA	mPHI	mKAPPA
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.5275	0.4532	0.8742

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
2	4.0000	1.8250	1.3700



## The residuals of the control points

Point ID	rX	rY	rZ
1	-0.6194	-0.7231	-0.8100
4	-0.1811	-0.2423	-0.4088
5	0.0148	-1.1039	-1.1969
6	-0.0173	-0.6927	-0.7002
7	-0.2118	-0.7381	-0.3999
8	0.5727	0.4788	-0.1959
13	-0.2526	-0.7808	-0.5241
14	-0.7741	-1.1716	-0.5045
15	-0.4117	-1.0094	-0.8609
16	-0.4245	-1.1057	-1.1172
17	-0.3816	-0.8671	-0.9623
18	0.1418	-0.4995	-0.9788
19	0.1810	-0.4129	-0.9227
21	0.6393	-0.1242	-0.8286

aX	aY	aZ
-0.1232	-0.6423	-0.7436
mX	mY	mZ
0.4149	0.7776	0.7966

## The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap
1	3597801.5631	5795961.4912	79.2697	1
4	3597798.5564	5795977.7726	79.6021	1
5	3597794.8270	5795907.5200	79.0444	1
6	3597805.4943	5795906.5321	79.5766	1
7	3597808.9932	5795902.7834	79.9090	1
8	3597821.0492	5795901.8562	80.2238	1
13	3597821.0165	5795905.6630	79.8215	1
14	3597821.5140	5795910.3387	79.8327	1
15	3597822.4425	5795915.5674	79.4706	1
16	3597823.5620	5795920.3173	79.2108	1
17	3597824.5107	5795925.6224	79.3723	1
18	3597825.8267	5795930.5058	79.3463	1
19	3597826.8849	5795935.5487	79.3853	1
21	3597828.1358	5795940.7936	79.4646	1

The total object points = 14

\*\*\*\*\*

## Protokoll zur Entzerrung der Aufnahme vom 19.06.2002

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 2

Point ID	x	y
1	561.375	135.625
2	531.625	127.125
3	623.000	122.000
4	604.125	111.375
5	196.625	280.875
6	134.000	229.000
7	637.625	127.125
8	176.125	300.625
9	267.875	388.875
10	307.125	418.125
11	462.000	557.000
12	569.000	276.000

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-1.8208	0.005180	0.000000	1.3685	0.000000	-0.004760

### THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

the no. of iteration =1 the standard error = 0.0103  
 the maximal correction of the object points = 0.74092  
 the no. of iteration =2 the standard error = 0.0103  
 the maximal correction of the object points = 0.00580  
 the no. of iteration =3 the standard error = 0.0103  
 the maximal correction of the object points = 0.00003

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
2	3597849.3002	5795877.4353	101.8067	85.4942	24.5104	6.0556

The residuals of exterior orientation parameters

image ID	rXs	rYs	rZs	rOMEGA	rPHI	rKAPPA
2	-0.1498	0.0443	-0.1933	0.0000	-0.0000	-0.0000

The accuracy of the exterior orientation parameters

image ID	mXs	mYs	mZs	mOMEGA	mPHI	mKAPPA
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.3288	0.2470	0.6881

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
2	4.0000	1.8250	1.3700

## The residuals of the control points

Point ID	rX	rY	rZ
1	0.2100	0.0429	-0.3397
2	-0.3305	-0.3602	-0.3862
3	-0.7466	-0.4960	-0.2483
4	0.1818	0.1114	0.0007
5	0.0489	-0.1858	-0.3604
6	-0.2296	-0.4962	-0.1242
7	-0.4600	-0.3547	-0.3822
8	-0.0787	-0.1991	-0.0890
9	-0.2426	-0.2407	0.0983
10	-0.0801	-0.3599	-0.2915
11	0.0662	-0.0275	-0.0832
12	-0.6768	-0.5577	-0.2246

aX	aY	aZ
-0.1948	-0.2603	-0.2025
mX	mY	mZ
0.3588	0.3336	0.2545

## The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap
1	3597798.6102	5795951.2102	79.7999	1
2	3597793.6009	5795952.2133	79.7358	1
3	3597800.6536	5795961.6713	79.8294	1
4	3597796.3320	5795964.0286	80.0552	1
5	3597801.9490	5795907.4814	79.8940	1
6	3597791.4518	5795909.6398	80.0858	1
7	3597803.0965	5795961.1563	79.7055	1
8	3597804.0715	5795904.9682	80.1861	1
9	3597816.4388	5795901.8328	80.4285	1
10	3597819.3513	5795901.7136	80.0544	1
11	3597831.2164	5795898.8897	80.3181	1
12	3597820.7234	5795920.8595	80.0924	1

The total object points = 12

\*\*\*\*\*

**Protokoll zur Entzerrung der Aufnahme vom 24.06.2002**

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 1

Point ID	x	y
1	521.000	96.000
2	484.000	86.000
3	582.125	79.375
4	560.125	72.125
5	162.625	244.625
6	99.000	197.000
7	596.375	86.375
8	142.000	268.000
9	238.000	346.000
10	274.000	373.000
11	429.000	514.000
12	530.000	233.000
13	421.375	183.625
14	606.000	207.000
15	492.000	163.000
16	579.000	139.000
17	487.000	75.000
18	560.000	63.000
19	484.000	101.000
20	464.125	85.875

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-1.8208	0.005180	0.000000	1.3685	0.000000	-0.004760

THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

the no. of iteration =1 the standard error = 0.0124  
 the maximal correction of the object points = 1.16402  
 the no. of iteration =2 the standard error = 0.0124  
 the maximal correction of the object points = 0.01288  
 the no. of iteration =3 the standard error = 0.0124  
 the maximal correction of the object points = 0.00002

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
1	3597850.3467	5795876.3660	103.6473	82.0094	21.4307	7.3349

The residuals of exterior orientation parameters

image ID	rXs	rYs	rZs	rOMEGA	rPHI	rKAPPA
1	0.8967	-1.0250	1.6473	-0.0000	0.0000	-0.0000

The accuracy of the exterior orientation parameters

image ID	mXs	mYs	mZs	mOMEGA	mPHI	mKAPPA
----------	-----	-----	-----	--------	------	--------

1 0.0000 0.0000 0.0000 0.2978 0.2526 0.6294

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
1	4.0000	1.8250	1.3700

The residuals of the control points

Point ID	rX	rY	rZ
1	0.0691	-0.0180	-0.2077
2	-1.1746	-0.9272	-0.0911
3	-0.9498	-0.5323	0.0854
4	-0.3312	-0.2290	-0.0818
5	-0.0297	-0.0102	0.0479
6	-0.1492	-0.2025	0.0846
7	-0.6447	-0.4384	-0.2749
8	-0.1486	-0.1101	0.1606
9	-0.4281	-0.0650	0.5684
10	-0.3675	-0.2918	0.1765
11	0.1086	-0.0689	-0.1548
12	-0.7624	-0.4163	0.1757
13	-0.4556	-0.2676	0.2783
14	-0.2302	0.0317	0.3427
15	-0.4979	-0.2482	0.2855
16	-0.6616	-0.2498	0.3800
17	0.0487	0.1247	0.2960
18	0.1249	0.1500	0.2784
19	-0.0536	0.1164	0.4680
20	0.0434	0.1342	0.3103
	aX	aY	aZ
	-0.3245	-0.1759	0.1564
	mX	mY	mZ
	0.4867	0.3142	0.2726

The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap
1	3597798.4692	5795951.1493	79.9319	1
2	3597792.7568	5795951.6463	80.0309	1
3	3597800.4504	5795961.6350	80.1631	1
4	3597795.8190	5795963.6883	79.9728	1
5	3597801.8705	5795907.6570	80.3023	1
6	3597791.5323	5795909.9335	80.2947	1
7	3597802.9117	5795961.0726	79.8128	1
8	3597804.0016	5795905.0572	80.4357	1
9	3597816.2533	5795902.0086	80.8986	1
10	3597819.0639	5795901.7817	80.5223	1
11	3597831.2588	5795898.8483	80.2466	1
12	3597820.6378	5795921.0010	80.4927	1
13	3597808.4446	5795923.6496	80.5238	1
14	3597823.1700	5795927.4489	80.6738	1
15	3597810.1210	5795930.4503	80.5191	1
16	3597812.9574	5795940.2612	80.5596	1
17	3597790.6945	5795954.8588	80.3904	1

18	3597793.7707	5795966.8216	80.2986	1
19	3597798.0297	5795944.8506	80.6150	1
20	3597791.9392	5795948.9933	80.4206	1

The total object points = 20

\*\*\*\*\*

## Protokoll zur Entzerrung der Aufnahme vom 28.06.2002

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 1

Point ID	x	y
1	521.000	96.000
2	484.000	86.000
3	582.125	79.375
4	560.125	72.125
5	162.625	244.625
6	99.000	197.000
7	596.375	86.375
8	142.000	268.000
9	238.000	346.000
10	274.000	373.000
11	429.000	514.000
12	530.000	233.000
13	421.375	183.625
14	606.000	207.000
15	492.000	163.000
16	579.000	139.000
17	487.000	75.000
18	560.000	63.000
19	484.000	101.000
20	464.125	85.875

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-1.8208	0.005180	0.000000	1.3685	0.000000	-0.004760

### THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

the no. of iteration =1 the standard error = 0.0124  
 the maximal correction of the object points = 1.16402  
 the no. of iteration =2 the standard error = 0.0124  
 the maximal correction of the object points = 0.01289  
 the no. of iteration =3 the standard error = 0.0124  
 the maximal correction of the object points = 0.00001

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
1	3597850.3467	5795876.3660	103.6473	82.0094	21.4307	7.3349

The residuals of exterior orientation parameters

image ID	rXs	rYs	rZs	rOMEGA	rPHI	rKAPPA
1	0.8967	-1.0250	1.6473	-0.0000	-0.0000	-0.0000

The accuracy of the exterior orientation parameters

image ID	mXs	mYs	mZs	mOMEGA	mPHI	mKAPPA
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.2978	0.2526	0.6294

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
1	4.0000	1.8250	1.3700

The residuals of the control points

Point ID	rX	rY	rZ
1	0.0691	-0.0179	-0.2077
2	-1.1746	-0.9272	-0.0911
3	-0.9498	-0.5323	0.0854
4	-0.3312	-0.2290	-0.0818
5	-0.0297	-0.0102	0.0479
6	-0.1492	-0.2025	0.0846
7	-0.6447	-0.4384	-0.2749
8	-0.1486	-0.1101	0.1606
9	-0.4281	-0.0649	0.5684
10	-0.3675	-0.2918	0.1765
11	0.1086	-0.0689	-0.1548
12	-0.7624	-0.4163	0.1757
13	-0.4556	-0.2676	0.2783
14	-0.2302	0.0317	0.3427
15	-0.4979	-0.2482	0.2855
16	-0.6616	-0.2498	0.3800
17	0.0487	0.1247	0.2960
18	0.1249	0.1500	0.2784
19	-0.0536	0.1164	0.4680
20	0.0434	0.1342	0.3103
	aX	aY	aZ
	-0.3245	-0.1759	0.1564
	mX	mY	mZ
	0.4867	0.3142	0.2726

The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap
1	3597798.4692	5795951.1493	79.9319	1
2	3597792.7568	5795951.6463	80.0309	1
3	3597800.4504	5795961.6350	80.1631	1
4	3597795.8190	5795963.6883	79.9727	1
5	3597801.8705	5795907.6570	80.3023	1
6	3597791.5323	5795909.9335	80.2947	1
7	3597802.9117	5795961.0726	79.8128	1
8	3597804.0016	5795905.0572	80.4357	1
9	3597816.2533	5795902.0086	80.8986	1
10	3597819.0639	5795901.7817	80.5223	1
11	3597831.2588	5795898.8483	80.2466	1
12	3597820.6378	5795921.0010	80.4927	1
13	3597808.4446	5795923.6496	80.5238	1
14	3597823.1700	5795927.4489	80.6738	1
15	3597810.1210	5795930.4503	80.5191	1
16	3597812.9574	5795940.2612	80.5596	1
17	3597790.6945	5795954.8588	80.3904	1



18	3597793.7707	5795966.8216	80.2986	1
19	3597798.0297	5795944.8506	80.6150	1
20	3597791.9392	5795948.9933	80.4206	1

The total object points = 20

\*\*\*\*\*

**Protokoll zur Entzerrung der Aufnahme vom 03.07.2002**

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 1

Point ID	x	y
1	524.875	94.375
2	486.625	87.625
3	584.125	79.875
4	569.625	71.125
5	165.375	238.625
6	100.875	197.625
7	600.125	85.125
8	144.625	271.125
9	243.375	348.375
10	277.375	373.625
11	432.375	515.125
12	531.375	234.875
13	422.125	184.375
14	607.125	207.625
15	496.000	164.000
16	589.875	139.625
17	488.625	75.375
18	561.125	62.625
19	483.875	100.375
20	465.625	86.125

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-1.8208	0.005180	0.000000	1.3685	0.000000	-0.004760

THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

the no. of iteration =1 the standard error = 0.0131  
 the maximal correction of the object points = 1.20171  
 the no. of iteration =2 the standard error = 0.0131  
 the maximal correction of the object points = 0.01531  
 the no. of iteration =3 the standard error = 0.0131  
 the maximal correction of the object points = 0.00002

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
1	3597850.1414	5795876.5100	103.5892	82.0174	21.6174	7.3318

The residuals of exterior orientation parameters

image ID	rXs	rYs	rZs	rOMEGA	rPHI	rKAPPA
1	0.6914	-0.8810	1.5892	-0.1564	-0.0110	0.0755

The accuracy of the exterior orientation parameters

image ID	mXs	mYs	mZs	mOMEGA	mPHI	mKAPPA
----------	-----	-----	-----	--------	------	--------

1 0.0000 0.0000 0.0000 0.3139 0.2652 0.6588

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
1	4.0000	1.8250	1.3700

The residuals of the control points

Point ID	rX	rY	rZ
1	0.0770	0.0556	0.0076
2	-1.2145	-0.9993	-0.2226
3	-1.0964	-0.6233	0.0701
4	0.3313	0.2340	0.1166
5	-0.1672	0.0414	0.4093
6	-0.1959	-0.2826	0.0887
7	-0.6387	-0.3792	-0.0819
8	-0.1303	-0.1684	0.0521
9	-0.3572	-0.0155	0.5136
10	-0.3884	-0.2847	0.2121
11	0.0532	-0.0608	-0.1016
12	-0.8906	-0.5302	0.1236
13	-0.6119	-0.4075	0.2799
14	-0.4249	-0.0686	0.3517
15	-0.4623	-0.2331	0.2556
16	-0.0587	0.1090	0.3970
17	-0.1122	0.0019	0.2946
18	-0.1377	0.0068	0.3625
19	-0.3674	-0.0918	0.5687
20	-0.1195	0.0075	0.3248
	aX	aY	aZ
	-0.3456	-0.1844	0.2011
	mX	mY	mZ
	0.5153	0.3399	0.2881

The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap
1	3597798.4772	5795951.2229	80.1471	1
2	3597792.7170	5795951.5742	79.8994	1
3	3597800.3038	5795961.5440	80.1478	1
4	3597796.4815	5795964.1513	80.1712	1
5	3597801.7330	5795907.7086	80.6637	1
6	3597791.4855	5795909.8534	80.2987	1
7	3597802.9178	5795961.1318	80.0058	1
8	3597804.0199	5795904.9989	80.3272	1
9	3597816.3243	5795902.0580	80.8438	1
10	3597819.0430	5795901.7888	80.5579	1
11	3597831.2034	5795898.8565	80.2998	1
12	3597820.5096	5795920.8870	80.4405	1
13	3597808.2883	5795923.5097	80.5254	1
14	3597822.9753	5795927.3487	80.6828	1
15	3597810.1567	5795930.4654	80.4892	1
16	3597813.5602	5795940.6200	80.5766	1
17	3597790.5336	5795954.7360	80.3890	1
18	3597793.5081	5795966.6785	80.3828	1

19	3597797.7159	5795944.6424	80.7157	1
20	3597791.7763	5795948.8667	80.4351	1

The total object points = 20

\*\*\*\*\*

## Protokoll zur Entzerrung der Aufnahme vom 06.07.2002

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 2

Point ID	x	y
1	520.000	96.000
2	485.375	87.875
3	580.375	79.125
4	568.375	69.875
5	156.375	240.375
6	101.625	196.125
7	595.125	85.125
8	142.875	270.625
9	240.375	348.375
10	275.125	374.625
11	431.125	515.125
12	531.125	236.625
13	419.875	184.875
14	605.125	208.875
15	494.125	164.625
16	585.625	141.625
17	486.625	75.125
18	558.875	62.875
19	481.375	100.375
20	464.125	85.875

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-1.8208	0.005180	0.000000	1.3685	0.000000	-0.004760

### THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

the no. of iteration =1 the standard error = 0.0133  
 the maximal correction of the object points = 1.21889  
 the no. of iteration =2 the standard error = 0.0133  
 the maximal correction of the object points = 0.01540  
 the no. of iteration =3 the standard error = 0.0133  
 the maximal correction of the object points = 0.00003

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
2	3597850.0740	5795876.3818	103.7175	81.9419	21.3900	7.6486

The residuals of exterior orientation parameters

image ID	rXs	rYs	rZs	rOMEGA	rPHI	rKAPPA
2	0.6240	-1.0092	1.7175	-0.0000	0.0000	-0.0000

The accuracy of the exterior orientation parameters

image ID	mXs	mYs	mZs	mOMEGA	mPHI	mKAPPA
----------	-----	-----	-----	--------	------	--------

2 0.0000 0.0000 0.0000 0.3204 0.2706 0.6745

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
2	4.0000	1.8250	1.3700

The residuals of the control points

Point ID	rX	rY	rZ
1	-0.0952	-0.1648	-0.3083
2	-1.0713	-0.9475	-0.4163
3	-1.2334	-0.7185	0.0185
4	0.4624	0.3149	0.1251
5	-0.3000	-0.2852	0.2456
6	-0.0669	-0.1306	-0.0204
7	-0.8969	-0.5635	-0.2152
8	-0.0804	-0.1652	-0.0438
9	-0.3607	-0.0703	0.4522
10	-0.3568	-0.3285	0.1174
11	0.0897	-0.0660	-0.1352
12	-0.7298	-0.4986	-0.0319
13	-0.5752	-0.4376	0.1459
14	-0.3681	-0.0902	0.2314
15	-0.3992	-0.2435	0.1174
16	-0.1619	-0.0389	0.1468
17	-0.0463	0.0084	0.1453
18	-0.0877	-0.0104	0.1709
19	-0.3506	-0.1254	0.4233
20	-0.0127	0.0476	0.1790
	aX	aY	aZ
	-0.3321	-0.2257	0.0674
	mX	mY	mZ
	0.5187	0.3625	0.2239

The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap
1	3597798.3050	5795951.0025	79.8312	1
2	3597792.8601	5795951.6260	79.7057	1
3	3597800.1668	5795961.4488	80.0962	1
4	3597796.6126	5795964.2322	80.1796	1
5	3597801.6002	5795907.3821	80.4999	1
6	3597791.6145	5795910.0054	80.1897	1
7	3597802.6596	5795960.9475	79.8725	1
8	3597804.0698	5795905.0021	80.2313	1
9	3597816.3208	5795902.0032	80.7824	1
10	3597819.0746	5795901.7450	80.4632	1
11	3597831.2398	5795898.8513	80.2662	1
12	3597820.6703	5795920.9186	80.2851	1
13	3597808.3250	5795923.4797	80.3915	1
14	3597823.0321	5795927.3270	80.5625	1
15	3597810.2197	5795930.4550	80.3510	1
16	3597813.4570	5795940.4721	80.3264	1
17	3597790.5995	5795954.7425	80.2397	1

18	3597793.5581	5795966.6612	80.1911	1
19	3597797.7327	5795944.6088	80.5702	1
20	3597791.8831	5795948.9068	80.2893	1

The total object points = 20

\*\*\*\*\*

**Protokoll zur Entzerrung der Aufnahme vom 24.03.2003**

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 1

Point ID	x	y
1	182.000	141.000
2	107.875	55.875
3	8.000	49.000
4	239.000	56.000
5	29.125	333.875
6	433.000	500.000
7	460.000	339.000
8	458.375	121.125
9	448.000	79.000
10	544.000	56.000

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-2.2848	0.006500	0.000000	1.7969	0.000000	-0.006250

#### THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

the no. of iteration =1    the standard error = 0.0167  
the maximal correction of the object points = 0.97816  
the no. of iteration =2    the standard error = 0.0167  
the maximal correction of the object points = 0.02073  
the no. of iteration =3    the standard error = 0.0167  
the maximal correction of the object points = 0.00038

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
1	3597845.9440	5795871.1397	104.6024	80.9108	-23.6411	3.0973

The residuals of exterior orientation parameters

image ID	rXs	rYs	rZs	rOMEGA	rPHI	rKAPPA
1	-3.5060	-6.2513	2.6024	-0.0892	-46.6411	-0.9027

The accuracy of the exterior orientation parameters

image ID	mXs	mYs	mZs	mOMEGA	mPHI	mKAPPA
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.5690	0.3766	0.7859

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
1	8.0000	2.4500	1.8500

The residuals of the control points

Point ID	rX	rY	rZ
1	0.6105	-0.0792	-0.2672



2	0.0494	-0.2269	-0.9895
3	0.9013	-0.1127	-0.9556
4	0.2156	-0.0737	-0.2857
5	-0.3458	0.1488	0.4150
6	-0.1955	-0.4583	-0.8237
7	0.1576	-0.0676	-0.0679
8	-0.7753	-0.0172	-0.6519
9	-0.3812	-0.0220	-0.4038
10	-0.7931	0.0605	-0.7256

aX	aY	aZ
-0.0557	-0.0848	-0.4756
mX	mY	mZ
0.5284	0.1780	0.6337

The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap
1	3597845.9969	5795954.1748	80.1148	1
2	3597840.1642	5795980.3660	79.2719	1
3	3597832.8891	5795982.0295	79.2138	1
4	3597849.9950	5795978.0845	80.0828	1
5	3597840.6476	5795925.1865	80.8146	1
6	3597854.8554	5795912.1847	79.6525	1
7	3597857.8443	5795923.1995	80.4137	1
8	3597864.8187	5795960.4341	79.7989	1
9	3597866.0913	5795971.9388	80.0881	1
10	3597877.1012	5795982.6454	79.8459	1

The total object points = 10

\*\*\*\*\*

## Protokoll zur Entzerrung der Aufnahmen vom 24., 25. und 26.04.2003

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 1

Point ID	x	y
1	14.000	531.000
2	78.625	402.375
3	612.000	329.000
4	134.000	323.000

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-2.2848	0.006500	0.000000	1.7969	0.000000	-0.006250

THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

the no. of iteration =1 the standard error = 0.0895  
 the maximal correction of the object points = 1.15410  
 the no. of iteration =2 the standard error = 0.0895  
 the maximal correction of the object points = 0.00291  
 the no. of iteration =3 the standard error = 0.0895  
 the maximal correction of the object points = 0.00000

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
1	3596849.453	5795877.391	102.000	74.0344	77.4845	17.6742

The residuals of exterior orientation parameters

image ID	rXs	rYs	rZs	rOMEGA	rPHI	rKAPPA
1	-0.4003	0.2639	-1.9392	-0.0000	-0.0000	-0.0000

The accuracy of the exterior orientation parameters

image ID	mXs	mYs	mZs	mOMEGA	mPHI	mKAPPA
1	0.0000	0.0000	0.0000	1.2505	0.2660	2.0312

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
1	120.0000	2.4500	1.8500

The residuals of the control points

Point ID	rX	rY	rZ
1	0.0218	-0.0825	-0.3994
2	-0.0180	-0.6440	-1.1514
3	-0.0026	-0.2673	-0.6665
4	0.0115	-0.1049	-0.3837

aX	aY	aZ
0.0032	-0.2747	-0.6502

mX	mY	mZ
0.0153	0.3550	0.7205

The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap
1	3598096.5310	5795836.5385	80.4849	1
2	3598190.8215	5795815.6010	79.8109	1
3	3598284.4174	5795756.2953	81.2462	1

4 3598280.2942 5795795.5036 81.2041 1  
The total object points = 4

\*\*\*\*\*

**Protokoll zur Entzerrung der Aufnahme vom 28.04.2003**

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 1

Point ID	x	y
1	660.875	171.125
2	600.000	75.000
3	500.625	62.625
6	492.000	339.000
7	380.875	442.875
5	113.125	27.625
8	694.000	88.000

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-2.2848	0.006500	0.000000	1.7969	0.000000	-0.006250

**THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT**

the no. of iteration =1 the standard error = 0.0388  
 the maximal correction of the object points = 2.46150  
 the no. of iteration =2 the standard error = 0.0388  
 the maximal correction of the object points = 0.01893  
 the no. of iteration =3 the standard error = 0.0388  
 the maximal correction of the object points = 0.00004

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
1	3597851.1158	5795873.2240	104.3389	81.9971	1.3606	5.2405

The residuals of exterior orientation parameters

image ID	rXs	rYs	rZs	rOMEGA	rPHI	rKAPPA
1	1.6658	-4.1670	2.3389	-0.0000	-0.0000	-0.0000

The accuracy of the exterior orientation parameters

image ID	mXs	mYs	mZs	mOMEGA	mPHI	mKAPPA
1	0.0000	0.0000	0.0000	1.3711	0.9299	1.6232

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
1	8.0000	2.4500	1.8500

The residuals of the control points

Point ID	rX	rY	rZ
1	-0.7589	0.1646	0.7411
2	-1.6129	-0.0938	0.4918
3	-1.4314	-0.1697	0.5945
6	-0.4817	0.0442	0.3148
7	0.1335	0.1754	0.2482

5	-0.0351	0.1465	0.7599
8	2.4431	0.2740	0.7360

aX	aY	aZ
-0.2490	0.0773	0.5552
mX	mY	mZ
1.2787	0.1665	0.5885

The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap	
1	3597845.7257	5795952.8693	81.1243	1	
2	3597837.6233	5795981.6058	80.7589	1	
3	3597828.3599	5795982.6365	80.7760	1	
6	3597840.5117	5795925.9672	80.7142	1	
7	3597838.4912	5795916.3597	80.6495	1	
5	3597792.9775	5795981.6946	80.7420	1	
8	3597846.2994	5795978.6659	81.0685	1	

The total object points = 7

\*\*\*\*\*

**Protokoll zur Entzerrung der Aufnahme vom 04.05.2003**

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 1

Point ID	x	y
1	330.000	479.000
2	301.875	462.375
3	625.000	434.000
4	586.000	353.000
5	553.000	429.000
6	475.000	428.000

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-2.2848	0.006500	0.000000	1.7969	0.000000	-0.006250

THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

the no. of iteration =1 the standard error = 0.0066  
 the maximal correction of the object points = 0.50110  
 the no. of iteration =2 the standard error = 0.0066  
 the maximal correction of the object points = 0.00140  
 the no. of iteration =3 the standard error = 0.0066  
 the maximal correction of the object points = 0.00026

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
1	3597849.4524	5795877.3851	102.004	81.4407	70.3142	11.1466

The residuals of exterior orientation parameters

image ID	rXs	rYs	rZs	rOMEGA	rPHI	rKAPPA
1	-0.9976	0.4231	-0.6933	-0.0000	0.0000	0.0000

The accuracy of the exterior orientation parameters

image ID	mXs	mYs	mZs	mOMEGA	mPHI	mKAPPA
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.6147	0.2036	1.5217

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
1	120.0000	2.4500	1.8500

The residuals of the control points

Point ID	rX	rY	rZ
1	0.0332	0.1019	0.0071
2	-0.0234	-0.0336	0.1546
3	-0.0128	-0.0068	0.1344
4	0.0079	0.0366	0.0645
5	0.0308	0.0982	0.0387
6	0.1556	0.5022	0.1931

aX	aY	aZ
0.0319	0.1164	0.0987
mX	mY	mZ
0.0671	0.2140	0.1190

The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap
1	3598146.1478	5795779.2114	80.9835	1
2	3598157.9320	5795776.9153	81.1317	1
3	3598184.0108	5795749.8785	81.2468	1
4	3598246.7367	5795730.6472	81.6640	1
5	3598184.5998	5795753.8384	81.1396	1
6	3598185.2698	5795758.0973	81.2581	1

The total object points = 6

\*\*\*\*\*

**Protokoll zur Entzerrung der Aufnahme vom 05.05.2003**

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 2

Point ID	x	y
1	678.375	172.125
2	618.375	76.625
3	519.125	63.125
6	507.125	338.625
7	397.875	441.625
5	135.875	26.875
8	691.125	82.875

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-2.2848	0.006500	0.000000	1.7969	0.000000	-0.006250

THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

the no. of iteration =1 the standard error = 0.0233  
 the maximal correction of the object points = 1.41009  
 the no. of iteration =2 the standard error = 0.0233  
 the maximal correction of the object points = 0.00889  
 the no. of iteration =3 the standard error = 0.0233  
 the maximal correction of the object points = 0.00003

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
2	3597851.4941	5795871.7521	105.6741	81.2637	1.9074	5.2361

The residuals of exterior orientation parameters

image ID	rXs	rYs	rZs	rOMEGA	rPHI	rKAPPA
2	2.0441	-5.6389	3.6741	-0.7335	0.5468	-0.0045

The accuracy of the exterior orientation parameters

image ID	mXs	mYs	mZs	mOMEGA	mPHI	mKAPPA
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.8285	0.5620	0.9789

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
2	8.0000	2.4500	1.8500

Point ID	rX	rY	rZ
1	-0.1082	0.1638	0.5596
2	-0.8514	-0.0933	0.0358
3	-0.8385	-0.1211	0.2161
6	-0.3207	0.0366	0.2176
7	0.1772	0.1244	0.1290
5	0.1377	0.1917	0.5183



8            1.4015            0.2501            0.7311

aX	aY	aZ
-0.0575	0.0789	0.3440
mX	mY	mZ
0.7128	0.1541	0.4189

The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap	
1	3597846.3764	5795952.8684	80.9428	1	
2	3597838.3848	5795981.6062	80.3030	1	
3	3597828.9529	5795982.6851	80.3975	1	
6	3597840.6727	5795925.9596	80.6170	1	
7	3597838.5348	5795916.3087	80.5304	1	
5	3597793.1502	5795981.7397	80.5005	1	
8	3597845.2578	5795978.6419	81.0637	1	

The total object points = 7

\*\*\*\*\*

**Protokoll zur Entzerrung der Aufnahme vom 09.05.2003**

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 2

Point ID	x	y
1	263.000	541.000
2	136.000	531.000
4	270.000	509.000
5	151.125	501.375
6	31.125	501.625
8	166.375	384.375
9	338.125	358.875
10	318.125	412.875
11	439.000	415.000
12	558.000	416.000
13	440.000	362.000
14	370.000	332.000
3	17.625	527.625

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-2.2848	0.006500	0.000000	1.7969	0.000000	-0.006250

THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

the no. of iteration =1 the standard error = 0.0099  
 the maximal correction of the object points = 0.85711  
 the no. of iteration =2 the standard error = 0.0099  
 the maximal correction of the object points = 0.00106  
 the no. of iteration =3 the standard error = 0.0099  
 the maximal correction of the object points = 0.00001

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
2	3597849.4543	5795877.3854	102.0038	79.2599	78.0074	12.0811

The residuals of exterior orientation parameters

image ID	rXs	rYs	rZs	rOMEGA	rPHI	rKAPPA
2	-0.8733	1.9814	-0.6167	-0.0000	-0.0000	-0.0000

The accuracy of the exterior orientation parameters

image ID	mXs	mYs	mZs	mOMEGA	mPHI	mKAPPA
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.4546	0.0924	0.9788

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
2	120.0000	2.4500	1.8500

## The residuals of the control points

Point ID	rX	rY	rZ
1	0.0189	0.2592	0.4135
2	0.0263	0.1594	0.0264
4	-0.0107	-0.0907	-0.0886
5	0.0867	0.3711	-0.3123
6	0.0335	0.1277	-0.1745
8	0.0967	0.5722	0.0814
9	-0.0285	-0.0524	0.3147
10	0.0358	0.1878	-0.0131
11	0.0476	0.2423	-0.0135
12	0.1835	0.8581	-0.1946
13	0.1041	0.6219	0.2671
14	0.0579	0.2079	-0.3198
3	0.1377	0.8475	0.0875

aX	aY	aZ
0.0607	0.3317	0.0057
mX	mY	mZ
0.0834	0.4441	0.2206

## The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap	
1	3598096.5280	5795836.8802	81.2988	1	
2	3598097.1631	5795843.5471	80.9260	1	
4	3598113.1290	5795833.5014	80.7965	1	
5	3598114.3169	5795839.7457	80.5711	1	
6	3598115.0816	5795846.1106	80.7232	1	
8	3598221.1651	5795820.0951	81.0585	1	
9	3598258.9687	5795802.7004	81.6963	1	
10	3598195.4741	5795815.6877	80.9508	1	
11	3598195.2650	5795808.5902	80.9534	1	
12	3598193.2040	5795801.9588	80.7791	1	
13	3598256.6476	5795796.7662	81.6474	1	
14	3598280.3406	5795796.7104	81.3152	1	
3	3598099.5095	5795849.4463	81.0000	1	

The total object points = 13

\*\*\*\*\*

**Protokoll zur Entzerrung der Aufnahme vom 12.05.2003**

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 2

Point ID	x	y
1	671.000	181.000
2	609.875	86.125
3	512.125	71.375
6	498.875	347.375
7	388.125	448.875
5	124.375	34.125
8	673.875	89.375

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-2.2848	0.006500	0.000000	1.7969	0.000000	-0.006250

THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

the no. of iteration =1 the standard error = 0.0168  
 the maximal correction of the object points = 0.87514  
 the no. of iteration =2 the standard error = 0.0168  
 the maximal correction of the object points = 0.00600  
 the no. of iteration =3 the standard error = 0.0168  
 the maximal correction of the object points = 0.00002

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
2	3597851.4013	5795871.3111	105.8729	81.5626	1.3617	5.3616

The residuals of exterior orientation parameters

image ID	rXs	rYs	rZs	rOMEGA	rPHI	rKAPPA
2	1.9513	-6.0799	3.8729	0.0000	0.0000	-0.0000

The accuracy of the exterior orientation parameters

image ID	mXs	mYs	mZs	mOMEGA	mPHI	mKAPPA
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.5992	0.4044	0.7078

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
2	8.0000	2.4500	1.8500

The residuals of the control points

Point ID	rX	rY	rZ
1	0.1576	0.1453	0.4430
2	-0.5889	-0.1147	-0.1992
3	-0.4656	-0.0752	0.0744
6	-0.2291	0.0119	0.1217
7	0.1624	0.0977	0.0906

5	0.1819	0.1836	0.3799
8	0.8697	0.2174	0.7053

aX	aY	aZ
0.0126	0.0666	0.2308
mX	mY	mZ
0.4562	0.1366	0.3598

The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap	
1	3597846.6422	5795952.8499	80.8262	1	
2	3597838.6473	5795981.5848	80.0679	1	
3	3597829.3257	5795982.7311	80.2558	1	
6	3597840.7643	5795925.9349	80.5211	1	
7	3597838.5200	5795916.2820	80.4920	1	
5	3597793.1944	5795981.7317	80.3620	1	
8	3597844.7260	5795978.6092	81.0379	1	

The total object points = 7

\*\*\*\*\*

**Protokoll zur Entzerrung der Aufnahme vom 19.05.2003**

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 1

Point ID	x	y
2	624.375	88.875
3	527.000	73.000
6	513.125	349.375
7	402.625	450.375
5	152.375	34.625
8	680.000	91.000
1	686.625	184.625

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-2.2848	0.006500	0.000000	1.7969	0.000000	-0.006250

THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

the no. of iteration =1 the standard error = 0.0158  
 the maximal correction of the object points = 0.67027  
 the no. of iteration =2 the standard error = 0.0158  
 the maximal correction of the object points = 0.00776  
 the no. of iteration =3 the standard error = 0.0158  
 the maximal correction of the object points = 0.00002

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
1	3597849.4506	5795877.3885	102.0036	80.9556	0.9821	5.4171

The residuals of exterior orientation parameters

image ID	rXs	rYs	rZs	rOMEGA	rPHI	rKAPPA
1	2.3615	-7.6765	5.3689	-0.0000	-0.0000	-0.0000

The accuracy of the exterior orientation parameters

image ID	mXs	mYs	mZs	mOMEGA	mPHI	mKAPPA
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.5708	0.3846	0.6769

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
1	8.0000	2.4500	1.8500

The residuals of the control points

Point ID	rX	rY	rZ
1	0.6654	0.1322	0.3333
2	-0.3265	-0.1513	-0.4859
3	-0.3591	-0.1031	-0.1609
6	-0.0494	0.0195	0.0590
7	0.1989	0.0363	-0.0292

5	0.5544	0.3111	0.1500
8	0.4796	0.1504	0.5187

aX	aY	aZ
0.1662	0.0564	0.0550
mX	mY	mZ
0.4239	0.1568	0.3091

The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap	
1	3597846.6422	5795952.8499	80.8262	1	
2	3597838.6473	5795981.5848	80.0679	1	
3	3597829.3257	5795982.7311	80.2558	1	
6	3597840.7643	5795925.9349	80.5211	1	
7	3597838.5200	5795916.2820	80.4920	1	
5	3597793.1944	5795981.7317	80.3620	1	
8	3597844.7260	5795978.6092	81.0379	1	

The total object points = 7

\*\*\*\*\*

## Protokoll zur Entzerrung der Aufnahme vom 25.05.2003

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 1

Point ID	x	y
1	564.125	513.875
2	571.875	352.875
6	170.125	325.125
7	70.000	441.000
5	258.625	55.125
3	163.375	46.125
4	599.375	93.875

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-2.2848	0.006500	0.000000	1.7969	0.000000	-0.006250

THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

the no. of iteration =1 the standard error = 0.0239  
 the maximal correction of the object points = 0.97939  
 the no. of iteration =2 the standard error = 0.0239  
 the maximal correction of the object points = 0.00000

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
1	3597846.8900	5795874.6400	101.4800	82.2700	-15.9400	3.8400

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
1	8.0000	2.4500	1.8500

The residuals of the control points

Point ID	rX	rY	rZ
1	-0.9794	-0.3865	-0.9660
2	-0.7601	-0.2022	-0.7615
6	-0.7908	-0.1365	-0.0628
7	-0.7925	-0.0026	0.3174
5	-0.5809	-0.1960	-0.7050
3	-0.7238	-0.2515	-0.6867
4	-0.4727	-0.0845	-0.7602

aX	aY	aZ
-0.7286	-0.1800	-0.5178

mX	mY	mZ
0.7440	0.2130	0.6723

The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap
1	3597853.8518	5795911.9244	79.5040	1
2	3597855.7185	5795923.3968	79.7220	1
6	3597839.8732	5795925.0119	80.3386	1
7	3597838.4437	5795915.2964	80.7208	1
5	3597837.9964	5795979.8436	79.5672	1
3	3597830.4953	5795981.8907	79.4827	1
4	3597864.6820	5795970.7696	79.7316	1



The total object points = 7

\*\*\*\*\*

**Protokoll zur Entzerrung der Aufnahme vom 27.05.2003**

The Triangulation Report With OrthoBASE

The output image x, y units: pixels. The output angle unit: degrees. The output ground X, Y, Z units: meters.

The Input Image Coordinates image ID = 1

Point ID	x	y
2	638.375	89.625
3	542.625	72.625
6	526.875	349.625
7	416.375	451.125
5	168.875	35.125
8	685.125	89.375
1	701.375	186.125

Affine coefficients from file (pixels) to film (millimeters)

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-2.2848	0.006500	0.000000	1.7969	0.000000	-0.006250

**THE OUTPUT OF SELF-CALIBRATING BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT**

the no. of iteration =1 the standard error = 0.0158  
 the maximal correction of the object points = 0.93445  
 the no. of iteration =2 the standard error = 0.0158  
 the maximal correction of the object points = 0.00686  
 the no. of iteration =3 the standard error = 0.0158  
 the maximal correction of the object points = 0.00002

The exterior orientation parameters

image ID	Xs	Ys	Zs	OMEGA	PHI	KAPPA
1	3597849.4436	5795877.3859	107.7920	80.6433	1.5186	5.3455

The residuals of exterior orientation parameters

image ID	rXs	rYs	rZs	rOMEGA	rPHI	rKAPPA
1	2.4275	-7.9838	5.7926	0.0000	0.0000	-0.0000

The accuracy of the exterior orientation parameters

image ID	mXs	mYs	mZs	mOMEGA	mPHI	mKAPPA
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.5707	0.3851	0.6777

The interior orientation parameters of photos

image ID	f(mm)	xo(mm)	yo(mm)
1	8.0000	2.4500	1.8500

The residuals of the control points

Point ID	rX	rY	rZ
1	0.9315	0.0877	0.1670
2	-0.0845	-0.1884	-0.7171
3	-0.0294	-0.0755	-0.2865
6	0.0144	0.0047	0.0045
7	0.1989	-0.0074	-0.1034
5	0.6390	0.3108	-0.0212
8	-0.0849	0.1039	0.4388

aX	aY	aZ
0.2264	0.0337	-0.0740
mX	mY	mZ
0.4361	0.1495	0.3439

The coordinates of object points

Point ID	X	Y	Z	Overlap	
1	3597846.6422	5795952.8499	80.8262	1	
2	3597838.6473	5795981.5848	80.0679	1	
3	3597829.3257	5795982.7311	80.2558	1	
6	3597840.7643	5795925.9349	80.5211	1	
7	3597838.5200	5795916.2820	80.4920	1	
5	3597793.1944	5795981.7317	80.3620	1	
8	3597844.7260	5795978.6092	81.0379	1	

The total object points = 7

\*\*\*\*\*

220	Ingo Hagel (2000) <b>Auswirkungen einer Schwefeldüngung auf Ertrag und Qualität von Weizen schwefelmangelgefährdeter Standorte des Ökologischen Landbaus</b>	7,00€
221	Franz-Josef Bockisch (Hrsg.) (2000) <b>Beurteilung der raumklimatischen Wirkungen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen</b>	7,00€
222	Margret Lahmann (2001) <b>Prognose der Nachfrage nach Milch und Milcherzeugnissen in Deutschland und Frankreich bis zum Jahre 2005</b>	12,00€
223	Josef Kamphues und Gerhard Flachowsky (Hrsg.) (2001) <b>Tiernäherung - Ressourcen und neue Aufgaben</b>	17,00€
225	Hans-Wilhelm Windhorst and Aalt A.Dijkhuizen (eds.) (2002) <b>Product Safety and Quality Assurance</b>	7,00€
226	Jörg Hartung and Christopher M. Wathes (eds.) (2001) <b>Livestock Farming and the Environment</b>	7,00€
227	Franz Ellendorff . Volker Moennig . Jan Ladewig and Lorne Babiuk (eds.) (2002) <b>Animal Welfare and Animal Health</b>	7,00€
228	Eildert Groeneveld and Peter Glodek (eds.) (2002) <b>Animal Breeding and Animal Genetic Resources</b>	7,00€
229	Volker Moennig and Alex B. Thiermann (eds.) (2001) <b>Safeguarding Animal Health and in Global Trade</b>	7,00€
230	Nežika Petric (2001) <b>Pränatale Regulation des sexuellen Differenzierung von Luteinisierungshormon und Wachstumshormon, Genexpression und Sekretion beim Schwein</b>	7,00€
231	Bernhard Osterburg und Hiltrud Nieberg (Hrsg.) (2001) <b>Agrarumweltprogramme — Konzepte, Entwicklungen, künftige Ausgestaltung</b>	7,00€
232	Kerstin Panten (2002) <b>Ein Beitrag zur Fernerkundung der räumlichen Variabilität von Boden- und Bestandesmerkmalen</b>	7,00€
233	Jürgen Krahl (2002) <b>Rapsölmethylester in dieselmotorischer Verbrennung — Emmissionen, Umwelteffekte, Optimierungspotenziale</b>	10,00€
234	Roger J. Wilkins and Christian Paul (eds.) (2002) <b>Legume Silages for Animal Production — LEGSIL</b>	7,00€
235	Torsten Hinz . Birgit Rönnpagel and Stefan Linke (eds.) (2002) <b>Particulate Matter in and from Agriculture</b>	7,00€
236	Mohamed A. Yaseen (2002) <b>A Molecular Biological Study of the Preimplantation Expression of Insulin-Like Growth Factor Genes and Their Receptors in <i>In Vitro</i> Produced Bovine Embryos to Improve <i>In Vitro</i> Culture Systems and Embryo Quality</b>	8,00€
237	Mohamed Ali Mahmoud Hussein Kandil (2002) <b>The effect of fertilizers for conventional and organic farming on yield and oil quality of fennel (<i>Foeniculum vulgare</i> Mill.) in Egypt</b>	7,00€
238	Mohamed Abd El-Rehim Abd El-Aziz Hassan (2002) <b>Environmental studies on coastal zone soils of the north Sinai peninsula (Egypt) using remote sensing techniques</b>	7,00€
239	Axel Munack und Jürgen Krahl (Hrsg.) (2002) <b>Biodiesel — Potenziale, Umweltwirkungen, Praxiserfahrungen —</b>	7,00€

240	Sylvia Kratz (2002) <b>Nährstoffbilanzen konventioneller und ökologischer Broilerproduktion unter besonderer Berücksichtigung der Belastung von Böden in Grünausläufen</b>	7,00€
241	Ulf Prübe and Klaus-Dieter Vorlop (eds.) (2002) <b>Practical Aspects of Encapsulation Technologies</b>	9,00€
242	Folkhard Isermeyer (Hrsg.) (2002) <b>Milchproduktion 2025</b>	9,00€
243	Franz-Josef Bockisch und Siegfried Kleisinger (Hrsg.) (2003) <b>13. Arbeitswissenschaftliches Seminar</b>	8,00€
244	Anja Gassner (2003) <b>Factors controlling the spatial specification of phosphorous in agricultural soils</b>	9,00€
245	Martin Kücke (Hrsg.) (2003) <b>Anbauverfahren mit N-Injektion (CULTAN) — Ergebnisse, Perspektiven, Erfahrungen</b>	7,00€
246	Jeannette van de Steeg (2003) <b>Land evaluation for agrarian reform. A case study for Brazil</b>	7,00€
247	Mohamed Faisal b. Mohd Noor (2003) <b>Critical assessment of a ground based sensor technique for adressing the nitrogen requirements of cereals</b>	7,00€
248	Esmat W. A. Al-Karadsheh (2003) <b>Potentials and development of precision irrigation technology</b>	8,00€
249	Andreas Siegfried Pacholsky (2003) <b>Calibration of a Simple Method for Determining Ammonia Volatilisation in the Field — Experiments in Henan, China, and Modelling Results</b>	9,00€
250	Asaad Abdelkader Abdalla Derbala (2003) <b>Development and evaluation of mobile drip irrigation with center pivot irrigation machines</b>	9,00€
251	Susanne Freifrau von Münchhausen (2003) <b>Modellgestützte Analyse der Wirtschaftlichkeit extensiver Grünlandnutzung mit Mutterkühen</b>	8,00€
252	Axel Munack. Olaf Schröder . Hendrik Stein . Jürgen Krahl und Jürgen Bünger (2003) <b>Systematische Untersuchungen der Emissionen aus der motorischen Verbrennung vom RME, MK1 und DK</b>	5,00€
253	Andrea Hesse (2003) <b>Entwicklung einer automatisierten Konditionsfütterung für Sauen unter besonderer Berücksichtigung der Tierleistung</b>	8,00€
254	Holger Lilienthal (2003) <b>Entwicklung eines bodengestützten Fernerkundungssystems für die Landwirtschaft</b>	8,00€
255	Herwart Böhm . Thomas Engelke . Jana Finze . Andreas Häusler . Bernhard Pallutt . Arnd Verschwele und Peter Zwirger (Hrsg.) (2003) <b>Strategien zur Regulierung von Wurzelunkräutern im ökologischen Landbau</b>	10,00€
256	Rudolf Artmann und Franz-Josef Bockisch (Hrsg.) (2003) <b>Nachhaltige Bodennutzung — aus technischer, pflanzenbaulicher, ökologischer und ökonomischer Sicht</b>	9,00€

Viele frühere Sonderhefte sind weiterhin lieferbar.

Bei Interesse setzen Sie sich bitte mit Frau Röhm unter 0531-596-1403 oder [landbauforschung@fal.de](mailto:landbauforschung@fal.de) in Verbindung.