

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN DER DDR  
Forschungsbereich Geo- und Kosmoswissenschaften  
**ZENTRALINSTITUT FÜR PHYSIK DER ERDE**

---

Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde  
Nr. 90

## **Beiträge zur in situ-Messung von Spektralcharakteristiken natürlicher Objekte**

von

**Horst Weichert**

(vollständige Fassung der am 6. November 1984  
bei der Akademie der Wissenschaften der DDR  
verteidigten Dissertation A)

Herausgeber: Der Direktor des Zentralinstituts für Physik der Erde Potsdam

---

Als Manuskript gedruckt

Potsdam 1986

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	4
2. Zur Formalisierung fernerkundungsspezifischer Erkennungsprozesse	7
2.1. Das Vektorkonzept in der Fernerkundung	7
2.2. Stochastisch überwachte Erkennung	8
2.3. Physikalisch überwachte Erkennung	12
2.3.1. Fachspezifische und Fernerkundungsspezifische Objektmerkmale	12
2.3.2. Induktive und deduktive Modelle bei der physikalisch überwachten Erkennung	13
2.3.3. Vorschlag für ein Formalisierungsprinzip im Rahmen des physikalisch-überwachten Erkennungskonzeptes	15
2.3.4. Verfahren zur Merkmalsextraktion	17
3. Schaffung der experimentellen Voraussetzungen	19
3.1. Anforderungen an die Messung des spektralen gerichteten Remissionskoeffizienten	19
3.1.1. Anforderungen aus den speziellen Beleuchtungsbedingungen einer natürlichen Szene	19
3.1.2. Anforderungen aus speziellen Objekteigenschaften	21
3.2. Stand der experimentellen Gerätetechnik	22
3.3. Realisierung der experimentellen Voraussetzungen	26
3.4. Eigenschaften des Feldspektrometers BSP-83	32
3.4.1. Meßaufbau und -methoden	32
3.4.2. Spektralkanäle und Bandbreiten	34
3.4.3. Stabilität des Meßsignals	35
3.4.4. Öffnungswinkel des Bodenobjektivs und Indikatritz der Streuscheibe	36
3.4.5. Zeitlicher Ablauf des Meßvorganges	42
3.4.6. Bestimmung des Verstärkungsverhältnisses	44

		<u>Seite</u>
4.	Vorbereitung und Durchführung der Feldexperimente 1982/1983	45
4.1.	Allgemeine methodische Grundlagen	45
4.2.	Festlegung der Untersuchungsobjekte und Testgebiete	48
4.3.	Auswahl der fachspezifischen Merkmale sowie der Störparameter	52
4.4.	Aufstellung des Versuchsplanes	53
5.	Aufbereitung der Meßdaten	54
5.1.	Datenübernahme und Vorverarbeitung	56
5.2.	Datenspeicherung	57
5.3.	Statistische Datenanalyse	57
5.3.1.	Faktorenanalyse	58
5.3.2.	Varianzanalyse	59
5.3.3.	Regressions- und Korrelationsanalyse	60
5.3.4.	Diskriminanzanalyse	60
6.	Auswertung und Ergebnisse der Feld- experimente 1982/83	61
6.1.	Ergebnisse der Meßperiode 1982	61
6.2.	Ergebnisse der Meßperiode 1983	66
6.3.	Ergebnisse der Radiometermessungen	79
7.	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	84
8.	Literaturverzeichnis	86

## 1. Einleitung

Zu den Anwendungsgebieten der Raumfahrt, die immer wieder im Zusammenhang mit einem praktischen, wirtschaftlichen Nutzen der Kosmostechnik genannt werden, gehört seit einigen Jahren die Fernerkundung der Erde mit aerokosmischen Mitteln. Dabei handelt es sich um eine Methode zur Gewinnung komplexer Informationen über flächenhafte Objekte an der Erdoberfläche aus dem Kosmos oder von Flugzeugen aus.

Dazu wird die elektromagnetische Strahlung im sichtbaren und infraroten Spektralbereich sowie in manchen Fällen auch im Radiowellenbereich (Radar) als Träger der Informationen untersucht /8, 26, 60/.

In der DDR begannen mit dem Bau und dem Einsatz der vom VEB Carl Zeiss Jena hergestellten Multispektralkamera MKF-6 die systematischen Forschungen auf dem Gebiet der Fernerkundung /25/. Dabei standen in den ersten Jahren die Schaffung methodischer Grundlagen für die visuelle Auswertung und Interpretation der mit dieser Kamera gewonnenen Fernerkundungsdaten im Mittelpunkt /20/. Für die Zwecke der visuellen Interpretation durch entsprechende Fachspezialisten erwies sich das in den Experimenten von 1976 - 1979 gewonnene Datenmaterial als ausreichend. Es konnten qualitative Aussagen über die untersuchten Objekte aus den Bilddaten gewonnen und in diesem Rahmen grundlegende Zusammenhänge nachgewiesen werden /27, 36/. Die methodischen Arbeiten zu diesem Themenkomplex erstreckten sich bis in die Jahre 1981/82 und fanden mit der Herausgabe des Interpretationsatlas /48/ einen vorläufigen Höhepunkt und Abschluß.

Entscheidend dafür, ob sich neue Methoden und Technologien in der industriellen und wirtschaftlichen Praxis durchsetzen können, ist letzten Endes das Verhältnis von erzieltm Nutzen zum benötigten Aufwand. Zu den Aufgaben, die die Rentabilität eines Fernerkundungssystems als einheitliches System von Datensammelgeräten sowie Geräten und Methoden zur Datenauswertung bis zur Erstellung eines Interpretationsvorschlages wesentlich mit absichern, gehören die kurz-, mittel- und langfristigen Überwachungsprogramme in der Landwirtschaft, Forstwirtschaft, im Gartenbau und für ökologische und Umweltschutzprobleme. So sind in der Landwirtschaft z. B. die Abschätzung von Reifezustand, Ausfallflächen, Bestandsdichte, Verunkrautung und Schädlingsbefall zur Einleitung entsprechender landwirtschaftlicher Bearbeitungsmaßnahmen /12/ sowie die Abschätzung von Erntetermin und Ertrag für die staatliche Planung, in der Forstwirtschaft und im Gartenbau die Bestandskontrolle und Ertrags- bzw. Holzvorratsschätzung /62, 42/ potentielle Aufgabengebiete der Fernerkundung.

Aus dieser Zielstellung für die Fernerkundung lassen sich zwei wesentliche Anforderungen an das Fernerkundungssystem ableiten:

- a) neben qualitativen Aussagen über die Art des Objektes müssen quantitative Aussagen über Zustand und Zusammensetzung des Objektes möglich sein,
- b) die Daten bzw. Auswertergebnisse müssen operativ (kurzfristig) zur Verfügung stehen.

Dabei sind quantitative Aussagen bei der visuellen Interpretation nur schwer zu erhalten. Möglich erscheint hier lediglich die visuelle Ausgrenzung einzelner Gebiete mit in gewissen Grenzen gleichem oder ähnlichem Zustand. Die Schaffung eines operativen Informationssystems mit Hilfe der Fernerkundung entsprechend obiger Zielstellung verlangt deshalb die Einbeziehung automatischer Datenverarbeitungsalgorithmen. Ein solches System muß sich dabei in die existierenden terrestrischen Informationssysteme einpassen.

Bereits frühzeitig wurde auch am Methodisch-diagnostischen Zentrum für Fernerkundung im Zentralinstitut für Physik der Erde Potsdam mit ersten Arbeiten zur automatischen Auswertung der Daten der Fernerkundung begonnen. Dazu wurden zunächst bekannte Methoden der Klassifikation, wie z. B. die Maximum-Likelihood-Methode, auf die Fernerkundungsdaten angewendet. Dies brachte im wesentlichen die erwarteten und aus der Literatur bekannten Ergebnisse, z. B. die automatische Trennung verschiedener Objektarten mit einer Klassifizierungsgenauigkeit zwischen 60 - 90 % je nach Szene, Objektart und Aufnahmebedingungen /2/. Wie im Kapitel II der vorliegenden Arbeit begründet wird, konnten diese Methoden vor allem auf Grund ihrer Instabilität zur Erkennung des Objektzustandes nicht herangezogen werden. Die Gründe für diese Instabilität liegen vor allem in der

- ungenügenden Beschreibung der realen physikalischen Bedingungen und Eigenschaften der Objekte durch die formal angenommenen mathematischen Verteilungsfunktionen,
- fehlenden Eindeutigkeit der Abbildung fernerkundungsspezifischer auf einzelne fachspezifische Merkmale ,
- ungenügenden Repräsentanz der Musterklassen bei örtlich zufälligen Schwankungen fachspezifischer Parameter .

Daher sind für eine Objektzustandserkennung zunächst grundlegendere Kenntnisse der physikalischen Eigenschaften der interessierenden Objekte, insbesondere ihres spektralen Remissionsverhaltens in Abhängigkeit von den fachspezifischen Merkmalen, nötig. Vor allem solche fachspezifischen Merkmale, die sich einerseits auf die Fernerkundungsdaten abbilden lassen und andererseits das Objekt beschreiben bzw. dessen Zustand beeinflussen, sind bei diesen Untersuchungen zu berücksichtigen und zu analysieren. Diese Kenntnisse werden dann bei der Datenauswertung und Interpretation z. B. in Form von Katalogen oder Modellen herangezogen und können die Sicherheit der getroffenen Entscheidungen erhöhen.

In diesem Zusammenhang wird im Kapitel II eine verbesserte Auswertemethodik für die automatische Klassifizierung von DFE vorgeschlagen, die es erlauben könnte, trotz der mannigfaltigen Störungen und Einflüsse signifikante Aussagen über die Beziehung von Objekteigenschaften und dem Remissionsverhalten der Objekte abzuleiten. Sie beruht auf einem aus Grundlagenuntersuchungen für die konkrete Erkennungsaufgabe jeweils abzuleitenden statistischen Modell der Abbildung fachlich interessierender Merkmale auf Fernerkundungsdaten. Mit Hilfe eines solchen objektspezifischen Modells soll eine Transformation der Daten eines operativen Fernerkundungssystems in eine Form ermöglicht werden, die eine stabile Klassifizierung quantitativer Stufen bestimmter Merkmalskomplexe ermöglicht. Bei den dazu erforderlichen experimentellen Grundlagenuntersuchungen ist zumindest in der ersten Stufe die Benutzung von Fernerkundungsdaten aus Luft- oder Kosmosaufnahmen nicht erforderlich, da alle Untersuchungen einschließlich der Messung der remittierten Strahlung mit entsprechenden Meßgeräten am Boden erfolgen können. Das hat neben der erheblichen Reduzierung der Kosten bei der Durchführung der Experimente den wesentlichen Vorteil, daß solche Störfaktoren wie z. B. Atmosphäreneinfluß und Winkelabhängigkeit der remittierten Strahlung zunächst unmittelbar nicht berücksichtigt zu werden brauchen.

Die vorliegende Arbeit ist darauf gerichtet, die experimentellen und methodischen Grundlagen für die Durchführung solcher Bodenexperimente zu schaffen und die Brauchbarkeit und Aussagefähigkeit von Daten, die aus Bodenexperimenten gewonnen werden, zu prüfen. Damit soll ein Beitrag zur Qualifizierung des physikalischen Verständnisses der Remissionselgenschaften der Objekte sowie der Möglichkeiten und Methoden der Informationsgewinnung aus Fernerkundungsdaten geleistet werden.

Mit diesen Untersuchungen wurde am MdZ Fernerkundung im Jahre 1980 begonnen, wobei erste Voruntersuchungen auch bereits 1979 durchgeführt wurden. Das Ziel besteht dabei in der Schaffung einer technologisch abgestimmten Bearbeitungskette von der Datengewinnung bis zur Speicherung und

statistischen Bearbeitung der Meßwerte..

Der Schaffung der experimentellen Voraussetzungen für diese Bodenexperimente war dabei wegen ihrer grundlegenden Bedeutung für alle folgenden Arbeiten in dieser Richtung und wegen des damaligen Standes in der DDR die größte Aufmerksamkeit zu widmen.

Für die Durchführung der Bodenexperimente werden im Kapitel III methodische und experimentell-technische Anforderungen an die dafür benötigten Meßgeräte und Systeme, insbesondere zur Messung der spektralen Remissionsseigenschaften der Objekte, abgeleitet sowie entsprechende technische Lösungen vorgestellt. Die grundlegende experimentelle Basis bilden die Versuchsfelder im Testpolygon Schmergow und im Testpolygon Dedelow, die hinsichtlich ihrer fachspezifischen Entwicklung von den jeweiligen Kooperationspartnern, der Sektion Geographie der Pädagogischen Hochschule Potsdam und der Abteilung Fernerkundung des Forschungszentrums für Bodenfruchtbarkeit Münchenberg betreut werden. Die physikalischen Aspekte der erforderlichen Bodenexperimente, insbesondere die In-situ-Bestimmung der Remissionscharakteristiken der natürlichen Objekte, wurden durch das MdZ Fernerkundung des Zentralinstituts für Physik der Erde abgesichert.

In Auswertung internationaler Erfahrungen wurde dazu ein mobiler Bodenmeßkomplex entwickelt, der es gestattet,

- a) den gerichteten spektralen Remissionskoeffizienten quasikontinuierlich im Wellenlängenbereich von 0,4 - 1,1  $\mu\text{m}$  mit einem Feldspektrometer,
- b) ein spektrales Strahlungsäquivalent parallel in 7 Kanälen im Wellenlängenbereich von 0,45 - 2,35  $\mu\text{m}$  und 1 Kanal bei 10,4 - 12,5  $\mu\text{m}$  mit einem Radiometer der Firma BARNES sowie
- c) einige zur Charakterisierung der Meßbedingungen notwendige Anschlußparameter (Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Bodentemperatur, Bodenfeuchte)

zu messen. Der Schwerpunkt bei der Realisierung der physikalisch-experimentellen Grundlagen im Rahmen der vorliegenden Arbeit lag bei der Schaffung des unter Punkt (a) genannten Feldspektrometers. Ein solches Gerät stand zu Beginn der Arbeiten weder in der DDR noch im Interkosmosbereich zur Verfügung. Erste Erfahrungen, die in den Jahren 1979 - 1980 mit einem im AOL (Aerologisches Observatorium Lindenberg) entwickelten Boden-Atmosphärenspektrometers BAS gesammelt wurden, bildeten den Ausgangspunkt für die Erarbeitung einer wissenschaftlichen Aufgabenstellung für die erforderliche Geräteentwicklung. Das auf dieser Grundlage realisierte Feldspektrometer BSP-83 stand für die Meßperiode 1983 erstmals zur Verfügung und erfüllte in vollem Umfang die technischen und methodisch-experimentellen Anforderungen.

Die Durchführung der Experimente wird im Kapitel IV diskutiert. Dazu werden zunächst einige allgemeinemethodische Erfahrungen dargelegt und danach die Vorbereitung und Durchführung der Testeinsätze 1982 und 1983 dargestellt. Im Kapitel V werden kurz die wichtigsten Grundlagen für die Auswertung der Daten vorgestellt. Da aus methodischen Gründen der Versuchsdurchführung die Abarbeitung statistisch gesicherter vollständiger Versuchspläne bei den hier betrachteten Feldexperimenten nicht möglich ist, liegt der Schwerpunkt bei der Datenauswertung auf einer heuristischen Interpretation, die in Abhängigkeit vom vorliegenden Datenmaterial mehr oder weniger stark durch Analysen mit Methoden der mathematischen Statistik gestützt wird. Andererseits ist das bei den Experimenten anfallende Datenmaterial so umfangreich, daß effektive EDV-gestützte Methoden der Korrektur, Speicherung und Bereitstellung der Daten unumgänglich sind. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse und Erfahrungen wurde das im Kapitel V in wesentlichen Zügen vorgestellte dreiteilige Softwarepaket geschaffen, das die Bearbeitungsschritte

- a) Datenübernahme, Korrektur und Vorverarbeitung
  - b) Datenspeicherung
  - c) statistische Analyse der Daten
- umfaßt.

Die in den Voruntersuchungen und den bisher durchgeführten Testeinsätzen gewonnenen Daten und Ergebnisse werden ausgehend von der gewählten Auswertemethodik im Kapitel VI diskutiert. Dabei hat es sich als zweckmäßig erwiesen, die Ergebnisse der beiden Meßkampagnen 1982 und 1983 getrennt zu behandeln und die Probleme und Resultate der Messungen mit dem Radiometer in einem gesonderten Abschnitt darzustellen.

Mit der vorliegenden Arbeit wurden die grundlegenden Voraussetzungen geschaffen, die eine erfolgreiche Durchführung von Bodenexperimenten für die Fernerkundung sowie die Auswertung der Meßergebnisse gestatten und die Richtung der Anwendung dieser Resultate als Vorschlag aufgezeigt, so daß der weitere Erkenntniszuwachs vorwiegend auf den disziplinären Forschungsgebieten erfolgen wird.

## 2. Zur Formalisierung fernerkundungsspezifischer Erkennungsprozesse

### 2.1. Das Vektorkonzept in der Fernerkundung

Zur Realisierung der eingangs aufgestellten Aufgabe ist die Schaffung eines automatisierten operativen Fernerkundungssystems notwendig. Dies resultiert, wie schon bemerkt wurde, nicht nur aus der notwendigen Schnelligkeit, mit der die Ergebnisse der Datenauswertung für eine sinnvolle Nutzung in der Volkswirtschaft zur Verfügung stehen müssen, sondern auch aus der Forderung nach Erfassung quantitativer Eigenschaften zur Bestimmung des Zustandes bzw. der Zusammensetzung eines Objektes. Die quantitative Erfassung der Zustände eines Objektes verlangt die Definition bestimmter quantitativer Stufen der Objektmerkmale. Diese können z. B. in einem Merkmalskatalog erfaßt werden. Solche formalen Merkmalsstufen sind an einem bestimmten formalen Auswerte- und Interpretationsschlüssel gebunden. Damit weist der Interpretationsprozeß bezüglich solcher Aufgabenstellungen schon einen hohen formalisierten Anteil auf, so daß die Anwendung formalisierter Objekterkennungsprozesse möglich wird. Die Anwendung heuristischer Verfahren, wie sie insbesondere bei auf bestimmte Fragestellungen trainierte Bildinterpreten zur Anwendung kommen, kann hierbei keine entscheidenden Vorteile bringen, da das Wesen dieser heuristischen Verfahren in der schöpferischen und teilweise intuitiven Erfassung und Bewertung der nicht formalisierten bzw. nicht formalisierbaren Merkmale im Luftbild liegt. Durch einen formalen Interpretationsschlüssel würde dieser schöpferische Prozeß zu sehr eingeschränkt, so daß dieser große Vorteil daher hier nicht zum Tragen käme. Dagegen arbeiten die auf der Grundlage der formalisierten Objekterkennungsprozesse beruhenden automatisierten Klassifizierungsverfahren in solchen Fällen sehr effektiv und genau.

Auch in der Fernerkundung lassen sich für die Objekterkennungsprozesse nach dem Vektorkonzept die beiden Hauptschritte Datensammlung und Datenauswertung bzw. Interpretation unterscheiden. Im ersten Schritt werden die vom Datensammelsystem (der Fernerkundungsplattform) aus der Umwelt aufgenommenen Signale in eine Menge von  $n$  quantitativen Größen ( $X_i$ ) ( $i = 1 \dots n$ ) transformiert. Diese Größen können als Merkmale der Objekte verstanden werden und sollen den Merkmalsraum  $X^n$  aufspannen. Die konkreten Meßwerte  $X_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) bilden dann die Realisierung eines Merkmalsvektors  $\vec{x}$  in diesem Merkmalsraum. Die Art der Transformation der Signalfunktion in die interne Objektbeschreibung durch Merkmale wird durch den Fernerkundungssensor und seine Anwendungsbedingungen bestimmt. Grundlegende Bedeutung für die Fernerkundung haben dabei die in verschiedenen Spektralbereichen gemessenen Strahldichten als Komponenten des Merkmalsvektors. Zur Verbesserung der Erkennungsgenauigkeit wurde aber auch versucht, andere Merkmale wie z. B. Texturkomponenten oder als Merkmale benutzte Referenzdaten zusätzlich mit einzubeziehen. Voraussetzung für ihre Anwendung im Vektorkonzept ist dabei, daß alle Merkmale skalierbar sind und die vorgegebenen Metrikbedingungen erfüllen.

Im zweiten Schritt wird im einfachsten Fall jedem vorliegenden Merkmalsvektor nach einer bestimmten Entscheidungsregel ein Klassenname zugeordnet. Dabei erhalten verschiedene Objekte oder Objektzustände, die sich in unterscheidbaren Merkmalsvektoren äußern, i. a. unterschiedliche Klassennamen. Durch die Menge der möglichen Entscheidungen wird der Entscheidungsraum aufgespannt, dessen Dimension durch die festgelegte Klassenzahl bestimmt wird.

In dem hier dargelegten Sinne stellen die Erkennungs- und Klassifizierungsverfahren in der Fernerkundung eine spezielle angewandte Variante des allgemeinen technischen Objekterkennungsverfahrens dar /59/. Es gibt jedoch eine Reihe von Besonderheiten, die bei der Übertragung beachtet werden müssen. Diese Besonderheiten der Erkennungsprobleme der Fernerkundung ergeben sich insbesondere aus der statistischen Natur ihrer Merkmale und aus der Spezifik der Beziehungen zwischen den Objektmerkmalen untereinander.

## 2.2. Stochastisch überwachte Erkennung

Als ersten Schritt bei der Anwendung des Vektorkonzeptes zur Objekterkennung kann man die Unterscheidung der Objektarten ansehen. Dafür hat sich in der Praxis die überwachte Klassifizierung bewährt /75/. Dabei wird der Merkmalsvektor mathematisch formal einer solchen Klasse von Repräsentanten (Musterklassen) zugeordnet, der er mit der größten Wahrscheinlichkeit angehört. Nach /1/ wird diese Klassifizierung auch als eine Methode der stochastisch überwachten Erkennung bezeichnet. Im Rahmen der überwachten Klassifizierung werden Klassifizierungsverfahren eingesetzt, die sowohl auf deterministischen als auch auf statistischen Entscheidungsregeln beruhen /35, 46, 47/. Verbreitete Anwendung finden "Minimum-Distance"- und "Maximum-Likelihood"-Verfahren, und zwar gleichermaßen mit Trennfunktionen ersten und höheren Grades. Mit beiden Verfahren können vergleichbar gute Ergebnisse gewonnen werden, wobei die Maximum-Likelihood-Verfahren einen minimalen mittleren Verlust bei Fehlklassifizierungen erwarten lassen.

Am Methodisch diagnostischen Zentrum für Fernerkundung wurde im Rahmen der Voruntersuchungen zu dieser Arbeit für die rechnergestützte Analyse von MKF-6-Aufnahmen ein Maximum-Likelihood-Verfahren mit Trennfunktionen zweiten Grades untersucht /18/. Dabei wird angenommen, daß bei allen möglichen Fehlklassifizierungen stets der gleiche Verlust an Information auftritt und daß die Muster der Klassen im Merkmalsraum durch  $n$ -dimensionale Normalverteilungen dargestellt werden können. Die Entscheidung, ob der Merkmalsvektor  $g$  ein Element der Klasse  $W_i$  ist, wird mit Hilfe der Trennfunktion  $t_i(g)$

$$t_i(\vec{g}) = \ln p(W_i) - 1/2 \ln |C_i| - 1/2 [(\vec{g} - \vec{g}_i) \cdot C_i^{-1} (\vec{g} - \vec{g}_i)]$$

$$i = 1, \dots, k$$

vorgenommen. Darin bedeuten  $p(W_i)$  die a-priori-Wahrscheinlichkeit der Klasse  $i$  in der Multispektralaufnahme,  $C_i$  die Kovarianzmatrix für diese Klasse zwischen den  $g$ -Werten der einzelnen Spektralkanäle,  $\vec{g}_i$  den Mittelwert und  $|C_i|$  die Determinante von  $C_i$ . Der Merkmalsvektor  $\vec{g}$  wird der Klasse  $W_i$  zugeordnet, wenn  $t_j(\vec{g})$  der Maximalwert der  $t_i(\vec{g})$ -Werte aller Klassen ist und  $t_j(\vec{g})$  die über  $C_j$  geeignet vorgegebene Signifikanzschranke  $t_{js}$  übersteigt. Falls  $t_j(\vec{g})$  diese Schranke nicht erreicht, wird  $\vec{g}$  und damit auch der zugehörige Bildfleck als unklassifizierbar ausgewiesen.

Die überwachte Klassifizierung mit obigem Verfahren beginnt mit der Identifizierung und Auswahl der Musterobjekte, die als repräsentative Stichproben aus jeder der  $k$  Klassen angesehen werden müssen. Diese Auswahl erfolgt unter Aspekten der benötigten Information durch einen spezialisierten Interpreten, der durch Geländeuntersuchungen hinreichende und zuverlässige a-priori-Informationen über die problemrelevanten Merkmale der Musterobjekte gesammelt hat.



Diese so ausgewählten Musterobjekte dienen zur Unterweisung des Algorithmus bezüglich der statistischen Eigenschaften der zugehörigen spektralen Merkmalsvektoren  $g_{ij}$ , wobei für  $i$  die Größenordnung von  $10^2$ -Bildelementen erforderlich ist. Dazu wurde eine Untersuchung der für die Klassen repräsentativen Musterobjekte hinsichtlich ihrer statistischen Eigenschaften, im vorliegenden Falle bezüglich ihrer Darstellbarkeit durch Normalverteilungen, durchgeführt. Musterobjekte als Repräsentanten problemrelevanter Klassen mit mehr als einem Gipfel in einem oder mehreren Spektralkanälen sind für die Unterweisung des angewandten Klassifikators bereits von den Voraussetzungen her unzulässig. Falls die Histogramme näherungsweise durch Normalverteilungen approximiert werden können, werden aus den Daten jedes Musterobjektes  $i$  die Werte für  $C_i$ ,  $C_i^{-1}$  und  $|C_i|$  berechnet und als Tabellen gespeichert. In der anschließenden Phase wird die elementweise Klassifizierung der gesamten Szene automatisch vorgenommen.

Das Ergebnis der Klassifizierung wird primär als einfaches Digitalbild dargestellt, wobei jedem Bildelement der Klasse  $W_i$  ein vereinbarter Zahlenwert  $g_i$  zugeordnet wird. Mittels der Bildschreibeinrichtung oder des Schnelldruckers werden die gewonnenen Informationen im allgemeinen zur weiteren Nutzung visualisiert, wobei alle Bildflecken einer Klasse durch ein Symbol, einen einheitlichen Grauwert oder durch die Anwendung des Verfahrens der Pseudocolorierung in gleichen Farben dargestellt werden.

Das geschilderte Verfahren der überwachten Klassifizierung wurde herangezogen, um aus einem Ausschnitt der kosmischen MKF-6-Aufnahmen aus Sojus 22 am 21. 9. 1976 automatisch eine Darstellung der Hauptflächennutzungsarten zu gewinnen. Der Ausschnitt umfaßt ein etwa  $750 \text{ km}^2$  großes Gebiet an der Ostseeküste der DDR bei Stralsund. Insgesamt konnten Musterobjekte für die in Tabelle 1 zusammengestellten Flächennutzungsarten verwendet werden. Eine Auswahl der zugehörigen Histogramme der gemessenen Grauwerte ist in Abb. 1 dargestellt. Man kann daraus ersehen, in welchem Maße sowohl die mittleren Grauwerte der Objekte in verschiedenen Kanälen als auch die Streuungen der Grauwerte unterschiedlich sind. Während alle Musterobjekte "Wasser" eine geringe Streuung von wenigen Graustufen aufweisen, ist diese in dem Musterobjekt "Siedlung" besonders groß, so daß Fehlklassifizierungen bei Siedlung wahrscheinlicher als für Wasser zu erwarten sind.

Das Ergebnis der mit Hilfe der genannten 12 Musterobjekte durchgeführten automatischen Analyse wurde mit dem Resultat der visuellen Auswertung auf drei Profilen verglichen, wobei der visuellen Auswertung die größere Sicherheit zuerkannt wurde.

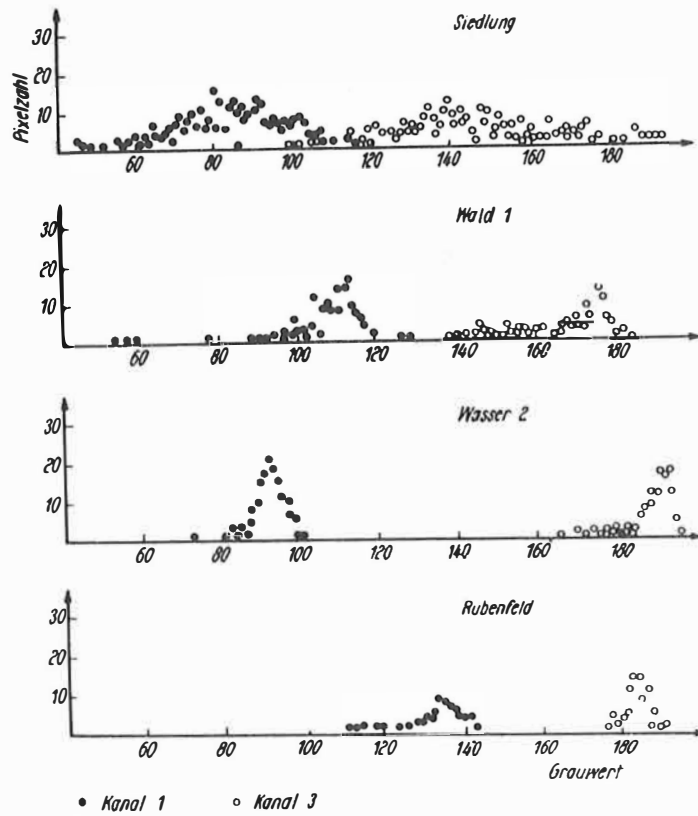


Abb. 1: Auswahl von Grauwert-Histogrammen verschiedener Musterobjekte

Tabelle 1: Zusammenstellung der klassifizierten Flächennutzungsarten

Flächennutzungsart	G-Faktor für Rückweisung
Siedlungsfläche	1
Grünland	2
Acker (Stoppeln)	2
Acker (gepflügt, frisch bestellt)	2
Nadelwald	1
Laubwald	1
Rübensschlag	2
Maisschlag	2
Wasser 1 (0,5 m Tiefe)	3
Wasser 2 (1,5 m Tiefe)	3
Wasser 3 (2,5 m Tiefe)	3
Wasser 4 (3,0 m Tiefe)	3

Tabelle 2: Bewertung der Ergebnisse der automatischen überwachten Klassifizierung

Klassifiziert als:	Siedlung	Grünland	Acker	Wald	Mais und Rübensschlag	Wasser
Prozent der Gesamtfläche von						
Siedlung	65	24	6	2	2	1
Grünland	3	76	2	12	7	-
Acker	0,5	6	87	2	3,5	1
Wald	1	5	-	91	3	-
Mais- und Rübensschlag	2	11	3	4	79	-
Wasser	0,3	1,7	1	-	-	97

Auf dieser Basis ist eine Bewertung des Analyseergebnisses möglich. Die in Tabelle 2 zusammengestellten Zahlen geben an, wieviel Prozent der tatsächlich real auf den Profilen vorhandenen Elemente der Klasse  $W_i$  automatisch der Klasse  $W_j$  im Ergebnis zugeordnet wurden. Die Hauptdiagonale enthält die Zahlen für eine richtige Zuordnung. Die Ergebnisse in Tabelle 2 verdeutlichen, daß die Sicherheit der Klassifizierung für die einzelnen Klassen bedeutende Unterschiede aufweist. Am sichersten wurde "Wasser" identifiziert, und die größte Unsicherheit bestand bei der Identifizierung von "Siedlung". Im Durchschnitt wurde mit einer Sicherheit der Identifizierung aus MKF-6-Aufnahmen von 80 % ein Wert erreicht, der für diese Art der überwachten automatischen Klassifizierung von Fernerkundungsdaten durchaus akzeptabel ist /15, 5/. Bei der Einschätzung ist jedoch zu bemerken, daß sie nur relativ zum visuellen Auswertergebnis erfolgt ist, das selbst mit gewissen Fehlern behaftet sein dürfte.

An dem vorliegenden Beispiel werden auch die Hauptprobleme der stochastisch überwachten Erkennung deutlich:

1. Die Festlegung von Musterobjekten als Trainingsklassen erfordert für jeden Datensatz die Kenntnis geeigneter Gebiete. Die Qualität dieser Zusatzinformationen bestimmt die Güte des Ergebnisses mit.
2. Der Einfluß unkontrollierter örtlicher Faktoren, wie z. B. Verunreinigungen, Standortbedingungen und Atmosphäre sind nicht auszuschließen. Daher ist die Repräsentanz der "Musterklassen" für das Objekt nicht gesichert. Auch innerhalb eines Datensatzes kann es zu einem ortsabhängigen Ansteigen der Fehlklassifikationen kommen.
3. Die Eigenschaften der Objekte werden durch die angenommenen Verteilungen nicht exakt beschrieben. Durch die formal-mathematische Beschreibung mit Normalverteilungen werden physikalische Fakten und Objekteigenschaften ungenügend berücksichtigt.
4. Inhomogene Objekte bzw. aus verschiedenen stark unterschiedlichen Teilobjekten bestehende Objekte sind mit diesem Verfahren schwierig erfaßbar und können u. U. zum Scheitern des Algorithmus für einen gesamten Datensatz führen.
5. Die Genauigkeit läßt sich im Einzelfall nicht exakt angeben, sie schwankt zwischen 60 und 90 % und müßte für jeden Datensatz und jede Klasse extra ermittelt werden, um die Sicherheit bzw. Güte der durchgeführten Klassifikation beurteilen zu können.

Diese Ursachen wirken sich insbesondere dann nachteilig aus, wenn der Zustand des Objektes bzw. seine stoffliche Zusammensetzung quantitativ bestimmt werden soll. Deshalb ist die Anwendung dieses Verfahrens, wie schon bemerkt, im wesentlichen auf die Erkennung der Objektart beschränkt.

### 2.3. Physikalisch überwachte Erkennung

Im Gegensatz zur stochastisch überwachten Erkennung werden bei der physikalisch überwachten Erkennung auch analytische Zusammenhänge für die quantitative Bestimmung der fachspezifischen Objektmerkmale herangezogen. Dazu werden auf der Grundlage verschiedener Untersuchungen der physikalischen Eigenschaften der Objekte Modelle ihres Remissionsverhaltens aufgestellt und in den Erkennungsalgorithmus mit einbezogen. Diesen Modellen liegt ebenfalls das Vektorkonzept zugrunde. Voraussetzung für die Aufstellung und Anwendung solcher Modelle ist eine genaue Definition der Objektklassen und ihre quantitative Abstufung. Durch die Berücksichtigung der fachspezifischen Merkmale und Gesetzmäßigkeiten wird hierbei über eine formale Anwendung mathematischer Algorithmen hinausgegangen.

#### 2.3.1. Fachspezifische und fernerkundungsspezifische Objektmerkmale

Für die Untersuchung der Beziehungen der verschiedenen Objektmerkmale zueinander können die Merkmale beliebiger Bodenobjekte unterteilt werden in solche, die direkt mit Methoden der Fernerkundung gemessen werden können und solche, deren aktuelle Werte nur indirekt ermittelt werden können /53/. Für die beiden Merkmalsgruppen wurden in /37/ die Begriffe "fernerkundungsspezifische Merkmale" und "fachspezifische Merkmale" eingeführt. Damit kommt bereits zum Ausdruck, daß in den einzelnen Fachdisziplinen bisher zur Definition der Objektzustände i. a. nicht die mit Fernerkundungsmethoden direkt meßbaren, also fernerkundungsspezifischen Merkmale benutzt wurden. Eine Zustandsänderung des Objektes muß sich jedoch, um mit Hilfe der Fernerkundung überhaupt erkennbar zu sein, in einer Änderung der aktuellen Meßwerte der fernerkundungsspezifischen Merkmale äußern.

Zu den fernerkundungsspezifischen Merkmalen gehören sowohl lokale Merkmale, die die Eigenschaften eines bestimmten Punktes charakterisieren, als auch regionale Merkmale, die Eigenschaften eines bestimmten Gebietes beschreiben. Lokale Merkmale, wie z. B. der spektrale Remissionskoeffizient, sind im allgemeinen leichter und mit geringerem Aufwand automatisch auswertbar, jedoch zeichnet sich gerade in jüngster Zeit durch die Einbeziehung regionaler Merkmale wie Textur und geometrische Form des Objektes eine Verbesserung der automatischen Auswertung von Fernerkundungsdaten bei speziellen Aufgaben ab /55/. Für die auch hier nötige Formalisierung der regionalen fernerkundungsspezifischen Merkmale existieren eine Reihe mathematischer Methoden, deren Eignung für die jeweilige Problemstellung untersucht werden muß. In diesem Zusammenhang werden auch Überlegungen zur Konstruktion weiterer, nicht oder nicht ausschließlich auf dem Vektorkonzept beruhender Erkennungsmodelle angestellt, die die Einbeziehung von nicht skalierbaren Eigenschaften oder Kontextmerkmalen gestatten /55/. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich bei den fernerkundungsspezifischen Merkmalen auf die Untersuchung der Remissionsmerkmale im Rahmen des vektoriellen Erkennungskonzeptes.

Unter den fachspezifischen Merkmalen werden insbesondere solche verstanden, die in der jeweiligen Fachdisziplin (Biowissenschaft, Geographie, Geologie) zur Zustandscharakterisierung eines Objektes benutzt werden. Die Auswahl der für die konkrete Beschreibung des Zustandes eines gegebenen Objektes notwendigen fachspezifischen Merkmale im Zusammenhang mit der gegebenen Erkennungsaufgabe, der Objektart sowie der für das jeweilige Fachproblem wesentlichen Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten ist ein für die Bearbeitung der Erkennungsaufgabe sehr wesentliches Problem. Sie kann nur in Zusammenarbeit mit den Fachwissenschaftlern der entsprechenden Fachdisziplinen erfolgen.

### 2.3.2. Induktive und deduktive Modelle bei der physikalisch überwachten Erkennung

Aus der internationalen Literatur kann man zwei prinzipielle Wege beim Herangehen an die Untersuchungen der Zusammenhänge von fachspezifischen und fernerkundungsspezifischen Merkmalen erkennen:

- a) Konstruktion eines theoretischen (deterministischen) Modells der Abhängigkeit der Remissionseigenschaften der Objekte von einigen wesentlichen Eigenschaften und Parametern als Einfach- und Mehrfachstreuung und Überprüfung der Resultate der theoretischen Rechnungen an experimentellen Daten mit Hilfe von Bodenmessungen oder Fernerkundungsaufnahmen.
- b) Messung der wesentlichsten Objekteigenschaften und der remittierten Strahlung an einigen "Norm-" oder Testobjekten, Ermittlung eines empirischen (statistischen) Modells meist in Form einer oder mehrerer Regressionsgleichungen.

Arbeiten von G. I. R. Soer /52/ und G. H. Suits /63, 64/ zeigen die Problematik der induktiven Herangehensweise. Soer stellte ein Modell für den Wasserhaushalt der Pflanzen auf und ging dabei von einer Betrachtung der Energiebilanz aus. Diese Gleichung umfaßt Komponenten des Strahlungsflusses, des Wärmeaustausches mit dem Boden und der Luft sowie die Verdunstungsenergie. In diese Gleichung gehen eine Vielzahl von Merkmalen und Faktoren ein, z. B. Reflexionskoeffizient des Objektes für kurz- und langwellige Strahlung, Emissionskoeffizient des Objektes, auftreffender Strahlungsfluß, Temperatur der Objekt Oberfläche, Temperaturgradient des Bodens, Lufttemperatur, Turbulenz und Windgeschwindigkeit, Rauheit der Objekt Oberfläche, Transpiration des Objektes und andere, von denen allerdings nur einige mit Fernerkundungsmethoden bestimmbar sind.

So könnte z. B. für größere Flächen mit bekannten Bodenverhältnissen und unter Berücksichtigung von meteorologischen Parametern durch Messung der Vegetationsoberflächentemperatur Rückschlüsse auf den aktuellen Wasserhaushalt der Pflanzen und die Bodenfeuchte gewonnen werden.

Diese Temperatur kann mit Fernerkundungsmethoden z. B. im Infraroten Spektralbereich gemessen werden.

G. H. Suitö stellte ein Modell des Remissionsverhaltens von Vegetationsobjekten auf. Dazu teilte er die Vegetationsobjekte in mehrere horizontale Schichten ein. Je nach Objektart und Entwicklungsstand können das zwei oder mehr sein, z. B. 1. Ähren - 2. Stengel und Blätter - 3. Stengel ohne Blätter. Innerhalb jeder Schicht werden die einzelnen Pflanzenelemente als homogen und zufällig verteilt angenommen. Alle Pflanzenteile werden in horizontale und vertikale Komponenten zerlegt. Die Parameter dieser Richtungskomponenten werden In-situ an statistisch verteilten Proben in Testfeldern bestimmt. Durch einige plausible Annahmen über die Strahlungsverteilung an den Grenzschichten der einzelnen Zonen kommt der Autor zu einem System von Differentialgleichungen, das die remittierte Strahlung beschreibt. Das anisotrope Verhalten der Vegetationsoberfläche wird durch den Einfluß der vertikalen Pflanzenteile erklärt und kann iterativ berechnet werden.

Nachfolgende Arbeiten von G. H. Suitö u.a. /65/ und I. E. Chance /10/ enthalten einen Vergleich der Resultate des Modells mit praktischen Messungen, die für einzelne Beispiele in der Regel in Übereinstimmung gebracht werden können. Jedoch weist sich der Einfluß weiterer, im Modell nicht enthaltener Faktoren als wesentlich stabilitätsmindernd, so daß die Ergebnisse nicht ohne weitere Annahmen bzw. Einschränkungen auf andere natürliche Bedingungen übertragbar sind.

Es muß daher eingeschätzt werden, daß sich theoretisch entwickelte, in zumindest wesentlichen Teilen deterministische Modelle nicht durchsetzen konnten. Es wurde verstärkt dazu übergegangen, aus der in-situ-Messung möglichst vieler Parameter für ein Testobjekt ein statistisches Modell zu konstruieren, was eine Vielzahl von Arbeiten insbesondere auch der letzten Jahre beweist /23, 40, 44, 66, 69/. Im Vordergrund stehen dabei Untersuchungen an den in der jeweiligen Region für die Wirtschaft wichtigen Vegetationsobjekten wie Weizen, Roggen, Gerste, Mais oder Weideflächen. Prinzipiell ist jedoch auch die Untersuchung anderer wirtschaftlich wichtiger und durch die Fernerkundung erfaßbarer Objekte, z. B. geologischer Art, möglich.

Die Gewinnung von Meßdaten erfolgt oft auf speziellen Testfeldern, auf denen definierte Versuchsbedingungen vorliegen bzw. realisiert werden können. Dabei wurden zunächst korrelative Zusammenhänge zwischen einzelnen fachspezifischen Merkmalen wie z. B. Biomasse, Chlorophyllgehalt, Entwicklungsphase (bei Pflanzen), Schadstoffkonzentration (im Wasser) oder chemische Zusammensetzung (bei Gesteinen und Böden) mit dem Remissionskoeffizienten oder der Strahldichte in einem oder mehreren Spektralbereichen gesucht. Damit wurden teilweise Genauigkeiten bei der quantitativen Bestimmung dieser Zustandsparameter bis zu 90 % erreicht /67/, jedoch gelten die abgeleiteten analytischen Zusammenhänge auch hier meist nur für das unmittelbar betrachtete Objekt und sind nicht übertragbar. Das hängt damit zusammen, daß im allgemeinen viele fachspezifischen Merkmale in komplexer Wechselwirkung untereinander stehen, sich also in komplizierter Art gegenseitig beeinflussen, so daß der Rückschluß von fernerkundungsspezifischen Merkmalen auf einzelne fachspezifische Merkmale nicht eindeutig ist. Auf Grund dieser fehlenden Eindeutigkeit sind die auf dieser Grundlage erarbeiteten Modelle sehr instabil gegen Änderungen der Aufnahmesituation oder des Aufnahmeortes.

Als Ausweg wird von einigen Autoren vorgeschlagen, nicht den absoluten Meßwert des Remissionsmerkmals, sondern dessen Verteilungsfunktion innerhalb eines bestimmten, vorher ausgegrenzten Gebietes zu untersuchen. So wurde in einem Projekt zur Schaffung eines Kataloges der Spektralmerkmale der Akademie der Wissenschaften der UdSSR /76/ vorgeschlagen, die Verteilungsfunktionen im fernerkundungsspezifischen Merkmalsraum durch Reihenentwicklungen zu approximieren und daraus dann unter Verwendung von Momenten höherer Ordnung die fachspezifischen Merkmale quantitativ zu bestimmen. Vorgeschlagen wird dazu die Approximation mit Edgeworth-Reihen. Im Ergebnis einer Reihe mathematisch-statistischer Annahmen erhält man daraus theoretisch die Möglichkeit, die entsprechenden Parameter als Erwartungswerte für eine gewisse Anzahl von Bildelementen zu bestimmen. Allerdings ist nach unseren Erfahrungen dazu zu bemerken, das insbesondere die Momente höherer Ordnung bei der Approximation der Verteilungsfunktion instabil werden und diese bei einer ungünstigen Approximation zu einem zu hohen Fehler führen können. Außerdem setzt das Verfahren die Einführung einer Anzahl sogenannter Mikroelemente innerhalb der Makroelemente voraus, wobei die Übertragbarkeit der für die Makroelemente geltenden Beziehungen auf die Mikroelemente problematisch sein könnte. Für die routinemäßige Auswertung von Fernerkundungsdaten erscheint dieser Lösungsweg auch wegen seiner Kompliziertheit und des damit verbundenen voraussichtlichen hohen Rechenaufwandes zur Zeit noch nicht praktikabel.

Eine andere Methode zur Ausnutzung höherer Momente der Verteilung wurde nach einem Vorschlag in /17/ von R. Söllner auch an MKF-6-Daten vom DDR-Territorium geprüft /56/.

Dazu wurde der Pearsonkoeffizient als Maß für die Schiefe der Verteilung in 4 verschiedenen Entwicklungsphasen bei unterschiedlichen Objekten berechnet und ein deutlicher und stabiler Zusammenhang gefunden. Mit Hilfe dieses bisher leider nur an wenigen Beispielen überprüften und nachgewiesenen Zusammenhangs ließe sich aus einer gegenüber Zeitverschiebungen in der Entwicklung der Vegetationsobjekte invarianten tabellierten Aufstellung dieses Merkmals aus jedem Fernerkundungsdatensatz an Hand der Schiefe der Verteilung innerhalb der vorher rayonierten Objektarten der jeweilige Entwicklungsstand, z. B. in Form der phänologischen Phase nach der FEEKES-Skala, bestimmen.

Solche Sachverhalte, in denen sich einzelne fachspezifische Merkmale eindeutig aus einem fernerkundungsspezifischen Parameter ableiten lassen, sind aber leider eine Ausnahme, im allgemeinen sind die Beziehungen der einzelnen Merkmale untereinander so komplex und kompliziert, daß sich, wie schon weiter oben bemerkt, keine eindeutigen stabilen Abbildungen zwischen fernerkundungsspezifischen Merkmalen und einzelnen fachspezifischen Merkmalen finden lassen.

### 2.3.3. Vorschlag für ein Formalisierungsprinzip im Rahmen des physikalisch überwachten Erkennungskonzeptes

Da die Eindeutigkeit des Rückschlusses aus fernerkundungsspezifischen auf fachspezifische Merkmale Grundvoraussetzung für eine automatische Datenauswertung ist, wird es erforderlich, solche Merkmale einzuführen, für die ein eindeutiger Rückschluß nachweisbar ist. Solche Merkmale sind dann aber nicht mehr die fachspezifischen Einzelmerkmale, sondern entkorrelierte Merkmale einer höheren Generalisierungsstufe, also z. B. Merkmalskomplexe /53/.

Auf dieser Grundlage basiert das in Abb. 2 dargestellte Schema für ein Formalisierungsprinzip der physikalisch überwachten Erkennung mit Hilfe von Fernerkundungsdaten. Dazu sind vorher Grundlagenuntersuchungen am Boden zur Aufstellung eines an die konkrete Erkennungsaufgabe angepassten Merkmalskataloges nötig. Dieser enthält zunächst ausgehend von der Aufgabenstellung und dem Erkennungsziel eine Anzahl a-priori in Frage kommender fach- und fernerkundungsspezifischer Einzelmerkmale. Die Beziehungen zwischen diesen Einzelmerkmalen werden mit statistischen Methoden untersucht. Mit Hilfe der entsprechenden Verfahren der Merkmalsextraktion (z. B. Faktorenanalyse) werden daraus solche generalisierte Merkmalskomplexe gebildet, die für die vorgegebene konkrete Erkennungsaufgabe informativ sind. Diese müssen die Bedingung der Eindeutigkeit der Abbildung der fernerkundungsspezifischen auf die fachspezifischen Merkmalskomplexe erfüllen. Diese Abbildung wird wiederum mit Hilfe statistischer Methoden (z. B. Regressionsanalyse) untersucht und ein entsprechendes statistisches Abbildungsmodell aufgestellt. Damit sind die Untersuchungen zum Merkmalskatalog abgeschlossen und dieser kann für die Auswertung routinemäßig gewonnener Fernerkundungsdaten benutzt werden.

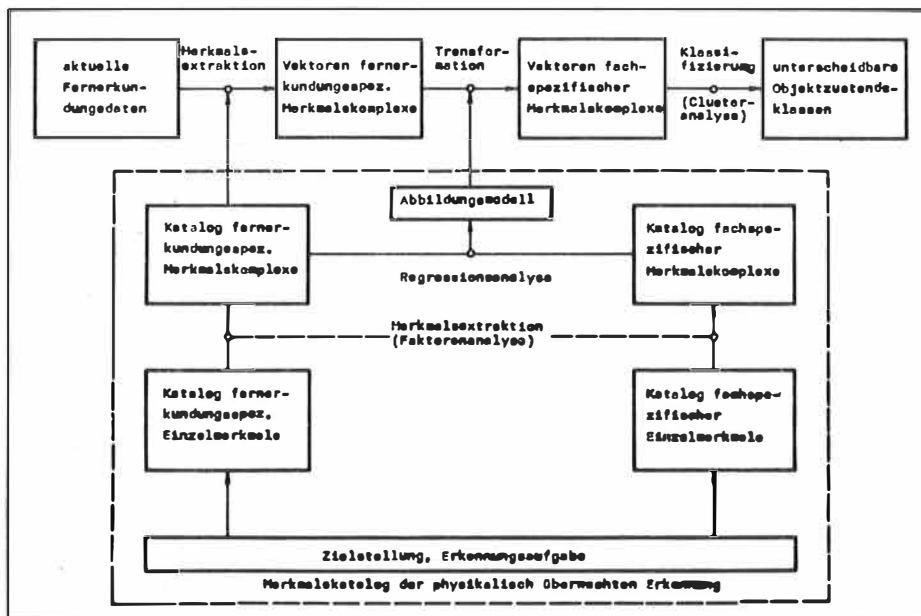


Abb. 2 Formalisierungsprinzip der physikalisch überwachten Erkennung

Dazu werden die aktuellen Fernerkundungsdaten entsprechend den bei der Merkmalsextraktion gefundenen und im Merkmalskatalog festgehaltenen Vorschriften in Vektoren der fernerkundungsspezifischen Merkmalskomplexe umgerechnet. Mit der anschließenden Transformation auf der Grundlage des im Merkmalskatalog aufgestellten statistischen Modells erfolgt die Berechnung der eindeutig zugeordneten Vektoren fachspezifischer Merkmalskomplexe. Mit Hilfe von Clusteranalyseverfahren /58/ können die fachspezifischen Merkmalsvektoren zu Ballungen zusammengefaßt werden. Der jeder Ballung zugeordnete Objektzustand wird durch die Intensitäten der Merkmalskomplexe des Repräsentanten (z. B. Mittelwertvektor) der Ballung quantitativ bestimmt.



Die bei diesem Modell benutzten fachspezifischen Merkmalskomplexe sind nicht mit den ursprünglichen fachspezifischen Zielgrößen (z. B. Biomasse) identisch, entsprechen aber den tatsächlichen, mit Fernerkundungsverfahren gewinnbaren Informationen. Die Vorschriften für die Berechnung von Vektoren der fernerkundungsspezifischen Merkmalskomplexe sowie für die nachfolgende Transformation sind Bestandteil von Merkmalskatalogen.

Die Auswahl der fernerkundungsspezifischen Merkmale richtet sich nach dem zur Verfügung stehenden Fernerkundungssystem und kann die spektrale Remission in einzelnen Spektralbereichen entsprechend der jeweiligen spektralen Auflösung des Fernerkundungssystems, aber auch andere, z. B. regionale, fernerkundungsspezifische Merkmale umfassen. Gelingt es nicht, eine eindeutige Abbildung auf die fachspezifischen Merkmalskomplexe zu finden, so sind die Objektzustände entsprechend der Festlegung aus der Zielstellung mit dem vorgegebenen Fernerkundungssystem (auch theoretisch) nicht erkennbar. In diesem Falle muß entweder durch Änderung der Aufgabenstellung in der Weise, daß sich andere Objektzustände als zu unterscheidende Klassen ergeben und damit die Auswahl und Abstufung der fachspezifischen Merkmale und letztlich die Merkmalskomplexe geändert werden oder durch eine Änderung der Meßvorschrift die Transformation der Signalfunktion in die interne Beschreibung verändert werden, so daß sich andere Merkmalsräume ergeben.

Das kann durch Verbesserung oder Erweiterung des Fernerkundungssystems (z. B. thermisches Infrarot oder Mikrowellen) erfolgen, so daß mehr Informationen zur Verfügung stehen. Damit muß von neuem geprüft werden, ob in diesen zusätzlichen Kanälen die vorher fehlende Information enthalten ist. Durch die Berücksichtigung der fachspezifischen Merkmale und Gesetzmäßigkeiten wird hierbei über eine formale Anwendung mathematischer Algorithmen hinausgegangen.

Da die Merkmalskomplexe einen konkreten physikalischen Inhalt besitzen, entfällt die Suche nach Musterklassen im jeweiligen Datensatz. Es werden statt dessen lediglich Normobjekte zur Eichung der Sensoren bzw. Eliminierung von Störeinflüssen benötigt. Zur Klassifizierung können unüberwachte Verfahren benutzt werden, wodurch subjektive Einflüsse und Fehler durch falsche Normklassenauswahl entfallen. Das Verfahren vermeidet so einige der wesentlichen Probleme der bisherigen überwachten Klassifizierungsverfahren und läßt eine Verbesserung der Auswertung und eine Erweiterung der Anwendbarkeit der Fernerkundung erwarten.

#### 2.3.4. Verfahren zur Merkmalsextraktion

Zur Bildung von generalisierten Merkmalen werden im allgemeinen Verfahren zur Entkorrelierung benutzt, da eine wichtige Eigenschaft der generalisierten Merkmalskomplexe darin besteht, daß sie untereinander keine Korrelation mehr aufweisen. Die Meßergebnisse der Einzelmerkmale dagegen weisen i. a. Redundanz auf, die durch Korrelationen der Merkmale untereinander hervorgerufen wird. Diese Redundanz ist in gewissem Sinne "überflüssige Information", sie belastet die Speicher mit vielen unnützen Daten. Durch die Anwendung entsprechender Verfahren zur Entkorrelierung der fachspezifischen Merkmale ist im allgemeinen auch eine Reduktion der Datenmenge erreichbar, wodurch die eingesetzten automatischen Klassifikatoren effektiver arbeiten können.

Ein solches Verfahren ist z. B. das in /11, 54/ angegebene Verfahren der Hauptachsentransformation. Das Koordinatensystem des durch die  $n$  Merkmale aufgespannten orthogonalen Merkmalsraums wird so gedreht, daß sich die Information auf möglichst wenige Achsen des neuen Koordinatensystems verteilt. Die neuen sekundären Merkmale können dann in wesentliche (mit hohem Informationsgehalt) und unwesentliche (mit geringem Informationsgehalt) eingeteilt werden, die weggelassen werden können. Ein Nachteil bei diesem Verfahren ist, daß für die sekundären Merkmale nicht ohne weiteres eine physikalische Bedeutung angegeben werden kann.

Es läßt sich also nicht sagen, welche primären Merkmale sich in welchen sekundären Merkmalen niederschlagen bzw. aus welchen primären Merkmalen das jeweilige sekundäre Merkmal besteht.

Ein anderes Verfahren zur Entkorrelierung ist die Faktorenanalyse /70/. Dabei wird ausgehend von einem linearen Modell die Existenz entkorrelierter sekundärer Merkmale angenommen und die Faktoren bestimmt, mit denen jedes Primärmerkmal in diese sekundären Merkmale eingeht. Die sekundären Merkmale stellen also gewissermaßen Komplexe der Primärmerkmale dar, wobei der Anteil der einzelnen Primärmerkmale durch die Faktoren bestimmt ist. Die physikalische Bedeutung der Merkmalskomplexe ist somit durch die Kenntnis der Faktoren gegeben. Die Merkmalskomplexe besitzen untereinander keine Korrelationen mehr. Ausführlicher wird auf die Faktorenanalyse als statistisches Untersuchungsverfahren im Kapitel V eingegangen.

Die Konstruktion der Merkmalskomplexe hängt von der Auswahl und der Quantisierung der Primärmerkmale ab, damit also von der Festlegung der zu beschreibenden Zustände des Untersuchungsobjektes. Andererseits müssen jedoch die Merkmalskomplexe, um für die Lösung der Objekterkennungsaufgabe geeignet zu sein, die Forderung der Eindeutigkeit der Abbildung der fernerkundungsspezifischen Merkmale auf die fachspezifischen Merkmalskomplexe erfüllen. Damit erhält die Definition des Objektzustandes und seiner quantitativen Stufen außer dem fachspezifischen Aspekt auch einen fernerkundungsspezifischen Aspekt.

Bei der Bildung von Merkmalskomplexen aus den fernerkundungsspezifischen Merkmalen geht man zweckmäßigerweise so vor, daß möglichst viele Störfaktoren, beispielsweise Atmosphäreninflüsse oder Aufnahmebedingungen, bei der Informationsreduktion gleichzeitig mit eliminiert werden. Erste Ansatzpunkte in dieser Richtung sind bereits seit mehreren Jahren in der Literatur zu finden, so wurde beispielsweise durch verschiedenartige Kombinationen mehrerer, meist zweier Kanäle von routinemäßig arbeitenden Fernerkundungsaufnahmesystemen ein Indikator der Vitalität von Vegetationsobjekten berechnet /3, 16, 21, 24, 68, 74/. Dieser Indikator ist in dem hier dargelegten Sinne bereits ein allerdings in den meisten Fällen unsystematisch und empirisch ermittelter fernerkundungsspezifischer Merkmalskomplex.

Praktisch ist es jedoch unmöglich, alle auf das Objekt, das Aufnahmesystem und den Übertragungskanal einwirkenden Störungen zu erfassen oder zu eliminieren. Die Gesamtheit dieser unberücksichtigten Faktoren wirkt in ihrer Summe wie eine zufällige Störgröße auf den Zustand und damit auf die fernerkundungsspezifischen Merkmale ein. Sowohl die fernerkundungsspezifischen als auch die fachspezifischen Merkmale müssen daher als Zufallsgrößen und die gewonnenen Meßwerte als statistisch verteilte Realisierungen dieser Zufallsgrößen interpretiert werden. Aus diesem Grunde kann die geforderte eindeutige Abbildung keine deterministische Transformationsbeziehung sein. Es muß sich vielmehr um ein statistisches Modell handeln. Die erreichbaren Aussagen sind unter diesen Bedingungen immer Wahrscheinlichkeitsaussagen. Untersuchungen zur Systematisierung und Ausschaltung von Störungen werden u. a. auch im Methodisch-diagnostischen Zentrum für Fernerkundung des Zentralinstituts für Physik der Erde durchgeführt /20/ .

Das Datenmaterial für die Berechnungen wird mit Hilfe von Messungen an Test- oder Beispielobjekten unter natürlichen Bedingungen gewonnen. Dabei werden auch die fernerkundungsspezifischen Merkmale am Boden gemessen, es ist dann ihre Übertragbarkeit auf die Fernerkundungsdaten von kosmischen bzw. Flugzeugaufnahmen gesondert zu untersuchen und gegebenenfalls entsprechende Transformationsbeziehungen zu berücksichtigen.

### 3. Schaffung der experimentellen Voraussetzungen

Zur Qualifizierung des physikalischen Verständnisses über die Zusammenhänge zwischen Remissionsmerkmalen und fachspezifischen Merkmalen natürlicher Objekte sowie zur Konkretisierung der dafür in Kapitel II formulierten theoretischen Modellvorstellungen sind experimentelle Untersuchungen der spektralen Charakteristika natürlicher Objekte in Testgebieten erforderlich. Dabei kommt es auf die simultane Erfassung der fernerkundungsspezifischen Merkmale (z. B. des gerichteten spektralen Remissionskoeffizienten) und der zur fachlichen Beschreibung des Objektzustandes nötigen Merkmale (z. B. Objektgröße, chemische Zusammensetzung oder Entwicklungsphase) an.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die dazu erforderlichen Experimente aus den bereits in der Einleitung formulierten Gründen auf Bodenmessungen in Testgebieten konzentriert. Kapitel III beschäftigt sich mit den experimentellen Voraussetzungen für diese Untersuchungen, im Kapitel IV werden anschließend methodische Grundlagen der Durchführung der Experimente diskutiert. Die Auswertung der dabei gewonnenen Daten erfolgt durch heuristische Interpretationen, gestützt durch Analysen mit Methoden der mathematischen Statistik. Zur Gewährleistung der in diesem Zusammenhang nötigen Genauigkeit und Stabilität der Meßwerte sind spezielle technische und methodische Voraussetzungen zu erfüllen. Diese Probleme werden im Abschnitt 3.1. betrachtet.

Abschnitt 3.2. gibt eine Analyse des internationalen Standes der Gerätetechnik auf diesem Gebiet. Aufbauend auf dieser Analyse sowie den im Abschnitt 3.1. abgeleiteten meßmethodischen Anforderungen wurde am Zentralinstitut für Physik der Erde ein mobiler Bodenmeßkomplex realisiert, der im Abschnitt 3.3. vorgestellt wird. Kernstück des Bodenmeßkomplexes bildet ein an einem Ausleger befestigter Sensorkopf mit zwei Geräten zur Strahlungsmessung nach unterschiedlichen Meßprinzipien: einem Feldspektrometer BSP-83 und einem Mehrkanalradiometer der Firma BARNES.

Mit dem Feldspektrometer werden die gerichteten spektralen Remissionskoeffizienten seriell im Wellenlängenbereich von 0,4 - 1,1  $\mu\text{m}$  quasikontinuierlich gemessen. Das Radiometer mißt Strahl-dichteäquivalente der remittierten Objektstrahlung in 8 Kanälen im Wellenlängenbereich von 0,45 - 12,5  $\mu\text{m}$  parallel.

Schwerpunkt der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten meßtechnischen Entwicklungen war das Feldspektrometer BSP-83, das hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit gegenüber international vergleichbaren Entwicklungen eine exponierte Stellung einnimmt. Das dabei in seiner technischen Realisierung neuartige Meßprinzip besteht in der Quasisimultanmessung der spektralen Globalstrahlung und der remittierten Objektstrahlung und wird im Abschnitt 3.3. diskutiert. Der persönliche Anteil des Autors bezieht sich dabei auf die grundlegenden konzeptionellen Arbeiten, die sich bei wesentlichen elektronischen Baugruppen bis hin zur Entwicklung und technischen Realisierung erstreckten.

Der experimentelle Nachweis der mit dem Gerät erreichten Parameter erfolgt im Abschnitt 3.4.

#### 3.1. Anforderungen an die Messung des spektralen gerichteten Remissionskoeffizienten

##### 3.1.1. Anforderungen aus den speziellen Beleuchtungsbedingungen einer natürlichen Szene

Bei der Bestimmung des Remissionskoeffizienten eines Objektes muß die Messung unter Geländebedingungen erfolgen. Das ist einerseits nötig, weil die in einer natürlichen Szene vorliegenden Beleuchtungsbedingungen im Labor kaum rekonstruierbar sind und andererseits viele Objekte, insbesondere landwirtschaftliche oder forstwirtschaftliche Objekte als Ensemble statistisch verteilter Einzelteile wie Stengel, Blätter oder Nadeln, Blüten oder Früchte usw. ein anderes Remissionsverhalten zeigen als einzelne Objektteile unter bestimmten Lagebedingungen /29/.

Unter Umständen kann sogar die statistische Verteilung und Lage der einzelnen Objektbestandteile ein Zustandsparameter für das Objekt sein, der zu charakteristischen Änderungen des Remissionskoeffizienten führt. Die Messung des Remissionskoeffizienten erfolgt in einzelnen Spektralbereichen, um spezifische Änderungen des spektralen Verlaufs des Remissionskoeffizienten erkennen zu können und so den Informationsgehalt multispektraler Datenerfassungsgeräte auszunutzen.

Zur Messung des spektralen Remissionskoeffizienten im Gelände sind speziell dafür konzipierte Spektrometer nötig. Diese müssen unabhängig von der Netzspannung arbeiten, klein, leicht und handlich sein und insbesondere unter den extrem schwankenden Beleuchtungsverhältnissen, denen eine natürliche Szene ausgesetzt ist, stabile Meßwerte liefern. Dazu muß das Meßgerät gleichzeitig die aus allen Richtungen des oberen Halbraumes auf das Meßobjekt einfallende Strahlung und die vom Objekt remittierte Strahlung in dem jeweiligen Spektralkanal messen. Der Meßwert der aus dem oberen Halbraum einfallenden Globalstrahlung hängt dabei von der Bewölkung und dem Atmosphärenzustand ab. Der Fehler, der durch das Anbringen des Meßgerätes sowie entsprechender Haltevorrichtungen entsteht, muß dabei vernachlässigt werden.

Die Messung der remittierten Strahlung erfolgt i. a. in einer definierten Richtung. Diese Beschränkung ist aus technischen und Aufwandsgründen nötig. Man spricht in diesem Fall von dem gerichteten spektralen Remissionskoeffizienten. In den meisten Arbeiten wird dabei die vertikale Blickrichtung als Vorzugsrichtung ausgewählt. Für Grundlagenuntersuchungen zum Remissionsverhalten von bestimmten Objekten in Abhängigkeit von Beleuchtungsverhältnissen wurden jedoch auch Messungen der remittierten Strahlung in andere Richtungen sowie der Indikatrix vorgenommen /32/.

Dabei ist bekannt, daß natürliche Objekte keine isotrope Indikatrix besitzen. Eine Änderung der Verteilung der Globalstrahlung führt i. a. daher auch zu einer Änderung des Absolutwertes der remittierten Strahlung, da die einzelnen Richtungen einen unterschiedlichen Beitrag zu der in die Meßrichtung remittierten Strahlung liefern.

Bei der Messung der einfallenden Strahlung erfolgt eine Integration über alle Richtungen des oberen Halbraumes. Dazu werden Streuscheiben oder Weißtafeln benutzt. Auch hierbei werden die verschiedenen Richtungen der Globalstrahlung unterschiedlich bewertet, was in einer besonderen Indikatrix des Meßgerätes zum Ausdruck kommt. Unterschiede in der Indikatrix von Meßgerät und Meßobjekt führen dazu, daß bei unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen, d. h. unterschiedlichen Bewölkungsverteilungen oder verschiedenen Sonnenhöhen am gleichen Objekt unterschiedliche Meßwerte des Remissionskoeffizienten gewonnen werden.

In der Praxis läßt sich eine völlige Übereinstimmung des Indikatrixverhaltens von Objekt und Meßgerät nicht erreichen. Man kann jedoch durch Probemessungen für die einzelnen Objekte untersuchen, wie groß die Unterschiede tatsächlich sind und zu welchen Meßfehlern sie führen bzw. unter welchen meteorologischen Bedingungen die Messungen durchgeführt werden können, um bestimmte Fehlergrenzen nicht zu überschreiten.

Zur Bestimmung des Remissionskoeffizienten müssen, wie bereits bemerkt, zwei Messungen im jeweiligen Spektralkanal gleichzeitig oder quasi gleichzeitig durchgeführt werden. Dies bedeutet, daß die Zeitspanne zwischen der Messung der Globalstrahlung und der vom Objekt remittierten Strahlung so klein sein muß, daß sich die Beleuchtungsverhältnisse vom Beginn der ersten bis zum Ende der zweiten Messung nicht verändern können.

Insbesondere bei wechselnder, sehr schnell ziehender Bewölkung kann sich die Änderung der Bestrahlungsstärke der Globalstrahlung sehr schnell vollziehen. Entsprechend den in den letzten Jahren am Zentralinstitut für Physik der Erde gesammelten experimentellen Erfahrungen darf diese Zeitspanne unter den mitteleuropäischen meteorologischen Bedingungen zur Realisierung der für eine sinnvolle Auswertung erforderlichen Meßprogramme den Wert von ca. 0,5 sec nicht übersteigen. Detailliertere Ausführungen hierzu sind in /72/ nachzulesen.

### 3.1.2. Anforderungen aus speziellen Objekteigenschaften

Wie im vorhergehenden Abschnitt bereits kurz erwähnt, ist die Messung des spektralen Remissionskoeffizienten im Gelände u. a. deshalb nötig, um die Verteilung der in statistischer Art angeordneten Objektelemente zu berücksichtigen. Dies erfordert jedoch auch, daß die Fläche, über der die Messung erfolgt, eine bestimmte Mindestgröße hat, so daß die statistische Anordnung der Objektelemente gesichert ist. Bei zu kleiner Meßfläche können zufällige Schwankungen in der Anordnung der Elemente zu Änderungen des Meßwertes der remittierten Strahlung führen. Erst ab einer bestimmten Mindestgröße mit einer ausreichend großen Anzahl von Objekten bzw. Objektelementen ist die Stabilität ihrer Anordnung und damit des Meßwertes gesichert. Diese Mindestgröße hängt damit von der Größe der Einzelstrukturen der Objekte ab und nimmt für verschiedene Objekte unterschiedliche Werte an. Zur Abschätzung der Mindestgröße der Integrationsfläche kann der Variationskoeffizient  $V$  benutzt werden. Dazu werden Testmessungen mit verschiedenen Integrationsflächen durchgeführt und für jede Flächengröße der Variationskoeffizient der Einzelmessungen bestimmt. Wie in /71/ dargestellt, sinkt  $V$  mit größer werdender Meßfläche bis auf einen konstanten Wert ab. Diese Meßfläche, bei der sich ein konstanter Wert einstellt, kann als Mindestmeßfläche angesehen werden. Solche Untersuchungen können auch an hochauflösenden Luftaufnahmen durchgeführt werden, in dem die Größe des Abtastpixels variiert wird. Die Realisierung der geforderten Meßfleckgröße wird durch den Öffnungswinkel und die Meßgeräteeöhe über dem Meßobjekt bestimmt. Generell ist eine größere Höhe über dem Meßobjekt und ein kleinerer Öffnungswinkel für die Stabilität der Meßergebnisse günstiger, auch weil dadurch eine geringere Verfälschung der Einstrahlung durch den Einfluß der Meßgeräte erfolgt. Dem sind jedoch technische Grenzen gesetzt, so daß man einen Kompromiß zwischen den technischen Möglichkeiten (Auslegerhöhe, mechanische Stabilität usw.) und der zulässigen Verfälschung der Meßwertes schließen muß. Dazu sind in erster Linie Untersuchungen der Objektindikatrix nötig, um den zulässigen Öffnungswinkel zu bestimmen. In Abbildung 3 ist der Zusammenhang zwischen Meßfläche, Abstand zwischen Objekt und Meßgerät und Öffnungswinkel graphisch dargestellt.

Detailliertere Untersuchungen zur Indikatrix einiger ausgewählter Vegetationsobjekte sind in /17/ durchgeführt worden. Daraus ist ersichtlich, daß in einem kleinen Bereich um die vertikale Blickrichtung das Remissionsverhalten der Objekte konstant bleibt. Dies kann bei der Konzipierung des Meßgerätes berücksichtigt werden, wenn als Vorzugsmeßrichtung die Vertikale festgelegt ist.

Auf Grund der teilweise sehr stark unterschiedlichen Remissionskoeffizienten eines Objektes in verschiedenen Spektralbereichen, der spektralen Empfindlichkeitskurve des Sensors sowie den schwankenden Einstrahlungsbedingungen muß das Meßgerät einen hohen Dynamikbereich des Eingangssignals verarbeiten. Rechnet man mit einem Remissionskoeffizienten zwischen 1 % bis 100 %, der mit 2 % Genauigkeit vermessen werden soll, mit Schwankungen in der Empfindlichkeit des Sensors zwischen 400 und 900 nm von ca. 1 : 20, und Schwankungen in der Einstrahlung von 1 : 10, so ergibt sich für das Meßgerät ein geforderter Dynamikbereich von ca.  $10^5$  bis  $10^6$ .

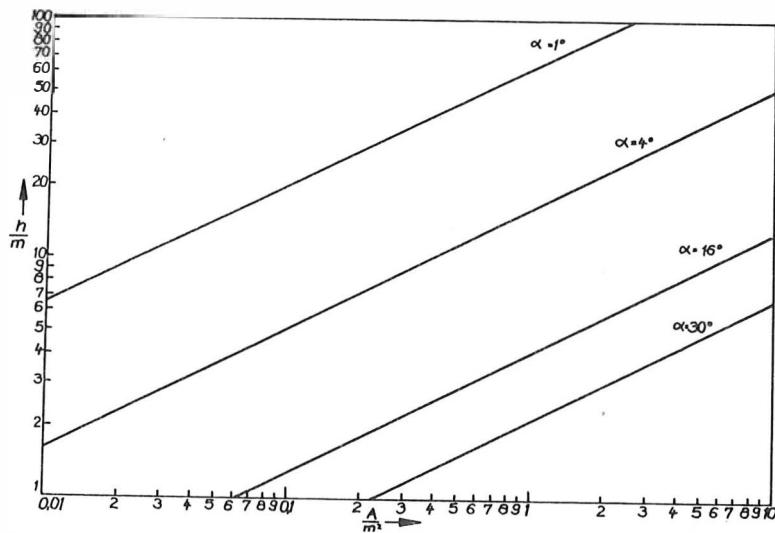


Abb. 3: Abhängigkeit der Meßfleckgröße von der Meßhöhe und vom Öffnungswinkel des Objektivs

$\alpha$ : Öffnungswinkel des Objektivs

$h$ : Höhe des Objektivs über dem Meßobjekt

$A$ : Meßfleckgröße

Andere Einflußfaktoren wie Wind, Temperatur oder Feuchtigkeit können ebenfalls einen jeweils objektspezifischen Einfluß auf den Remissionskoeffizienten haben, in dem sie beispielsweise die Objektmorphologie beeinflussen. Solche Einflüsse sind jeweils zu untersuchen und gegebenenfalls Methoden zu ihrer Bestimmung und Eliminierung in Abhängigkeit vom jeweiligen Untersuchungsobjekt auszuarbeiten.

### 3.2. Stand der experimentellen Gerätetechnik

Meßgeräte zur Untersuchung der spektralen Remissionseigenschaften sind heute an jedem Forschungszentrum, das sich mit Grundlagenforschung zur Fernerkundung befaßt, vorhanden.

International wurde bereits mit dem Beginn der verstärkten Forschungen zu den Grundlagen der Fernerkundung Anfang der 70er Jahre begonnen, Bodenexperimente als Ergänzung und zur Gewinnung wichtiger Zusatzinformationen parallel mit den Experimenten zur Datengewinnung von fliegenden Plattformen aus durchzuführen. Diese Bodenexperimente wurden je nach Aufgabenstellung, Ziel der Untersuchungen, Objektarten und technischen Möglichkeiten mit unterschiedlichen Ausrüstungen durchgeführt, beschränkten sich z. B. auf eine verbale Beschreibung des Testgebietes bezüglich der dort vorhandenen Objekte und ihres Zustandes, umfaßten die in der jeweiligen Fachdisziplin üblichen Messungen zur Untersuchung des Objektzustandes und Erfassung wichtiger Einflußgrößen im Testgebiet oder umfaßten auch Messungen der fernerkundungsspezifischen Merkmale des Objektes.

So wird in /22/ über ein Luftbildexperiment aus den Jahren 1969-71 berichtet, bei dem am Boden eine umfangreiche Gegenerkundung erfolgte. Neben der Identifikation der einzelnen im Testgebiet vorhandenen Bodenobjekte wurden hydrologische Parameter aus Grundwasserbeobachtungen, Bodenfeuchtemessungen, Regenmengen - und Flußwassermengenuntersuchungen sowie der prozentuale Bedeckungsgrad der Vegetation ausgewertet.

Mit dem Einsatz von Feldspektrometern zur Messung von optischen Eigenschaften, wie z. B. dem spektralen gerichteten Remissionskoeffizienten der Objekte, wurden eine Reihe mehr oder weniger aufwendig ausgerüsteter Bodenmeßlaboratorien oder Bodenmeßkomplexe bekannt. Der Grund für den Aufbau solcher Meßkomplexe ist der, daß zur Bestimmung der fernerkundungsspezifischen Merkmale zusätzlich zur Messung mit dem Spektrometer eine Reihe von Parametern und Einflußgrößen parallel mitbestimmt werden müssen, um die Ergebnisse der Strahlungsmessungen auswerten und interpretieren zu können.

In der Internationalen Literatur gibt es eine Reihe von Arbeiten /13, 14, 17, 31, 32, 33, 51/, in denen solche Zusammenhänge bzw. Störeinflüsse untersucht und Versuche zu ihrer Erfassung und Systematisierung gemacht werden.

In diesen Arbeiten werden mögliche Ursachen der oft stark unterschiedlichen Meßergebnisse verschiedener Autoren aufgezeigt. Damit erhält der Experimentator wichtige Hinweise auf Parameter, die bei Bodenmessungen zu beachten sind.

Arbeiten von K. T. Kriebel /32, 33/ beschäftigen sich z. B. vor allem mit der Winkelabhängigkeit der remittierten Strahlung. Er geht dabei davon aus, daß die remittierte Strahlung in einer beliebigen Richtung durch die Überlagerung der aus jedem Winkelement einfallenden gerichteten Strahlung unter Berücksichtigung des entsprechenden "bidirektionalen" spektralen Remissionskoeffizienten entsteht. Deshalb hängt für jede beliebige Richtung bei gleicher einfallender Gesamtstrahlung die remittierte Strahlung und damit der gerichtete spektrale Remissionskoeffizient von der Verteilung der einfallenden Strahlung ab (s. Abschnitt 3.1.1.). Dies ist für praktische Messungen besonders wichtig, da damit auch solche Faktoren wie Sonnenhöhe und Wolkenverteilung am Himmel die Remissionsmessungen natürlicher Objekte insitu beeinflussen können. In weiteren Arbeiten geht Kriebel auch der Frage nach, inwieweit sich solche Einflüsse theoretisch begründen und damit vielleicht rechnerisch eliminieren lassen.

Fedshenko führte Bodenexperimente sowie Messungen vom Hubschrauber aus durch. Dabei wurden vor allem verschiedene Bodenarten /14/ sowie landwirtschaftliche Kulturen /31/ untersucht. Zur Messung wurden selbstentwickelte Spektrometer verschiedener Bauart benutzt. In den Ausführungen über die Vorbereitung und Auswertung der Experimente geht er auch auf Störfaktoren und zu berücksichtigende Einflußgrößen ein.

Weiterhin wird der Größe der Meßfläche im Zusammenhang mit der Größe der Einzelstrukturen der Objekte, dem projektiven Bedeckungsgrad bei Pflanzen, dem Einfluß von Objektuntergrund- und -umgebung, Schatten, Objektgeometrie usw. Aufmerksamkeit gewidmet.

Zur Erfassung dieser Einflüsse bzw. Ausschaltung von Störungen wurden zusätzlich zu den eigentlichen Strahlungsmeßgeräten weitere Meßeinrichtungen und Sensoren benötigt und in Meßkomplexen zusammengefaßt. Solche Meßkomplexe können stationär /61/ mit entsprechend fest installierten Sensoren zur Bestimmung der jeweils interessierenden Objektmerkmale angelegt oder auf mobilen Meßfahrzeugen montiert sein /7, 9, 39/. Mobile Meßkomplexe sind allerdings trotz ihrer teilweise aufwendigen Ausrüstung nicht in der Lage, alle zur Charakterisierung des Objektzustandes nötigen fachspezifischen Merkmale zu messen. Sie werden deshalb im allgemeinen auf stationären Testgebieten zur Messung der spektralen Remissionscharakteristiken eingesetzt, während die Gewinnung der fachspezifischen Merkmale parallel dazu mit Hilfe der üblichen fest installierten Meßgeräte erfolgt. Als Strahlungsmeßgeräte werden spezielle Feldspektrometer benutzt, die teilweise kommerziell, in Kooperation mit Industriebetrieben oder in Eigenbau beschafft bzw. hergestellt werden.

Bei der Messung wird der das jeweilige Objekt charakterisierende gerichtete spektrale Remissionskoeffizient bestimmt. Für die dazu nötige gleichzeitige Messung der aus dem oberen Halbraum einfallenden Strahlung und der in der jeweils betrachteten Richtung remittierten Strahlung werden verschiedene Methoden benutzt:

- a) Verwendung von zwei parallel arbeitenden Geräten, von denen eines auf das Objekt gerichtet ist, das andere die einfallende Strahlung mißt,
- b) aufeinanderfolgende Messung der Objektstrahlung und einer von der einfallenden Strahlung beleuchteten Weißtafel,
- c) Kippen des Meßgerätes und aufeinanderfolgende Messung in Objekt- und Himmelsrichtung,
- d) Verwendung von Streuscheiben, Umlenkspiegeln oder Strahlteilern zur aufeinanderfolgenden Messung der einfallenden und remittierten Strahlung.

Zu den am meisten eingesetzten kommerziellen Spektrometern gehören Modelle von Exotech, Matra EG & G und Barnes Corp..

Für einige Zwecke, insbesondere beim Vergleich mit den von Fernerkundungssensoren gewonnenen Daten, werden auch Radiometer eingesetzt, um absolute Strahlungsgrößen zu messen /16/. Diese Messungen sind dann ohne spezielle Normierungsverfahren nur mit den parallel dazu gewonnenen Fernerkundungsdaten vergleichbar.

Im Rahmen der Interkosmoskooperation gibt es seit einigen Jahren Bestrebungen zur Vereinheitlichung der Geräteausrüstungen für Feldmessungen zur Fernerkundung. Nach vorangegangenen Beratungen wurde dazu im Mai 1981 in Smoienice ein Entwurf für ein wissenschaftliches Programm für Bodenmessungen vorgelegt /78/.

Die Ausrüstung des dazu entwickelten und gebauten Bodenmeßkomplexes umfaßt ein Feldspektrometer PS-3 "Kaspi" sowie den dazu nötigen hydraulischen Tragarm von 12 m Länge. Die Stromversorgung erfolgt aus Akkumulatoren. Der Wellenlängenbereich des Spektrometers beträgt 0,4 bis 1,2  $\mu\text{m}$ . Der Öffnungswinkel des Objektivs ist 7°. Die Meßgenauigkeit liegt bei 7%. Darüber hinaus ist der Meßkomplex mit Sensoren zur Messung der Lufttemperatur in drei verschiedenen Höhen mit einer Genauigkeit von 0,8°, der relativen Luftfeuchtigkeit in drei Höhen mit einer Genauigkeit von 7%, der Windgeschwindigkeit und -richtung und der Bodentemperatur in 4 verschiedenen Tiefen (5, 10, 30, 50 cm) ausgerüstet.



Ein Albedometer mißt die einfallende und remittierte Strahlung integral über den gesamten Spektralbereich. Die Meßdaten werden digitalisiert und auf ein Magnetband aufgezeichnet. Darüber hinaus werden auf den stationären Testfeldern, auf denen der Bodenmeßkomplex eingesetzt wird, weitere Untersuchungen an Objekten zur Charakterisierung ihres Zustandes vorgenommen.

Im Zentrallabor für Kosmosforschung der Bulgarischen Akademie der Wissenschaften wurde ebenfalls ein mobiler Bodenmeßkomplex aufgebaut. Dieser umfaßt ein Feldspektrometer für insitu-Messungen, Sensoren für die Erfassung der Bodentemperatur, der Lufttemperatur und der Bodenfeuchte in der Oberbodenschicht sowie Geräte zur Datenregistrierung.

Zusammenfassend können folgende allgemeine Tendenzen bei der Entwicklung und Ausrüstung mobiler Bodenmeßkomplexe angegeben werden:

1. Mobile Bodenmeßkomplexe werden zur Messung der optischen Eigenschaften der Untersuchungsobjekte sowie einiger wichtiger Anschluß- und Korrekturparameter benutzt.
2. Der Einsatz erfolgt vorwiegend auf Testgebieten, auf denen weitere zur Objektcharakterisierung wesentliche Merkmale oder Parameter bekannt sind oder mit den in der jeweiligen Fachdisziplin üblichen Methoden bestimmt werden können.
3. Zur Ausrüstung mobiler Bodenmeßkomplexe gehören in erster Linie Feldspektrometer oder Radiometer, die wetterunabhängig, schnell und weitgehend automatisch mit hoher spektraler Auflösung oder an ein existierendes Fernerkundungssystem angepaßt, Messungen der optischen Merkmale durchführen. Die Spektralbereiche liegen dabei im sichtbaren und nahen Infrarot von 0,4 - 2,5  $\mu\text{m}$  und im thermischen Infrarot von 8 - 15  $\mu\text{m}$ . Die Meßgeräte sind an Auslegern befestigt, die die nötige Meßhöhe sowie die geforderten Blickrichtungen realisieren.
4. Zur Ausrüstung gehören Sensoren zur Bestimmung lokaler meteorologischer Parameter wie Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Bodentemperatur, Bodenfeuchte usw.
5. Die Meßgeräte und Sensoren sind auf geländegängigen Fahrzeugen installiert, die außerdem im Feld als Arbeitsplatz und Labor dienen.
6. Bestandteile mobiler Bodenmeßkomplexe sind weiterhin Geräte zur Datenerfassung und Speicherung sowie zur Datenvorverarbeitung an Bord der Meßfahrzeuge.
7. Möglichkeiten zur Entnahme und zum Transport von Objektproben sind vorhanden.

Die Verfügbarkeit eines solchen Bodenmeßkomplexes wird i. a. als Grundvoraussetzung zur Durchführung von Feldexperimenten zu Grundlagenuntersuchungen für die Fernerkundung angesehen.

### 3.3. Realisierung der experimentellen Voraussetzungen

Die Entwicklung des mobilen Bodenmeßkomplexes am Zentralinstitut für Physik der Erde erfolgte in den Jahren 1981 - 1983 auf der Grundlage der im Abschnitt 3.1. abgeleiteten wissenschaftlich begründeten meßtechnischen und meßmethodischen Anforderungen, der im Abschnitt 3.2. dargestellten Analyse des internationalen Standes der Bodenmeßtechnik sowie bei den Testeinsätzen gewonnenen praktischen Erfahrungen mit der Meßtechnik. Da im Feldeinsatz mit wesentlich komplizierteren äußeren Bedingungen zu rechnen ist als bei Labormessungen und insbesondere starke Temperaturschwankungen, Windeinfluß, Schwankungen der Globalstrahlung und Probleme des Mobilbetriebes zu beachten sind, weiterhin unter Beachtung der geforderten hohen Zahl von Einzelmessungen und der Tatsache, daß die Messungen im Gelände i.a. nicht wiederholbar sind, kam es schwerpunktmäßig auf die Lösung der folgenden Probleme an:

- a) Realisierung der Quasisynchronmessung des Spektrometers entsprechend der im Abschnitt 3.1.1. diskutierten Anforderungen.
- b) Realisierung eines hohen Dynamikbereiches der Strahlungsmeßgeräte entsprechend der im Abschnitt 3.1.2. diskutierten Anforderungen.
- c) Realisierung eines weitgehend automatischen Meßablaufs in Verbindung mit einer automatischen Korrektur der im Feldeinsatz besonders zu berücksichtigenden Driftgrößen zur Gewinnung der für statistische Auswertungen notwendigen hohen Zahl von Einzelmessungen.
- d) Realisierung eines robusten, leichten und kompakten Aufbaus bei möglichst geringem Strombedarf.

Kernstück des Bodenmeßkomplexes sind die Geräte zur Strahlungsmessung im Gelände, das Feldspektrometer BSP-83 und das Mehrkanalradiometer der Firma BARNES.

Das BSP-83 ist ein aus einer Variante des Boden-Atmosphären-Spektrometers BAS des Meteorologischen Dienstes der DDR speziell zur Messung des spektralen gerichteten Remissionskoeffizienten natürlicher Objekte im Gelände weiterentwickeltes Meßgerät (Abb. 4, 5). Dazu kann die einfallende Strahlung durch eine Streuscheibe sowie die remittierte Strahlung durch ein Bodenobjektiv mit einem Öffnungswinkel von  $15^\circ$  unmittelbar nacheinander gemessen werden. Die Umschaltung erfolgt durch einen magnetisch betriebenen Kippspiegel, der den jeweils gewählten Strahlengang freigibt (Abb. 6). Die Zeitspanne zwischen beiden Messungen beträgt maximal 0,5 sec. Diese kurze Zeitspanne (Realisierung der Forderung nach Punkt a)) ist entsprechend den im Abschnitt 3.1.1. getroffenen Feststellungen entscheidend für die praktische Nutzbarkeit des Gerätes unter den in Mitteleuropa gegebenen Versuchsbedingungen hinsichtlich der Stabilität der Globalstrahlung. Dieses Meßprinzip, die Quasisynchronmessung, gestattet die Durchführung von Messungen auch bei bewölktem Himmel und bildet so eine der Voraussetzungen für die Realisierung der unter methodischen Gesichtspunkten im Kapitel IV diskutierten Versuchspläne.

Die normale Meßrichtung ist vertikal. Das Gerät besteht aus einem Meßkopf von 4,5 kp Gewicht und einem als Tischgerät ausgelegten Steuerteil. Beide sind durch ein Kabel von 12 m Länge miteinander verbunden. Da der Meßkopf i.a. an einem Ausleger befestigt und während der Messung nicht zugänglich ist, sind alle Funktionen des Gerätes vom Steuerteil aus bedienbar. Das Gerät benötigt eine Stromversorgung von  $\pm 12$  V, die Stromaufnahme beträgt bei abgeschalteten Anzeigeelementen ca. 80 mA, im normalen Betrieb ca. 450 mA.

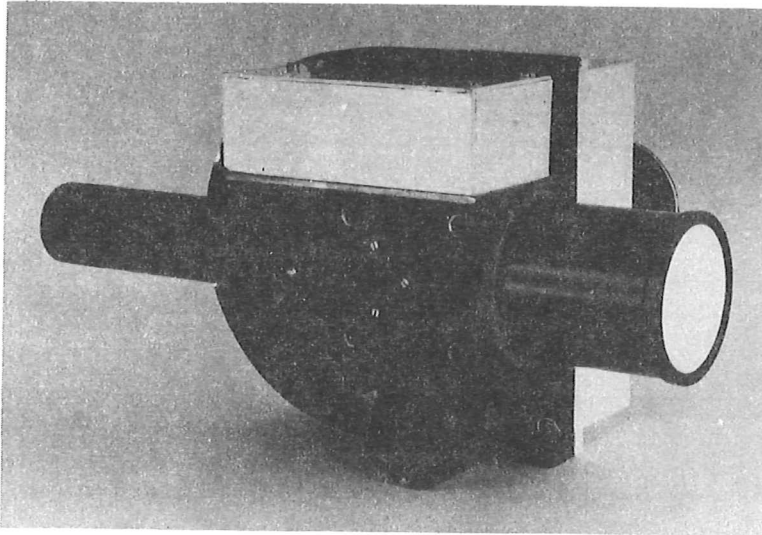


Abb. 4: Gesamtansicht des Feldspektrometers BSP-83 (Meßkopf)

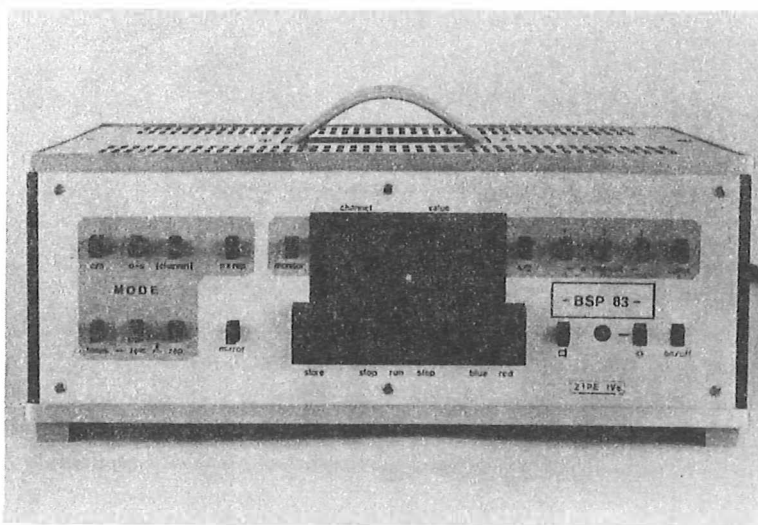


Abb. 5: Ansicht des Steuertells des Feldspektrometers BSP-83

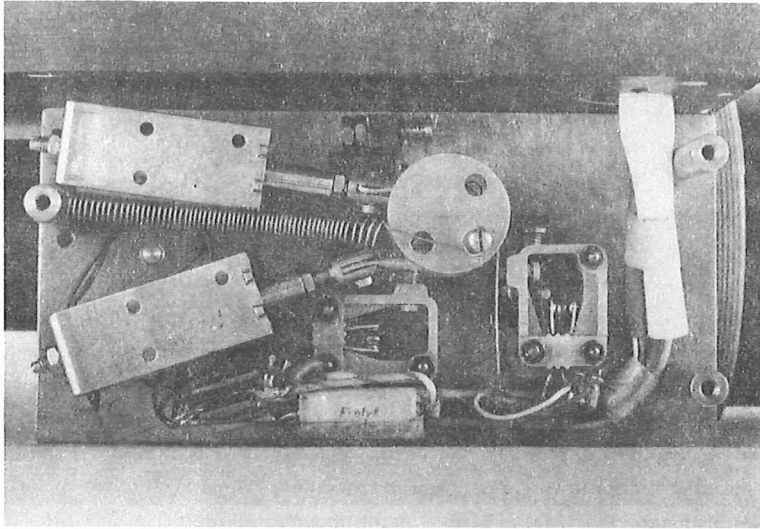


Abb. 6: Ansicht der Spiegelsteuerung

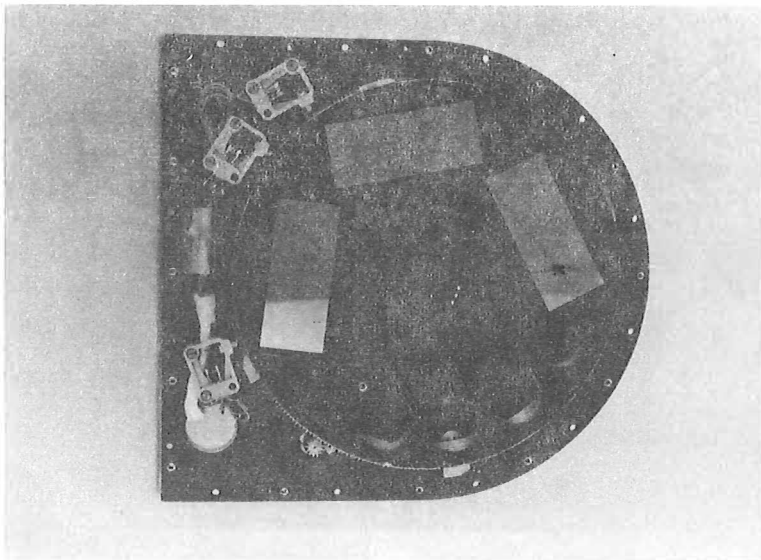


Abb. 7: Ansicht des Filterrades

Zur spektralen Zerlegung der Strahlung werden im BSP-83 Verlaufsinterferenzfilter des VEB Carl Zeiss JENA benutzt. Sie bestehen aus drei Teilen für die Wellenlängenbereiche 400 - 480 nm, 480 - 730 nm und 730 - 1 150 nm, die auf einem Filtrerrad befestigt sind (Abb. 7). Die jeweilige Durchlaßwellenlänge wird durch die Stellung des Filtrerrades bestimmt. Dieses wird mit Hilfe eines Schrittschaltwerkes gesteuert, wodurch sich jeweils definierte und reproduzierbare Wellenlängen ergeben. Im angegebenen Wellenbereich sind 41 Spektralkanäle wählbar. Die spektrale Bandbreite beträgt ca. 15 nm im sichtbaren und 25 nm im infraroten Spektralbereich.

Zur Realisierung des in Pkt. b) geforderten Dynamikbereiches wurde der Meßverstärker dreistufig ausgelegt, wobei in der dritten Stufe drei Verstärker mit unterschiedlicher Verstärkung parallel arbeiten (Abb. 8).

Als Rückkopplungswiderstand für die erste Stufe wird ein Höchtsohm-Präzisionswiderstand von 50 M in Glasverkapselung benutzt, wodurch eine Verstärkung von ca. 1 : 10 000 erreicht wird. Für die zweite Stufe sind über eine Steuerleitung zwei unterschiedliche Verstärkungen wählbar, dadurch kann die Gesamtempfindlichkeit des Gerätes bei Bedarf um den Faktor 2 abgesenkt werden. Die drei parallel arbeitenden Verstärker der dritten Stufe haben ein Verstärkungsverhältnis von 1 : 10 : 100 zueinander, so daß insgesamt ein Dynamikbereich von  $4 \times 10^5$  erreicht wird. Der empfindlichste Meßkanal ist für sehr geringe Strahlungsmengen vorgesehen. Wird die empfangene Strahlung stärker, so wird dieser Kanal kurz vor Erreichen der Übersteuerung automatisch abgeschaltet. Die Messung kann nun im Meßkanal 2 erfolgen, bis dieser ebenfalls vor Erreichen der Übersteuerung abgeschaltet wird.

Zur Korrektur von Offset- und Driftgrößen entsprechend der Forderung in Pkt. c) ist das Gerät mit einem abgedunkelten Vergleichssensor, der mit dem Meßsensor thermisch gekoppelt ist, ausgerüstet. Dieser stellt eine Korrekturspannung zur Verfügung, die während der Meßphase zur automatischen Korrektur des Meßsignals benutzt wird.

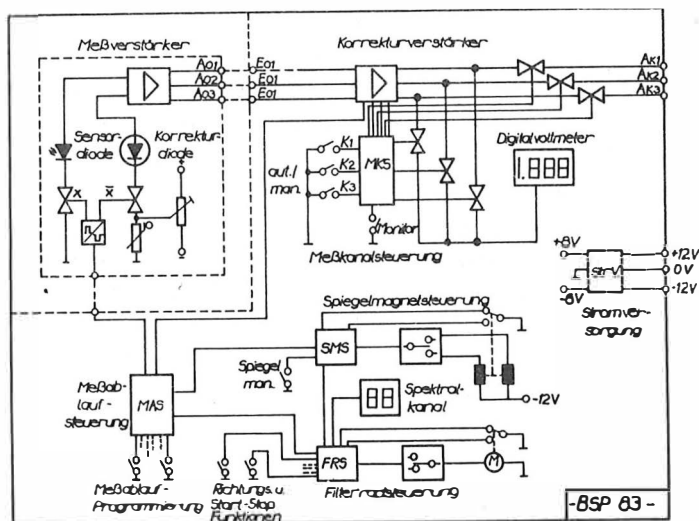


Abb. 8: Blockschaltbild des Feldspektrometers BSP-83

Die Bestimmung der Offsetgrößen der Diode bzw. Verstärker erfolgt unmittelbar vor der Messung. Dazu wird die abgedunkelte Vergleichsdiode über CMOS-Analogschalter an den Eingang des Verstärkers geschaltet. Die am Ausgang auftretende Spannung wird analog gespeichert und bei der unmittelbar folgenden Messung von der Signalspannung auf elektronischem Wege subtrahiert. Dadurch erfolgt eine automatische Korrektur der Offset- und Driftgrößen. Der gesamte Korrektur- und Meßzyklus dauert etwa 0,3 s. Während dieser Zeit liegt die Meßspannung etwa 60 ms am Ausgang an. Durch einen Synchronisierimpuls wird dafür gesorgt, daß während dieser Zeit die Speicherung des Meßwertes sowie die Anzeige auf dem Display erfolgen kann.

Mit Hilfe der automatischen Steuerung entsprechend der Forderung im Pkt. c) wurde der im praktischen Betrieb erfahrungsgemäß am häufigsten auftretende Meßablauf weitgehend automatisiert, ohne dabei andere mögliche Einsatzfälle von vornherein auszuschließen. Dazu sind am Steuerteil des Gerätes drei Meßarten wählbar.

- a) Einzelmessung,
- b) Messung in einer Richtung (einfallende oder remittierte Strahlung),
- c) Messung abwechselnd in Objekt- und Himmelsrichtung.

Bei der Betriebsart "Einzelmessung" können Spektralkanal und Spiegelstellung per Hand ausgewählt werden. Die Anzeige des Meßwertes erfolgt mit Hilfe des eingebauten Digitalvoltmeters. Der Meßwert kann in dem angeschlossenen Datenaufzeichnungsgerät abgespeichert werden. Zusätzlich erfolgt dort die Speicherung des Spektralkanals, der Spiegelstellung, des ausgewählten Meßkanals sowie einer Gerätekennnummer.

In der Betriebsart b) erfolgt automatisch die Auslösung der Messung und das Weiterdrehen des Filterrades zum folgenden Spektralkanal. Die Spiegelstellung kann dabei per Hand gewählt werden. Die Meßfolge kann an beliebiger Stelle unterbrochen werden. Bei Bedarf kann eine vorher fest programmierte Anzahl von Kanälen übersprungen werden. Nach Erreichen des letzten Spektralkanals gibt das Gerät ein akustisches Signal ab und geht in den Stop-Zustand. Wird ein automatischer Rücklauf des Filterrades gewünscht, so entfällt das akustische Signal am Ende des Spektralbereiches und ertönt erst nach erfolgtem Rücklauf des Filterrades. Es ist möglich, mehrere Meßserien automatisch nacheinander aufzunehmen. Weiterhin ist auch während des Rücklaufes des Filterrades eine Messung möglich. Bei der Betriebsart c) erfolgt zusätzlich zu b) eine automatische Bestätigung des Kippspiegels, so daß in jedem Spektralkanal zuerst die vom Objekt remittierte und danach die über die Streuscheibe einfallende Strahlung gemessen wird. Durch diese automatische Steuerung wird im Zusammenhang mit der neu entwickelten magnetischen Spiegelsteuerung und der automatischen Datenregistrierung im BMK die sehr kurze Zeitspanne zwischen der Messung der Globalstrahlung und der vom Objekt remittierten Strahlung realisiert und das als Quasisynchronmessung bezeichnete Meßprinzip entsprechend der eingangs unter Pkt. a) aufgestellten Forderung ermöglicht. Alle anderen Funktionen bleiben, wie bei Betriebsart b) beschrieben, erhalten. Durch diese Automatisierung des Meßablaufs wurde die Meßzeit für eine komplette Remissionskurve mit 41 spektralen Remissionskoeffizienten von ca. 8 min auf etwa 65 sec reduziert.

Die Anzeige des Meßwertes erfolgt durch ein eingebautes Digitalvoltmeter. Die Genauigkeit der Anzeige beträgt 1 mV (LSD) bei einem Meßbereich von -99 mV bis +1,999 mV. Dieser Meßbereich ist den Bedingungen des Gerätes (negative Dunkelspannung) sowie des nachfolgenden Datenaufzeichnungsgerätes (Meßbereich bis 1,999 mV) angepaßt. Der Meßwert wird während des Meßzyklus übernommen. Mit dem Digitalvoltmeter ist eine Auswahllogik gekoppelt, die immer den jeweils optimalen Meßkanal zur Anzeige bringt.

Bei Bedarf kann der anzuzeigende Meßkanal auch fest vorgegeben werden.

Zur Eichung des Digitalvoltmeters sind einige von der stabilisierten Versorgungsspannung abgeleitete Vergleichsspannungen anlegbar. Die Anzeige des Meßwertes erfolgt automatisch im Meßbetrieb oder fortlaufend nach Drücken der Taste MONITOR.

Das Gerät ist für den Anschluß externer Stoppsignale, beispielsweise von einem Meßgerät des Gradienten der Einfallsstrahlung, vorbereitet. Es ist mit modernsten mikroelektronischen Bauelementen bestückt, deren Fertigung teilweise gerade erst begonnen hat.

Das parallel zum BSP-83 eingesetzte importierte Mehrkanalradiometer wird zur Messung der Spektralcharakteristiken der Objekte in 8 Spektralkanälen benutzt. Davon liegen 4 Kanäle in dem auch mit dem BSP-83 erfaßten Spektralbereich von 0,45 - 0,9  $\mu\text{m}$ , 3 Kanäle liegen im Bereich von 1,15 - 2,35  $\mu\text{m}$  und ein Kanal im thermischen Infrarot von 10,4 - 12,5  $\mu\text{m}$ . Die Messung erfolgt parallel in allen 8 Kanälen. Der Öffnungswinkel der Objektive beträgt 1° oder 15° wahlweise. Die Meßgröße des Gerätes ist eine der vom Objekt remittierten Strahllichte proportionale Spannung (Strahllichteäquivalent). Neben der direkten Auswertung dieser Strahllichteäquivalente hat es sich als zweckmäßig erwiesen, auch bei diesem Gerät einen relativen Bezug zu einem Eichnormal (Weißtafel) herzustellen. Der Quotient aus dem Strahllichteäquivalent der Objektstrahlung und des Eichnormals entspricht dabei den gerichteten spektralen Remissionskoeffizienten. Die Bestimmung der Remissionskoeffizienten erfordert bei diesem Gerät die möglichst kurzfristig aufeinanderfolgende Messung des Objektes und einer als Eichnormal eingesetzten Weißtafel. Die Berechnung der Remissionskoeffizienten erfolgt im Vergleich mit dem BSP-83 aber nach einer etwas anderen Methode, da bei diesem Gerät die Gewinnung quasisisultaner Meßwerte der einfallenden und der remittierten Strahlung nicht möglich ist.

Während der Meßperiode 1983 wurden zeitlich nacheinander mehrere Messungen des Objektes und einer einklappbaren Weißtafel durchgeführt, diese jeweils gemittelt und der Quotient aus den Mittelwerten gebildet. Dieses Verfahren führte, wie im Abschnitt 6.3. ausführlicher dargestellt wird, zu einem Meßfehler von durchschnittlich etwa 10 %. Nach Abschluß der Messungen 1983 und ersten Auswertungen wurde eine etwas modifizierte Meßmethodik erarbeitet.

Danach wird aus mehreren, in möglichst geringem zeitlichen Abstand (3 - 5 sec) aufeinanderfolgenden Messungen des Objektes und einer einklappbaren Weißtafel aus jeweils 2 Messungen eine simultane Messung berechnet und anschließend gemittelt. Das Verfahren wurde an mehreren in einer realen Meßkampagne anzutreffenden Bewölkungssituationen simuliert und lieferte Resultate mit einem Gesamtfehler unter 5 %.

Aus der bei der Mittelung auftretenden Streuung kann man auf die Qualität des gewonnenen Ergebnisses schließen und fehlerhafte Meßwerte aus den Meßreihen eliminieren. Die Schaffung der technischen Voraussetzungen zur Realisierung dieser Meßmethodik erfolgt im Winterhalbjahr 1983/84.

Daneben sind bei diesem Gerät auf Grund der parallelen Messung der Spektralkanäle auch andere Normierungsverfahren denkbar, näheres dazu wird im Abschnitt 6.3. diskutiert.

Zur Ausgleichung der verschiedenen Meßbedingungen bei unterschiedlichen Objekten und Beleuchtungsbedingungen sind an dem Gerät für jeden Kanal einzeln unterschiedliche Verstärkungsfaktoren einstellbar. Das Gerät benötigt eine Versorgungsspannung von 12 V bei einer Stromaufnahme von ca. 500 mA. Beide Geräte sind damit speziell für den Feldeinsatz in der Grundlagenforschung sowie im Routineeinsatz für die Fernerkundung ausgelegt (Abb. 9) und realisieren die beiden möglichen Meßprinzipien zur

beiden möglichen Meßprinzipien zur Untersuchung der Spektralcharakteristiken natürlicher Objekte, nämlich

- a) der seriellen Messung der gerichteten spektralen Remissionskoeffizienten und
- b) der parallelen Messung von Äquivalenten der remittierten gerichteten spektralen Strahldichten.



Abb. 9: Bodenmeßkomplex im Einsatz

Darüber hinaus ist der Bodenmeßkomplex zur Messung wichtiger lokaler meteorologischer Parameter wie Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Bodentemperatur mit speziellen Sensoren ausgestattet, die bei Bedarf am Fahrzeug befestigt werden können. Die Aufzeichnung aller gemessenen Daten erfolgt mit einem automatischen Datensammelsystem, das eine Anschlußmöglichkeit an den im Bereich vorhandenen Kleinrechner besitzt. Als Datenspeichermedium werden Magnetbandkassetten benutzt.

### 3.4. Eigenschaften des Feldspektrometers BSP-83

#### 3.4.1. Meßaufbau und -methoden

Zur Bestimmung der mit dem Feldspektrometer erreichbaren Parameter bezüglich Genauigkeit und Stabilität der Meßwerte wurde ein optisches Labor zur Messung, Eichung und Überwachung der einzelnen Exemplare des BSP-83 eingerichtet. Dieses Labor ist mit einer optischen Bank zur Durchführung der Messungen, mit elektronisch stabilisierten Lichtquellen 24 V/250 W, einem Monochromator SPM sowie Stromversorgungs- und Meßgeräten ausgerüstet. Damit werden folgende Meßaufgaben realisiert:



- Bestimmung der Durchlaßwellenlänge und der spektralen Bandbreite für jeden wählbaren Spektralkanal des Spektrometers,
- Bestimmung und Überwachung der relativen Empfindlichkeit des Spektrometers,
- Überwachung des Verhältnisses in der Bewertung von Objekt- und Himmelsstrahlung,
- Bestimmung des Öffnungswinkels des Bodenobjektives,
- Bestimmung der Indikatrix der Streuscheibe,
- Bestimmung des Rauschens der Sensoren und Verstärkeranordnungen,
- Bestimmung des Verstärkungsverhältnisses der Meßkanäle untereinander,
- Bestimmung des zeitlichen Verhaltens der Meßverstärker,
- Überwachung der thermischen Stabilität des Meßgerätes.

Neben diesen Messungen erfolgen weitere Eich- und Kontrollmessungen im freien Gelände. Dazu wurde ein Meßpfeiler auf dem Dach des Institutsgebäudes A 17 benutzt, um seitlich einfallende Störstrahlungen durch Nachbarobjekte möglichst ausschließen zu können. Diese Messungen dienen in erster Linie dazu, das zwischen der über die Streuscheibe einfallenden und der von einer Weißtafel mit einem angenommenen Remissionskoeffizienten von 1,0 über das Bodenobjektiv gemessenen Strahlung bestehende Verhältnis zu ermitteln.

Dieses Verhältnis entsteht durch die unterschiedlichen optischen Elemente im jeweiligen Strahlengang. Aus der Messung der über die Streuscheibe einfallenden Strahlung und der von der Weißtafel remittierten Strahlung ergibt sich ein Faktor F, der bei den Messungen an den Objekten zur Berechnung des Remissionskoeffizienten dient.

$$\frac{U_{WT(100\%)}}{U_{STR}} = F$$

$$\frac{U_{OBJ}}{U_{STR}} \cdot \frac{1}{F} = \frac{U_{OBJ}}{U_{WT(100\%)}} = R$$

Für die Nutzung dieser Methode ist es jedoch in erster Linie notwendig, die Stabilität von F unter verschiedenen natürlichen Beleuchtungsbedingungen, insbesondere bei unterschiedlicher Bewölkungssituation, zu bestimmen. Änderungen können z. B. durch Unterschiede in der Indikatrix von Weißtafel und Streuscheibe entstehen (vgl. Abschnitt 3.1.).

Weiterhin wurden Messungen durchgeführt, um den Gradienten der einfallenden Strahlung bei unterschiedlicher Bewölkung zu bestimmen. Dieser Wert ist für die Dimensionierung des zeitlichen Ablaufs der Messungen von hoher Bedeutung.

### 3.4.2. Spektralkanäle und Bandbreiten

Da in dem Gerät zur Zerlegung der Strahlung Verlaufsinterferenzfilter eingesetzt sind, muß die genaue Durchlaßwellenlänge für jeden Kanal ausgemessen werden. Sie hängt von der Stellung des Filtrerrades ab.

Auf Grund der spektralen Empfindlichkeitskennlinie des Siliziumsensors beginnt der Meßbereich des Spektrometers bei etwa 400 nm. Die Abstände der Spektralkanäle sind bei festliegender, gleichbleibender Verschiebungslänge des Filtrerrades nur von den Daten der Verlaufsfilter abhängig. Sie betragen für den Filterteil I 10 - 14 nm, für Filterteil II 13 - 20 nm und für den Filterteil III 24 - 30 nm. Ebenso unterschiedlich sind die Halbwertsbreiten für die einzelnen Kanäle, sie liegen zwischen 10 und 25 nm.

Eine Aufstellung der Meßwerte für die einzelnen Spektralkanäle enthält Tabelle 3.

Tabelle 3: Wellenlängen und Halbwertsbreiten der Spektralkanäle des Feldspektrometers BSP-83

Kanal-Nr.	Wellenlänge nm	Halbwertsbreite nm
0	383	9
1	393	7
2	404	8
3	415	8
4	425	8
5	437	9
6	450	8
7	464	9
8	474	9
14	481	9
15	494	9
16	508	10
17	522	11
18	539	11
19	554	14
20	571	13
21	599	12
22	609	13
23	627	14
24	645	16
25	666	16
26	686	17
27	703	19
28	723	19
29	742	21
33	734	23
34	758	21
35	782	21
36	812	23
37	839	21
38	863	24
39	892	24
40	917	25
41	940	25
42	970	25
43	996	25
44	1020	26
45	1050	26
46	1070	25
47	1100	26
48	1120	29
49	1140	30

### 3.4.3. Stabilität des Meßsignals

Die Stabilität des Meßsignals wird von kurzfristig wirkenden Faktoren wie Rauschen und Störimpulse auf den Meßleitungen und langfristigen Faktoren wie thermische Einflüsse, Offset-Spannungsdrift, Alterung usw. beeinflusst. Offsetspannungs- und Driftinflüsse werden durch die automatische Korrektur vor jedem Meßvorgang eliminiert und können so das Meßsignal nicht verfälschen. Voraussetzung dafür ist, daß die beiden Dioden auf Paarigkeit ausgesucht wurden. Langzeiteffekte und Alterungsprozesse, die in beiden Dioden unterschiedlich verlaufen können, werden durch die in regelmäßigen Abständen durchgeführten Kontrollmessungen korrigiert. Daher hängt die Stabilität des Meßsignals in erster Linie vom Rauschen ab. Zur Bestimmung des Rauschens wurden bei abgedunkeltem Sensor sowie bei verschiedenen konstanten Beleuchtungsbedingungen jeweils 100 Messungen durchgeführt. Die daraus berechnete Streuung wurde als Maß für die durch das Rauschen hervorgerufene Instabilität des Meßsignals angesehen. Die konstante Strahlungsquelle wurde mit Hilfe einer über ein elektronisch geregeltes Netzteil angeschlossenen Halogenlampe 24 V/250 W realisiert, verschiedene Beleuchtungsstärken konnten durch unterschiedliche Filterradstellungen simuliert werden. Die Messungen erfolgten im zeitlichen Abstand von jeweils 3 sec. Den Versuchsaufbau zeigt Abb. 10. Die Ergebnisse der Messungen enthält Tabelle 4. Daraus ist ersichtlich, daß das Rauschen des elektronischen Verstärkers sich im empfindlichen Meßkanal am stärksten auswirkt und bei der Dunkelmessung eine Abweichung von  $\pm 1,4$  mV vom Nullpunkt hervorrufen kann. Setzt man die bei Routine-messungen unter Normalbedingungen erzielten Meßspannungen von mindestens 150 mV im empfindlichsten Meßkanal dazu in das Verhältnis, so liegt der durch das Rauschen hervorgerufene Fehler in jedem Falle unter 1 %. Für die anderen Meßkanäle sowie bei Absenken der Empfindlichkeit spielt das Rauschen praktisch keine Rolle mehr. Bei Verwendung der stabilisierten Lichtquelle ist deutlich das Ansteigen der Schwankungen durch den zusätzlichen Rauschbeitrag der Lichtquellen zu erkennen. Aus den Meßwerten ist zu entnehmen, daß die Lichtquellen einen Rauschbeitrag von ca. 0,3 % vom Meßwert liefert. Sie ist damit für die vorgesehenen Eichaufgaben ausreichend stabil.

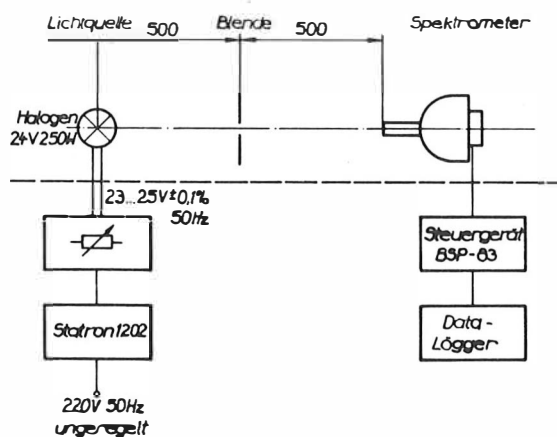


Abb. 10 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Stabilität des Meßsignals

Tabelle 4: Meßergebnisse zur Stabilitätsuntersuchung des Feldspektrometers BSP-83

Nr.	Meßkanal	Empfindlichkeitsstufe	Beleuchtungsstufe	Anzahl der Messungen	Meßsignal mV	Standardabweichung des Meßsignals mV
1	1	1	Dunkelst.	300	0	1,36
2	1	1	"	100	0	1,10
3	1	1/2	"	100	0	0,85
4	2	1	"	100	0	0,54
5	2	1/2	"	100	0	0,37
6	3	1	"	100	0	0,36
7	3	1/2	"	100	0	0,35
8	1	1	I	100	956	2,86
9	1	1	II	100	1850	2,72
10	2	1	II	100	133	0,67
11	3	1	II	100	22	0,44
12	2	1	III	100	265	1,17
13	2	1	IV	100	1802	4,19
14	3	1	IV	100	202	0,69
15	3	1	V	100	900	2,26

#### 3.4.4. Öffnungswinkel des Bodenobjektivs und Indikatrix der Streuscheibe

Zur Bestimmung des Öffnungswinkels des Bodenobjektivs und der Indikatrix der Streuscheibe wurde die Lichtquelle auf einem Schwenkarm befestigt.

Nach Angaben des Entwicklers sollte der Öffnungswinkel des Bodenobjektivs  $15^\circ$  betragen. Die Ergebnisse der Messungen auf der optischen Bank des Eichlabors zeigt Abb. 11. Zur Bestimmung der Indikatrix der Streuscheibe wurde das Spektrometer gedreht und die Streuscheibe in die Drehachse des Schwenkarmes gebracht. Die gemessene Indikatrix der Streuscheibe zeigt Abb. 12.

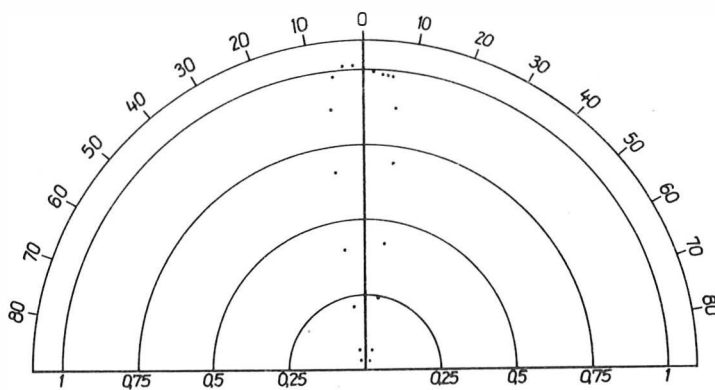


Abb. 11: Indikatrix des Bodenobjektivs

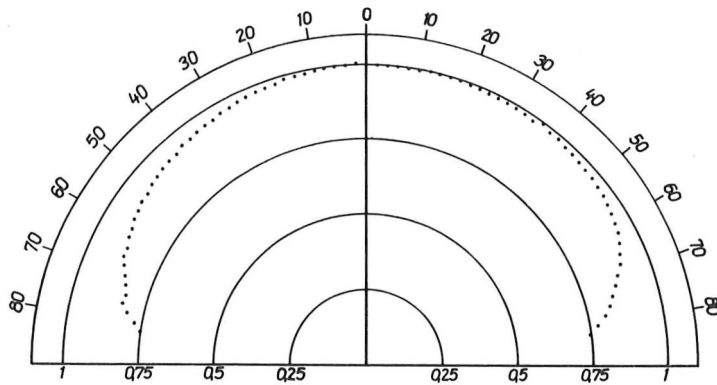


Abb. 12: Indikatrix der Streuscheibe

Zur Einschätzung der Meßergebnisse im Labor wurden auch unter natürlichen Bedingungen Eichmessungen vorgenommen. Die Messungen verfolgten das Ziel, den Grad der Übereinstimmung der Indikatrix der Streuscheibe und der als Standardeichnormal verwendeten  $\text{BaSO}_4$ -Platte festzustellen. Dazu wurden 150 Messungen der  $\text{BaSO}_4$ -Platte, deren Remission im gesamten Spektralbereich von  $0,4 - 1,1 \mu\text{m}$  als 100 % gesetzt wird, bei verschiedenen Bewölkungsarten sowie bei klarem Himmel mit unterschiedlichen Sonnenhöhen durchgeführt. Die dabei ermittelten gerätespezifischen Faktoren  $F$ , die das Verhältnis der Bewertung der Strahlung vom Bodenobjektiv und durch die Streuscheibe ausdrücken und zur Berechnung des Remissionskoeffizienten benötigt werden, werden als Eichdaten gespeichert. Tabelle 5 zeigt die Meßwerte sowie die gemessenen Schwankungen bei Einbeziehung aller Messungen in den verschiedensten Bewölkungssituationen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Meßwerte der einfallenden Strahlung während dieser Messungen Schwankungen von 1:3,5 aufwiesen. Dagegen liegt der Variationskoeffizient der gemessenen Faktoren  $F$  bis auf wenige Ausnahmen zwischen 2 - 4 %. Tabelle 6 enthält die Meßwerte, die bei sonnigem Wetter aufgezeichnet wurden. Dies ist bei den durchzuführenden Messungen der Normalfall. Hier liegt die Schwankung der Eichfaktoren  $F$  zwischen 0,5 und 1 %. Abb. 13 - 15 zeigen für drei ausgewählte Wellenlängen den Verlauf der gemessenen Einfallsstrahlung und der aus den Meßwerten berechneten Faktoren  $F$ .

Zur Bestimmung des Einflusses der Objektindikatrix wurde der Tagesgang am Beispielobjekt Roggen gemessen. Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der Messungen. Der Variationskoeffizient der Einstrahlung betrug für diese Messungen 20 - 28 %.

Tabelle 5: Eichmessung bei schwankenden Bewölkungsbedingungen

Kanal Nr.	Wellenlänge nm	Eichfaktor F	Standardabweichung S (F)	Variationskoeffizient V (F) %
1	393	4.197	0.102	2.45
2	404	4.162	0.089	2.14
3	415	4.152	0.096	2.32
4	425	4.147	0.090	2.18
5	437	4.099	0.104	2.54
6	450	3.986	0.169	4.23
7	464	3.884	0.102	2.64
8	474	3.884	0.090	2.30
14	481	3.842	0.110	2.86
15	494	3.929	0.119	3.11
16	508	3.793	0.103	2.72
17	522	3.752	0.104	2.76
18	539	3.658	0.104	2.85
19	554	3.638	0.094	2.59
20	571	3.654	0.113	3.09
21	590	3.553	0.098	2.75
22	609	3.575	0.102	2.85
23	627	3.559	0.095	2.66
24	645	3.542	0.119	3.37
25	666	3.539	0.136	3.85
26	686	3.524	0.103	2.93
27	703	3.511	0.106	3.01
28	723	3.478	0.110	3.17
29	742	3.358	0.145	4.31
33	734	2.883	0.131	4.56
34	758	3.056	0.099	3.24
35	782	2.990	0.111	3.72
36	812	3.020	0.089	2.94
37	839	2.989	0.093	3.13
38	863	2.949	0.132	4.49
39	892	2.927	0.086	2.94
40	917	2.842	0.104	3.68
41	940	2.781	0.083	3.00
42	970	2.718	0.096	3.55
43	996	2.695	0.088	3.25
44	1020	2.605	0.095	3.64
45	1050	2.504	0.073	2.92
46	1070	2.467	0.088	3.58
47	1100	2.427	0.107	4.39
48	1120	2.072	0.145	7.01

Tabelle 6: Eichmessung bei wolkenfreiem Himmel

Kanal Nr.	Wellenlänge nm	Eichfaktor F	Standardabweichung S (F)	Variationskoeffizient V (F) %
1	393	4.214	0.822	0.53
2	404	4.166	0.026	0.62
3	415	4.170	0.026	0.63
4	425	4.154	0.029	0.70
5	437	4.122	0.021	0.50
6	450	4.088	0.024	0.59
7	464	3.887	0.024	0.60
8	474	3.859	0.023	0.59
14	481	3.880	0.019	0.50
15	494	3.890	0.022	0.58
16	508	3.829	0.023	0.59
17	522	3.775	0.023	0.61
18	539	3.688	0.025	0.69
19	554	3.662	0.020	0.56
20	571	3.630	0.023	0.64
21	590	3.555	0.028	0.79
22	609	3.584	0.022	0.62
23	627	3.566	0.023	0.64
24	645	3.549	0.023	0.66
25	666	3.544	0.024	0.68
26	686	3.520	0.023	0.64
27	703	3.509	0.023	0.66
28	723	3.495	0.024	0.69
29	742	3.446	0.106	3.70
33	734	2.865	0.023	0.68
34	758	3.103	0.021	0.66
35	782	3.021	0.019	0.62
36	812	3.018	0.022	0.72
37	839	2.997	0.019	0.65
38	863	2.979	0.021	0.70
39	892	2.911	0.021	0.73
40	917	2.836	0.021	0.73
41	940	2.780	0.019	0.69
42	970	2.754	0.021	0.76
43	996	2.690	0.018	0.67
44	1020	2.666	0.017	0.64
45	1050	2.473	0.017	0.71
46	1070	2.415	0.019	0.80
47	1100	2.358	0.020	0.87
48	1120	2.190	0.027	1.23

Tabelle 7: Testmessung zur Stabilität am Beispielobjekt Roggen bei leichter Bewölkung

Kanal Nr.	Wellenlänge nm	Remissions-	Standard-	Variations-
		koeffizient R %	abweichung S (R) %	koeffizient V (R) %
1	393	2.41	0.23	9.91
2	404	2.35	0.17	7.24
3	415	2.46	0.15	6.20
4	425	2.70	0.18	6.55
5	437	2.85	0.15	5.40
6	450	2.93	0.18	5.99
7	464	2.99	0.15	5.01
8	474	3.04	0.15	4.86
14	481	3:14	0.16	5.13
15	494	3.32	0.21	6.40
16	508	3.90	0.18	4.50
17	522	5.25	0.25	4.73
18	539	5.95	0.36	6.13
19	554	5.93	0.27	4.59
20	571	5.37	0.27	5.07
21	590	4.87	0.23	4.71
22	609	4.59	0.21	4.53
23	627	4.36	0.20	4.60
24	645	4.14	0.22	5.34
25	666	3.88	0.21	5.52
26	686	4.60	0.25	5.49
27	703	8.58	0.37	4.28
28	723	16.18	0.54	3.35
29	742	27.93	1.28	4.58
33	734	22.41	1.01	4.51
34	758	38.05	0.93	2.45
35	782	41.72	0.89	2.13
36	812	41.96	0.65	1.55
37	839	42.01	1.10	2.61
38	863	43.04	0.66	1.54
39	892	44.34	0.79	1.78
40	917	43.16	0.71	1.64
41	940	40.40	0.62	1.53
42	970	36.69	0.97	2.64
43	996	36.34	0.73	2.01
44	1020	41.10	0.94	2.30
45	1050	43.75	1.29	2.97
46	1070	43.67	0.88	2.02
47	1100	42.30	0.92	2.18
48	1120	41.70	1.37	3.28



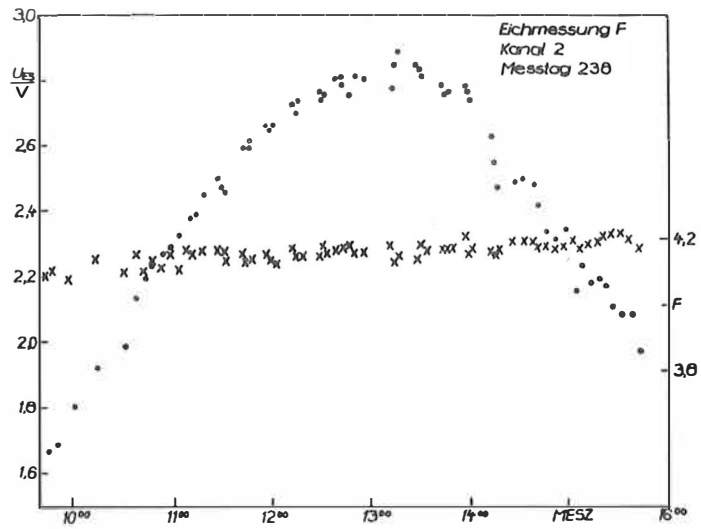


Abb. 13: Tagesgangmessung Kanal 2

x - Eichfaktor F, - Globalstrahlungsäquivalent  $U_{ES}$

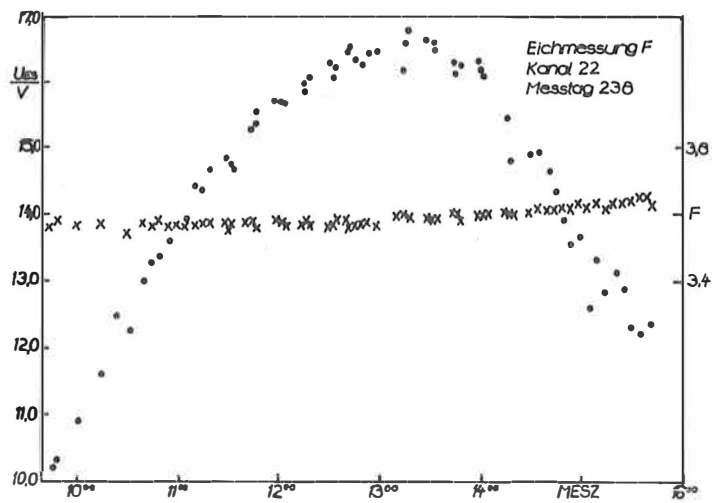


Abb. 14: Tagesgangmessung Kanal 22

x - Eichfaktor F, - Globalstrahlungsäquivalent  $U_{ES}$

Eichmessung F  
Kanal 40  
Messestag 238

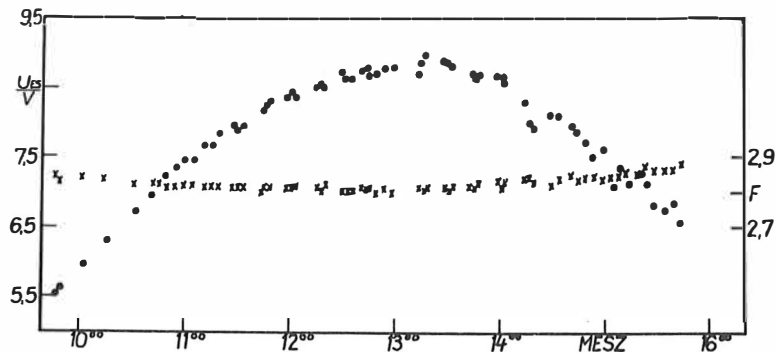


Abb. 15: Tagesgangmessung Kanal 40

x - Eichfaktor F, . - Globalstrahlungsäquivalent  $U_{ES}$

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, wirken sich die unter diesen Bedingungen auftretenden Störungen in einem Variationskoeffizienten von 2 - 6 % aus mit Ausnahme des blauen Bereiches um 400 nm, wo der Variationskoeffizient bis auf 10 % ansteigt. Damit ist auch unter praktischen Bedingungen im realen Feldeinsatz die in internationalen Berichten (Guyot /17/) ausgewiesene derzeitige Genauigkeitsgrenze für Remissionsmessungen unter Insitu-Bedingungen erreicht und z. T. übertroffen worden.

#### 3.4.5. Zeitlicher Ablauf des Meßvorganges

Wie bereits an anderer Stelle bemerkt, gliedert sich jede Messung der einfallenden bzw. remittierten Strahlung in zwei zeitlich unmittelbar aufeinanderfolgende Teile:

- a) Korrekturphase
- b) Meßphase

Dazu wurde der eigentliche Meßvorgang in 10 Takte geteilt. Jeder Takt hat eine Länge von ca. 30 ms, so daß sich für die gesamte Messung eine Zeitdauer von etwa 300 ms ergibt. Innerhalb dieser Zeit erfolgt die Einschaltung der abgedunkelten Vergleichsdiode, die Speicherung der Offset- und Driftgrößen und die eigentliche Messung. Den genauen zeitlichen Ablauf zeigt Abb. 16. In Abb. 17 und 18 sind die oszillographischen Aufnahmen des Spannungsverlaufes am Meßausgang dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die Schaltflanken am Verstärkerausgang eine genügend große Steilheit für die gewählte Taktzeit besitzen.

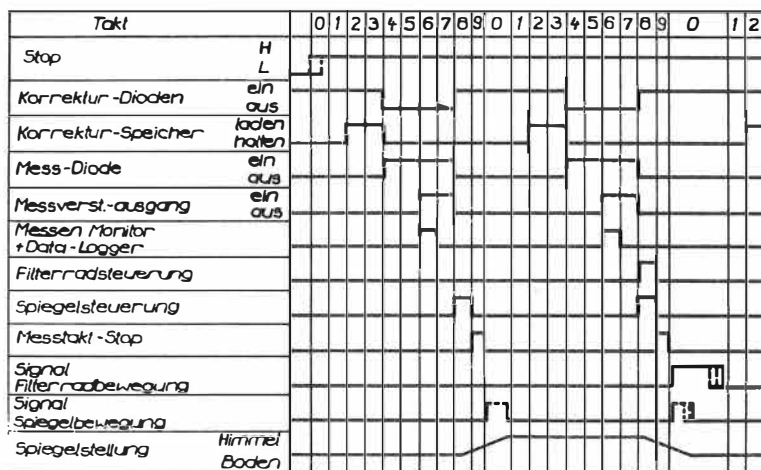
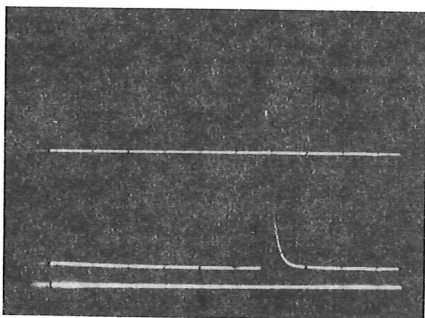
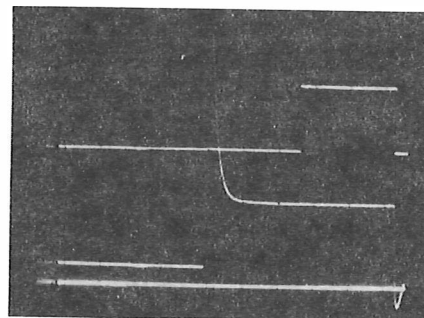


Abb. 16: Zeitlicher Ablauf des Meßvorganges

Abb. 17: Oszillogramm  
bei  $U_a = 0 \text{ V}$ Abb. 18: Oszillogramm  
bei  $U_a = 1,8 \text{ V}$

Mit diesen Werten ist ein zeitlicher Abstand zwischen der Messung der einfallenden und der remittierten Strahlung von ca. 0,5 sec erreichbar. Dieser Wert wird unter den in der DDR herrschenden meteorologischen Bedingungen als noch vertretbar angesehen, nach /72/ können jedoch in extremen Situationen (wechselnde, schnell ziehende Bewölkung) Schwankungen der Einstrahlung von 10 % und mehr in dieser Zeitspanne auftreten. Deshalb wurde vorgesehen, einen zusätzlichen Sensor, der die einfallende Gesamtstrahlung empfängt und den Gradienten dieser einfallenden Strahlung bewertet, zu installieren. Dazu wird der im Steuergerät vorhandene Eingang für externe Stop-Signale benutzt. Überschreitet der Gradient der einfallenden Strahlung einen bestimmten einstellbaren Wert, so wird die Messung unterbrochen und der Spiegel in die Ausgangslage (Stellung "Boden") zurückgekippt. Stabilisiert sich die einfallende Strahlung wieder, so wird die Messung an der Stelle fortgesetzt, wo die Unterbrechung erfolgte.

#### 3.4.6. Bestimmung des Verstärkungsverhältnisses

Für die Auswertung der Messungen ist die Bestimmung des genauen Verhältnisses der Verstärkung der drei Meßkanäle zueinander sowie die Überwachung der Konstanz dieses Verhältnisses von sehr großer Bedeutung, da oft die einfallende und die remittierte Strahlung aus unterschiedlichen Meßkanälen benutzt werden muß. Damit geht dieser Fehler direkt in das Meßergebnis mit ein. Deshalb sind hierfür regelmäßige Kontrollmessungen im Eichlabor nötig. Für die Messungen 1983 wurden folgende Verstärkungsverhältnisse ermittelt:

$$\begin{array}{lcl} \text{MK I} & : \text{MK II} & = 10.090 : 1 \\ \text{MK II} & : \text{MK III} & = 8.925 : 1 \end{array}$$

Im Verlaufe der Meßperiode traten keine meßbaren Abweichungen von diesen Werten auf.

Zusammenfassend kann damit eingeschätzt werden, daß das Feldspektrometer BSP-83 die aus den speziellen Bedingungen der Feldmessungen resultierenden und im Abschnitt 3.1. als Grundlage einer wissenschaftlichen Aufgabenstellung formulierten Forderungen in vollem Umfang erfüllt.

#### 4: Vorbereitung und Durchführung der Feldexperimente 1982/83

Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit der entwickelten Meßtechnik und entsprechend den im Kapitel II und in den Vorbemerkungen zum Kapitel III formulierten methodischen Zielstellungen wurden in den Jahren 1982 und 1983 Feldexperimente durchgeführt. Dabei kam der Bodenmeßkomplex in seiner jeweiligen Ausbaustufe auf verschiedenen Testgebieten in der DDR sowie im Rahmen der Interkosmoskooperation bei einem Komplexexperiment auf einem Testpolygon in der CSSR zum Einsatz.

Die Messungen wurden dabei schwerpunktmäßig auf die kontinuierliche Erfassung der fachspezifischen und fernerkundungsspezifischen Merkmale in stationären Testpolygonen konzentriert, wobei die Aufstellung der Versuchspläne, die fachspezifische Seite der Versuchsdurchführung sowie die Auswertung der Versuchsergebnisse in sehr enger Kooperation mit der Sektion Geographie der Pädagogischen Hochschule Potsdam und mit der Abteilung Fernerkundung des Forschungszentrums für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg erfolgte. Das konkrete Ziel der Arbeiten bei den Kooperationspartnern besteht darin, im Rahmen langfristig angelegter Forschungsprogramme den saisonalen Rhythmus (Dynamik) der Pflanzenentwicklung und Einflüsse des Standortes auf die Vegetationsobjekte mit Hilfe von Remissionsmerkmalen zu ertassen. Im Rahmen der vorliegenden Dissertationsschrift wurden die bisher dazu durchgeführten Messungen für methodische Beispieluntersuchungen der Abbildungsbeziehungen fachspezifischer Merkmale auf Fernerkundungsdaten genutzt.

Im folgenden werden zunächst methodische Fragen allgemeiner Art bei der Vorbereitung und Durchführung von Feldexperimenten diskutiert (Abschnitt 4.1.) und anschließend am Beispiel der Feldexperimente in den Jahren 1982 und 1983 auf den stationären Testpolygonen Schmergow und Dedelow konkretisiert (Abschnitt 4.2. bis 4.4.).

##### 4.1. Allgemeine methodische Grundlagen

Gegenwärtig existiert für die Untersuchung der spektralen Eigenschaften natürlicher Objekte unter Feldbedingungen keine einheitliche vollständig ausgearbeitete Methodik /78/. Vielmehr werden in diesem Zusammenhang in Abhängigkeit von den individuell gesammelten Erfahrungen und der eingesetzten Meßtechnik zu vielen Fragen unterschiedliche Auffassungen vertreten. Die hier behandelten methodischen Grundlagen basieren auf den Einsatzerfahrungen des am Zentralinstitut für Physik der Erde realisierten Bodenmeßkomplexes und auf gemeinsam im Rahmen der Interkosmoskooperation erarbeiteten Ergebnissen

Zur Vorbereitung der Experimente für die konkrete Untersuchungsaufgabe sind die im folgenden beschriebenen Teilschritte a) bis e) erforderlich:

##### a) Festlegung der Untersuchungsobjekte

Die Auswahl und Festlegung der Untersuchungsobjekte richtet sich nach den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten wie klimatische Bedingungen, Geländere relief usw. sowie nach den aus der Aufgabenstellung ersichtlichen ökonomischen Gesichtspunkten wie Häufigkeit des Vorkommens und wirtschaftliche Bedeutung. Daneben sind auch solche Gesichtspunkte wie Zugänglichkeit, Möglichkeiten und Aufwand zur Durchführung der nötigen fachspezifischen Messungen und Aktionsradius des Bodenmeßkomplexes zu beachten.

## b) Festlegung der Testgebiete

Die Festlegung des Testgebietes zur Durchführung der Untersuchungen kann nur in engem Zusammenhang mit der Aufgabenstellung und den ausgewählten Untersuchungsobjekten sowie in Kooperation mit den die fachspezifische Seite der Experimente betreuenden Einrichtungen erfolgen. Dabei sind auch solche Gesichtspunkte wie Aufwand und gegebene materiell-technische Voraussetzungen zu berücksichtigen. Nach den bisherigen Erfahrungen sind Bodenexperimente für die Fernerkundung in erster Linie im Rahmen langfristiger Forschungsprogramme zur Untersuchung spezieller fachspezifischer Eigenschaften von Bodenobjekten, die mit Remissionsmerkmalen Zusammenhänge aufweisen könnten, sinnvoll. In diesem Zusammenhang muß auch die Anzahl und Größe der Testgebiete sowie der darin befindlichen Untersuchungsobjekte auf ein technisch und materiell realisierbares Maß beschränkt werden.

Von der bulgarischen Seite wird in /77/ folgende Auffassung zu den bei der Auswahl von Testpolygonen für Remissionsuntersuchungen u. a. zu berücksichtigenden allgemein-methodischen Grundsätzen vertreten:

1. Das Testgebiet soll ein verhältnismäßig großes Territorium umfassen, das auch auf Luft- oder Kosmosaufnahmen auffindbar ist und entsprechende photometrische Messungen gestattet.
2. Das Testgebiet soll überall unmittelbar zugänglich sein.
3. Das Testgebiet soll bezüglich seiner physikalisch-geographischen Eigenschaften repräsentativ für die vorliegende Landschaftsform sein und typische Objekte und Naturbildungen sowie ihre Modifikationen im Ergebnis natürlicher und antropogener Einwirkungen in verschiedenen Intensitätsstufen enthalten.
4. Verschiedene Testgebiete sollen über das Territorium so verteilt sein, daß alle interessierenden Zonen mit verschiedener Landschaftsform erfaßt werden.
5. Auf Grund der vorgeschlagenen Größe der Testgebiete sollten innerhalb jedes Testgebietes einzelne kleinere "Schlüsselgebiete" festgelegt werden, in denen die Objekte bezüglich der vorgesehenen Untersuchungen als homogen angesehen werden können.
6. Für jedes Testgebiet ist eine ausführliche und detaillierte Beschreibung der klimatischen und meteorologischen Faktoren, hydrologische Bedingungen, Bodencharakteristiken, Beschreibung des Pflanzenbewuchses natürlicher und künstlicher Art u.a.m. nötig.

Die auf solche Art ausgewählten Testpolygone sind für die Gewinnung allgemeiner Übersichtsinformationen der in einem größeren Gebiet vorkommenden Bodenobjekte und deren Verteilung sowie ihrer prinzipiellen Remissionscharakteristiken z. B. als Interpretationshilfen für die visuelle Interpretation von DFE anwendbar, sie erscheinen jedoch ungeeignet für die auf spezielle Fragen der Zustandserkennung ausgerichteten Bodenexperimente, die eine detaillierte Untersuchung der fach- und fernerkundungsspezifischen Eigenschaften der Objekte erfordern. Diese Untersuchungen könnten in großen, viele verschiedene Objekte umfassenden und über ein großes Gebiet verteilten Testpolygonen kaum mit einem vertretbaren Aufwand durchgeführt werden.

## c) Auswahl und Abstufung der fachspezifischen Merkmale

Die Messung der fachspezifischen Merkmale kann bis auf einige Ausnahmen nicht mit dem mobilen Bodenmeßkomplex erfolgen, da die dafür erforderliche Ausrüstung zu umfangreich ist (vgl. auch Kap. 3). Außerdem erfordert auch die exakte und fundierte Beschreibung des Zustandes der Untersuchungsobjekte sowie die Auswahl der dazu nötigen fachspezifischen Merkmale eine enge Kooperation mit den Spezialisten der entsprechenden Fachdisziplinen. Für die Durchführung der Feldexperimente spielt die Auswahl der fachspezifischen Merkmale als Eingangsparameter des zu bestimmenden statistischen Abbildungsmodells eine wesentliche Rolle.

Läßt es die a-priori Kenntnis über das Untersuchungsobjekt zu, so sollten die Merkmale bereits vorher in Gruppen nach der Größe ihrer vermutlich zu erwartenden Effekte eingeteilt werden. In /78/ wird vorgeschlagen, die zur Zustandsbeschreibung der Pflanzen herangezogenen fachspezifischen Merkmale im Verlaufe der Vegetationsperiode zu ändern und der jeweils vorliegenden konkreten Entwicklungsphase der Pflanzen anzupassen. Dieser Gedanke erscheint vernünftig, jedoch liegen zur Zeit zu seiner Umsetzung noch zu wenig Erfahrungen darüber vor, welche Merkmale in der jeweiligen Entwicklungsphase die entscheidende Rolle bei der Charakterisierung bzw. Unterscheidung der einzelnen Zustandsstufen spielen. Einige Merkmale, z. B. bestimmte Ertragskomponenten, sind jedoch schon ihrer Natur nach an das Erreichen einer bestimmten Entwicklungsphase (z. B. Ausbildung der Ähren bzw. Körner) gebunden. Zur Messung des spektralen Remissionskoeffizienten wird der mobile Bodenmeßkomplex zu den charakteristischen Entwicklungsphasen des Objektes entsprechend einem vorher aufgestellten Versuchsplan auf den jeweiligen Testgebieten eingesetzt.

d) Festlegung der zu berücksichtigenden Anschlußparameter und Störgrößen

Mit dem Bodenmeßkomplex erfolgt darüber hinaus die Messung wichtiger Anschluß- und Korrekturparameter wie z. B. Lufttemperatur, Bodentemperatur, Windgeschwindigkeit u. a. Dabei sollte die Messung auf solche Merkmale beschränkt bleiben, die wirklich einen signifikanten Einfluß auf den Remissionsmeßwert oder auf das Objekt haben. Die Größe des Einflusses müßte gegebenenfalls in Voruntersuchungen, die u. U. auch im Labor durchgeführt werden könnten, geklärt werden. Beispielsweise kann die Lufttemperatur in Verbindung mit der radiometrisch bestimmten Oberflächentemperatur der Vegetationsobjekte durchaus zu einem Zustandsparameter für das Objekt werden, der insbesondere mit dem Wasserhaushalt der Pflanze in Verbindung steht, dagegen erscheint die Messung der Lufttemperatur in 3 Ebenen bzw. der Bodentemperatur in 4 Ebenen entsprechend /78/ (vgl. Abschnitt 3.2.) als übertrieben und nicht den realen Bedingungen angepaßt.

e) Festlegung der Meßpunkte und Aufstellung des Versuchsplanes

Die Grundlage zur Festlegung der Meßpunkte bilden die auf dem gesamten Testgebiet durchgeführten Voruntersuchungen zur Bestimmung der vorliegenden quantitativen Abstufungen der fachspezifischen Einzelmerkmale. Solche Untersuchungen werden vor Beginn der eigentlichen Meßperiode gemeinsam mit den das Testgebiet betreuenden Fachspezialisten vorgenommen.

Die Ausgrenzung der zu jeder Zustandsstufe als homogen anzusehenden Fläche erfolgt an Hand von Flugzeugaufnahmen. Im Zusammenhang damit sei auf die gemeinsam mit Experten aus der CSSR erarbeitete Möglichkeit der Nutzung von RC-Flugmodellen für die Gewinnung solcher Übersichtsaufnahmen hingewiesen /38/. In der dazu erarbeiteten Methodik des Einsatzes von RC-Flugmodellen /57/ wird gerade auch der Lokalisierung homogener Gebiete bzw. von Störungen im Testgebiet Aufmerksamkeit gewidmet. Sind die Zustandsstufen in Luftaufnahmen nicht unterscheidbar, so müssen die homogenen Gebiete an Hand von Bodenuntersuchungen ausgegrenzt werden.

Um die für eine statistische Auswertung nötige Anzahl von Messungen zu gewinnen, müssen von der jeweiligen Entwicklungsphase und von jeder gewünschten Faktorenstufe eine möglichst große Anzahl von Einzelmessungen durchgeführt werden. Dafür sind mehrere Meßtage nötig. Auf Grund der bestehenden Abhängigkeit von den meteorologischen Gegebenheiten kann der Versuchsplan keine detaillierten Termine enthalten. Unter normalen Bedingungen sind an jedem Meßttag etwa 5 Stunden für die Messungen geeignet, von 9.30 Uhr bis 14.30 Uhr Ortszeit. In dieser Zeit steht die Sonne am höchsten und die Änderung der Sonnenhöhe ist relativ gering. Auf dieser Grundlage kann unter Berücksichtigung der Umsetzzeiten des Bodenmeßkomplexes die unter normalen Bedingungen an einem Meßttag realisierbare Anzahl von Einzelmessungen abgeschätzt und im Versuchsplan wenigstens grobe zeitliche Vorstellungen fixiert werden.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Planung und Durchführung der Bodenexperimente tritt bei der Festlegung der Versuchsparameter auf. Für die meisten der zu berücksichtigenden Merkmale läßt sich der aktuelle Meßwert während der Versuchsvorbereitung und -durchführung nicht steuern. Dazu gehören auch viele wesentliche Merkmale zur Charakterisierung des Objektzustandes. Daher kann man für die hier durchzuführenden Experimente auch keinen Versuchsplan im üblichen Sinne, beispielsweise mit den Methoden der statistischen Versuchsplanung, aufbauen. Diese Methoden gehen davon aus, bestimmte festgelegte Stufen der Eingangsgrößen des Modells auf eine optimale Art zu kombinieren, um mit einer möglichst geringen Anzahl von Einzelversuchen die gesuchten Effekte oder Koeffizienten des Modells zu finden und gleichzeitig Aussagen über die Adäquatheit des Modells zu bekommen sowie die Vergleichbarkeit der Meßdaten zu sichern /19, 49/. Da bei den hier diskutierten Experimenten eine gezielte Wahl der Stufenkombinationen nicht möglich ist, muß eine hohe Zahl von Einzelversuchen bzw. Messungen in Kauf genommen werden, die dann erst nachträglich auf ihre Verwendbarkeit für die statistische Datenauswertung geprüft werden können. Weiterhin muß bei der Planung der Versuche berücksichtigt werden, daß die fachspezifischen Merkmale untereinander Korrelationen und mehr oder weniger starke Wechselwirkungen aufweisen. Zur Untersuchung dieser Korrelationen bzw. Trennung der Wechselwirkungen sind statistische Methoden anzuwenden, die ebenfalls eine hohe Zahl von Einzelmessungen erfordern.

Die Messung der fachspezifischen Merkmale kann je nach zeitlicher Dynamik des jeweiligen konkreten Merkmals in unterschiedlichen zeitlichen Abständen erfolgen, dabei muß jedoch die Vergleichbarkeit der Daten gesichert sein. Die erreichte Gesamtzahl der verwertbaren Einzelverbrauche richtet sich dann nach der Anzahl der auswertbaren Messungen des spektralen Remissionskoeffizienten, für die die vorgesehenen Meßwerte der fachspezifischen Merkmale vorliegen und eine für die Auswertung interessante Stufenkombination ergeben.

#### 4.2. Festlegung der Untersuchungsobjekte und Testgebiete

Entsprechend der in den Vorbemerkungen zu diesem Kapitel formulierten Aufgabenstellung wurden flächenhafte Objekte ausgewählt, deren Zustandserkennung für Aufgaben der Flächennutzungskartierung eine volkswirtschaftliche Bedeutung haben. In diesem Zusammenhang spielt die Erkennung des Zustandes landwirtschaftlicher Nutz- und Kulturpflanzen unter den Bedingungen der DDR eine wesentliche Rolle. Entsprechend den Forderungen aus Abschnitt 3.1. sollten die Objekte nicht höher als 1-2 m sein und keine sehr grobe Struktur (dm-Bereich) besitzen, so daß die maximal realisierbare Meßhöhe von 7 m noch eine hinreichend stabile Messung ermöglicht.

Davon ausgehend wurden zur Erprobung der Meßtechnik und Erarbeitung methodischer Grundlagen folgende Objekte ausgewählt:

- Roggenfeldflächen
- Grünlandflächen (Weideland)

Daneben wurden Untersuchungen an weiteren landwirtschaftlichen Objekten wie Weizen, Gerste, Mais, Kartoffeln und Rüben, an ausgewählten Boden- und Gesteinsarten sowie für spezielle Forschungen durchgeführt.

Bei der Festlegung der Testgebiete erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit der Pädagogischen Hochschule Potsdam, Sektion Geographie, der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg, und dem Bereich III (Geologie) des Zentralinstituts für Physik der Erde Potsdam. Die Experimente zu Vegetationsobjekten wurden auf den Testgebieten in Schmergow bei Potsdam und in Dedelow bei Prenzlau durchgeführt. Im einzelnen erfolgte dabei die Messung an folgenden Objekten:



1. Testgebiet Schmergow, Pädagogische Hochschule Potsdam:
  - Winterroggen, Grünlandflächen (1982/83)
2. Testgebiet Dedelow, Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg:
  - Grünlandfläche (1983)

Die folgende Beschreibung der Testgebiete basiert auf den Zuarbeiten der jeweiligen Kooperationspartner, der Pädagogischen Hochschule Potsdam bzw. des Forschungszentrums für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg.

Das Testgebiet Schmergow ist in der Potsdam-Brandenburger Havelniederung unweit des Trebelsees gelegen. Für das ganze Havelland zwischen Potsdam und Brandenburg ist der Wechsel von Ländchen und Bruch- oder Luchgebieten charakteristisch. Die Ländchen stellen kleine Grundmoränenplatten dar. Ihnen sind zum Teil Kames aufgesetzt /73/. Der obere Teil des Testgebietes kann als Teil einer Mikrochore vom Typ der kuppigen Platten mit anhydromorphem Sand-Geschiebelehmmosaik angesprochen werden /30/. Dieser Teil nimmt einen besonders stark sandüberdeckten Teil der Mikrochore ein. Es dominieren Sand-Rosterden, die nur selten von Geschiebelehm bzw. -mergel unterlagert werden. Der Randsaum zur benachbarten Niederung wird periodisch von Grundwasser beeinflusst. Er trägt Sand-Rostgleye. Das Testgebiet endet im Zentrum der benachbarten Niederung. Hier trifft man auf eine Nanochore vom Typ der vernäbten, vermoorten Niederungsebenen, Sandunterlagerte Niedermoor-torfe dominieren, randlich umgeben von Anmooren und Sand-Humusgleyen. Dieses Gebiet wird in Oberflächennähe permanent von Grundwasser beeinflusst (Abb. 19).

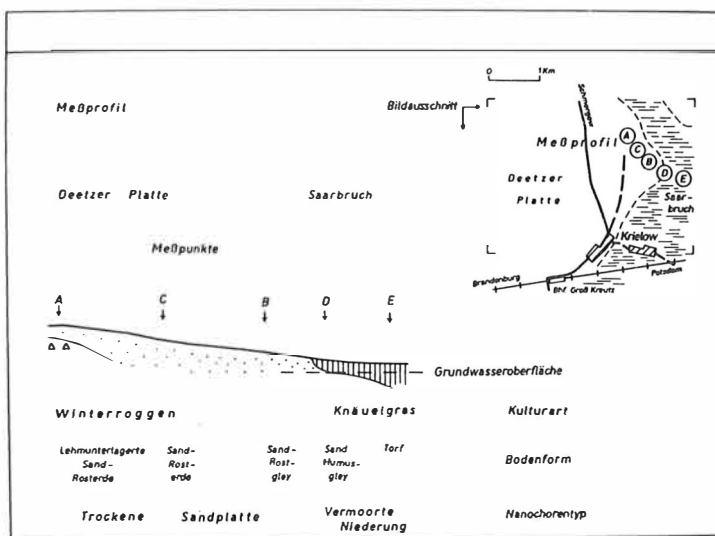


Abb. 19: Testgebiet Schmergow der Pädagogischen Hochschule Potsdam

Das Havelland in der Gegend Schmergow wird in erster Linie auf Grund der dafür günstigen Voraussetzungen obstbaulich genutzt. Nanochoren, die Sandrampen, Sandplatten oder sandige Erhebungen darstellen, werden zumeist durch Forsten ausgewiesen. Dagegen wird im Testgebiet seit Jahren Winterroggen angebaut /6/. In der Niederung dominiert das Grünland. Dort ist Knäuelgras (*Dactylis glomerata*) ausgesät worden.

Das Testgebiet Dedelow, nordwestlich von Prenzlau, gehört zum Ostmecklenburger Gebiet. Es handelt sich dabei um ein stark maritim beeinflusstes Binnentiefeland (Abb. 20). Vorherrschend sind stau-nasse Lehme und Tieflehme der ebenen bis kuppigen Platten. Das Testgebiet ist durch mittlere bis starke Heterogenität gekennzeichnet. Anbaukultur im Jahre 1985 war Vermehrungsklee.

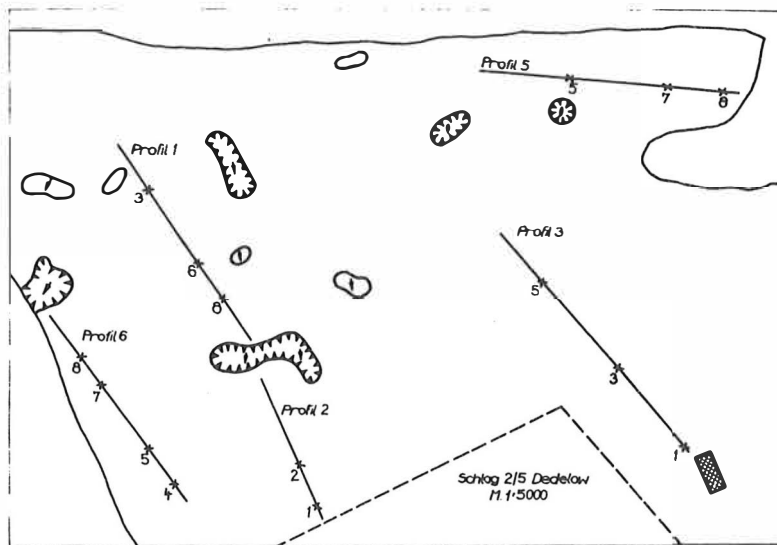


Abb. 20: Testgebiet Dedelow der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg

Das geologische Ausgangsmaterial dieser Grundmoränenlandschaft, die während des Pommerschen Stadiums der Weichseleiszeit entstand, ist Geschlebemergel, ein durch das Inlandeis transportiertes und zerkleinertes stark kalkhaltiges Material. Die als Folge des ungleichmäßigen Abtauens des Eises entstandenen Toteisblöcke hinterließen zahlreiche kleine abflußlose Hohlformen, die Sölle. Im Norden wird der Schlag durch Moorflächen begrenzt, die sich im Holozän im Bereich eines Bachtals bildeten und die heute z. T. landwirtschaftlich genutzt werden. Die Besonderheit des Schlages sind die vor allem im nördlichen Teil abgelagerten Schluffe und Sande.

Durch das versickernde Niederschlagswasser wurde der Kalk in den Untergrund ausgewaschen. Die Verlagerung von Ton führt zu einer deutlichen Schichtung des Bodensubstrats (Texturdifferenzierung). Diese Vorgänge, die für ebene bis schwach geneigte Flächen typisch sind, führten zur Ausbildung von Fahlerden (Salmtleflern-Fahlboden Punkte 1/6 und 3/1). Bei stärkerer Hangneigung, vor allem auf Kuppen, an Hängen, aber auch auf ebenen Flächen wurden unter dem Einfluß der Erosion das leichtere Substrat der Krume und des Oberbodens abgetragen, so daß Lehm- oder Sandlehm-Parabraunerden entstanden (Punkte 3/3 und 6/5). Besonders an Oberhängen mit starker Hangneigung ist der Einfluß der Erosion so groß, daß der gebildete Boden ständig abgetragen wird und der Geschlebemergel bis in die Krume reicht (Punkte 1/3, 1/8, 3/5 u. 6/4 Lehm- oder Sandlehm-Rendzina).

An Unterhängen und in flachen Senken wurden Braunstaugleye gebildet. Ein Staukörper aus schwerem Bodensubstrat behindert das Versickern des Niederschlagswassers. Die Krume ist jedoch noch frei von Vernässungsmerkmalen (Sandlehm- bzw. Lehm-Braunstaugleye, Punkte 2/2 und 6/8). In den tief-

sten Lagen des Schlages, besonders in unmittelbarer Nähe der Sölle wurden Braungleye ausgebildet. Hierbei wird der untere Teil des Profils durch Grundwasser beeinflusst, während die Krume auch hier vernässungsfrei ist (Sandtieflerhm- bzw. Sandlerhm-Braunstaugleye, Punkte 5/5 und 6/7). Mit Punkt 5/8 wurde eine der wenigen auf dem Schlag vorkommenden Sandtieflerhm-Rosterden erfaßt, die durch besonders leichtes Bodensubstrat gekennzeichnet sind. Auf ebenen oder nur schwach geneigten Flächen mit Sanden oder Sälmen als Bodensubstrat sind Braunerden ausgebildet. Sie sind gekennzeichnet durch einen geringmächtigen Humushorizont, eine intensive Verbraunung des Oberbodens und sie sind in den meisten Fällen kalkfrei (Salm-Braunerde bzw. Salmtieflerhm-Braunerde, Punkt 2/1 und 5/7).

Für geologische Forschungen wurde die Bodenmeßtechnik im Gebiet des Harzes (Raum Nordhausen), im Vogtland (Raum Ölsnitz), in Thüringen (Raum Jena) und im Erzgebirge (Raum Steinbach) eingesetzt. Dabei wurden insgesamt etwa 240 Messungen durchgeführt. Die Auswertung der Messungen sowie die fachspezifische Interpretation der Ergebnisse erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Bereich III des Instituts und ist gegenwärtig noch Forschungsgegenstand.

Darüber hinaus erfolgte im Jahre 1982 im Juni ein Einsatz des Bodenmeßkomplexes auf einem Testgebiet in der CSSR. Dabei handelte es sich um das Testgebiet Striteč des Geographischen Instituts der CSAV in Brno (Abb. 21). Die Bestimmung der fachspezifischen Merkmale erfolgte auch hier durch die für das Testgebiet verantwortliche Einrichtung. Als Untersuchungsobjekte waren dabei Weizen, Gerste, Hafer, Mais und Kartoffeln ausgewählt worden. Gleichzeitig mit dem Bodenmeßkomplex des Methodisch-diagnostischen Zentrums für Fernerkundung des Zentralinstituts für Physik der Erde waren hier auch tschechische Spektrometer sowie ein sowjetischer Bodenmeßkomplex im Einsatz.

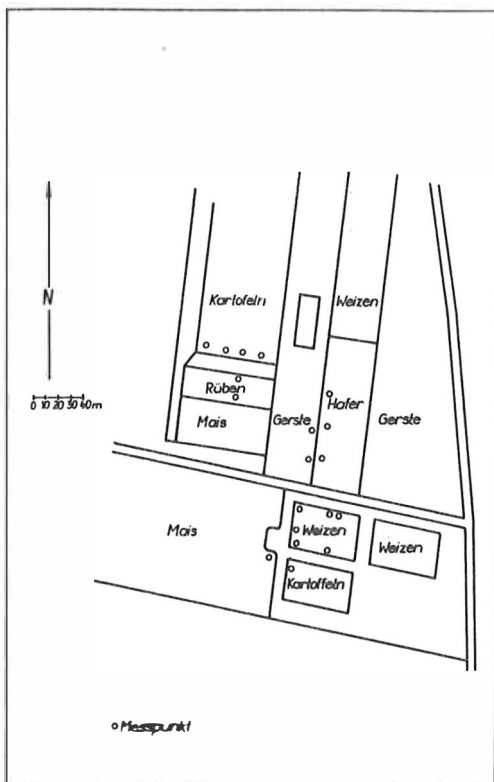


Abb. 21: Testgebiet Striteč  
des Geographischen  
Instituts Brno der  
CSAV

#### 4.3. Auswahl der fachspezifischen Merkmale sowie der Störparameter

Zur Charakterisierung des Objektzustandes wurden vor Beginn der Experimente für die vorgesehenen Beispielobjekte folgende fachspezifische Merkmale ausgewählt:

- trockene Biomasse der Pflanzen
- trockene Biomasse der Blätter
- feuchte Biomasse der Pflanzen
- feuchte Biomasse der Blätter
- Gehalt an Chlorophyll A
- Gehalt an Chlorophyll B
- projektiver Bedeckungsgrad (geschätzt)
- Wassergehalt der Pflanzen
- Blattflächenindex
- Ertragskomponenten
  - a) Pflanzendichte
  - b) Ährendichte
  - c) TKM

Verbal eingeschätzt wurden:

- Objektsorte
- phänologische Entwicklungsphase

Zu den für die Auswertung nötigen und daher mit berücksichtigten fachspezifischen Merkmalen und Einflußgrößen, die nicht direkt das Objekt betreffen, gehörten:

##### a) zur Charakterisierung des Bodens

- Bodenfeuchte
- Bodentemperatur
- ph-Wert des Bodens
- Gehalt an organischen Bestandteilen (Humus)
- Gehalt an verschiedenen Nährstoffen und Salzen
- Körnung
- Gehalt an Eisenoxid

##### b) zur Charakterisierung der meteorologischen Bedingungen

- Lufttemperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Windgeschwindigkeit
- Niederschlagsmenge

##### c) Zur Charakterisierung der Meßbedingungen

- Meßhöhe
- Bearbeitungsrichtung
- Sonnenhöhe
- Einstrahlungsbedingungen (Bewölkung, Trübung der Atmosphäre)

Diese drei Merkmalsgruppen charakterisieren nicht direkt den Objektzustand, können ihn aber möglicherweise merklich beeinflussen oder wirken sich auf den Meßwert der Remission aus. Sie sind damit als Parameter mit wesentlichem Einfluß zu behandeln.

Im Verlaufe der Experimente zeigte sich erwartungsgemäß, daß unter den hier genannten Merkmalen solche mit erheblichen Auswirkungen auf das Remissionsverhalten (z. B. Chlorophyllgehalt, projektiver Bedeckungsgrad, Wassergehalt und phänologische Phase), aber auch Merkmale mit geringer Korrelation sind (siehe auch Kap. VI).

A-priori liegen damit 14 Objektmerkmale vor, wobei zwei davon (Sorte und phänologische Entwicklungsphase) nicht numerischer Art sind, Krankheits- bzw. Schädlingsbefall wurden nicht als Merkmale berücksichtigt, da alle Messungen ausschließlich an gesunden Beständen durchgeführt wurden. Weiterhin werden 14 zusätzliche Einfluß- bzw. Störgrößen berücksichtigt. Diese hohe Zahl von insgesamt 28 fachspezifischen Merkmalen macht es notwendig, zunächst nur jeweils maximal 2 - 3 Stufen für jedes Merkmal zuzulassen.

#### 4.4. Aufstellung des Versuchsplanes

Die Festlegung der Meßpunkte für das Testgebiet Schmergow erfolgte durch die PH Potsdam. Dabei wurde davon ausgegangen, daß auf der Grundlage unterschiedlicher Bodenbeschaffenheiten verschiedene Objektzustände realisiert werden sollten. Entsprechend /4/ zeigt die Abb. 19 die Lage der Meßpunkte im Testgebiet sowie die zugehörige verbale Beschreibung der Bodenform. Auf der Grundlage der unterschiedlichen Bodenformen wurden für die einzelnen Meßpunkte im Verlaufe der Meßperiode sowohl unterschiedliche Bodenfeuchtwerte als auch unterschiedlicher Nährstoffgehalt erwartet, was sich in unterschiedlichen Objektzuständen des Getreides auswirken sollte.

Um den markierten Meßpunkt wurde ein Gebiet von 25 m x 25 m bezüglich der Bodenparameter und anderen Einflußgrößen als homogen angenommen. In diesem Gebiet erfolgten die Messungen an zufällig verteilten Meßpunkten.

Im Jahre 1982 erfolgten die Messungen an den Meßpunkten A, B und D, während im Jahre 1983 Meßpunkt C hinzukam.

Auf dem Testfeld Dedelow erfolgte die Festlegung der Meßpunkte ebenfalls durch den zuständigen Kooperationspartner. Auf dem unter realen Bedingungen mit Futterkulturen bewirtschafteten Feld befinden sich 30 Meßpunkte. Davon wurden durch das Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Münchenberg 15 Meßpunkte für Spektrometermessungen ausgewählt (Abb. 20). Diese 15 Meßpunkte konnten entsprechend ihrer Bodenbeschaffenheit in 7 Gruppen zu je 1 - 4 Punkten eingeteilt werden. Diese Gruppen beinhalten dabei Senken, Kuppen und Hanglagen. Konkrete Ausführungen dazu erfolgen im Kapitel VI.

Unter Berücksichtigung der Umsetzzeit des Bodenmeßkomplexes sind im Testgebiet Schmergow an einem Meßtag von jedem Meßpunkt ca. 20 - 30 Messungen zu erzielen. Damit müssen für jede Phäno-phase etwa 3 - 4 Meßtage veranschlagt werden. Im Testgebiet Dedelow sind auf Grund der häufigeren Umsetzungen, wobei allerdings die Abstände der Punkte voneinander z. T. gering sind, nur etwa 5 - 10 Messungen pro Meßpunkt und -tag realisierbar. Faßt man die in jeder Gruppe zusammengehörigen Punkte zusammen, so sind auch hier mindestens 3 Meßtage nötig. Dabei wird vorausgesetzt, daß innerhalb der ausgewählten Meßpunkte bzw. Meßpunktgruppen alle fachspezifischen Merkmale homogen sind und sich keine weiteren Untergruppen innerhalb der Meßpunkte bzw. Meßpunktgruppen ergeben.

Unter Berücksichtigung der Einsatzbedingungen und -möglichkeiten des Bodenmeßkomplexes wurde ein Versuchsplan ausgearbeitet, der den Einsatz der BMK auf beiden Testgebieten in der Vegetationsperiode von April bis August zu den für die Pflanzentwicklung entscheidenden Terminen vorsieht. Auf der Grundlage des bisher Gesagten ergab sich für die Durchführung der Remissionsmessungen folgender konkreter Versuchsplan:

Im Testgebiet Schmergow erfolgt die Messung an mindestens 3 Meßtagen für jede Phänophase. Dabei werden an jedem Meßtag für die Meßpunkte A - C jeweils insgesamt 30 Messungen bei 2 Umsetzungen pro Meßpunkt mit jeweils 5 Auslegerstellungen und jeweils einer Wiederholungsmessung angestrebt. Meßpunkt D wird mit 10 Messungen bei 5 Auslegerstellungen und jeweils einer Wiederholungsmessung erfaßt. Zusätzlich werden nach Möglichkeit der Feldweg unmittelbar vor Meßpunkt B mit 3 - 5 Messungen bei 2 - 3 Auslegerstellungen und der Schlackeweg am östlichen Feldrand ebenso vermessen. An den drei Meßtagen sind die Meßpunkte in unterschiedlicher Reihenfolge abzuarbeiten. Zu drei Zeitpunkten (Beginn, Mittag, Ende) des Meßtages sind jeweils zwei Serien des Eichnormals einzuschleppen.

Im Testgebiet Dedelow sind für die Messungen jeweils 3 Meßtage vorgesehen. An jedem Meßpunkt erfolgen pro Meßtag für 5 Auslegerstellungen mit jeweils einer Wiederholungsmessung insgesamt 10 Einzelmessungen. An jedem Meßtag sind die 15 Meßpunkte in unterschiedlicher Reihenfolge aufzunehmen. Die Messung der Eichtafel erfolgt wie im Testgebiet Schmergow.

Die Messung der fachspezifischen Merkmale erfolgt nach Abstimmung und entsprechender Berücksichtigung der speziellen Anforderungen durch die Versuchsmethodik entsprechend den Versuchsplänen der jeweiligen Kooperationspartner. Ein Austausch der Meßergebnisse wird noch im Verlaufe der jeweiligen Meßkampagne angestrebt.

Bei völliger Erfüllung des im Versuchsplan angestrebten Ziels stehen damit von jedem Meßpunkt in jeder Phänophase etwa 80 - 120 Einzelmessungen zur Verfügung, was ein statistisches Herangehen bei der Auswertung der Meßdaten erlaubt.

##### 5. Aufbereitung der Meßdaten

Entsprechend den Aussagen in Kapitel III und IV ist es bei den hier diskutierten Experimenten i. a. nicht möglich, sogenannte optimale, im statistischen Sinne vollständige und homogene Versuchspläne, die für eine durchgängige statistische Analyse erforderlich sind, zu realisieren. Deshalb bleibt ein heuristischer Anteil bei der Datenauswertung erhalten und die Verfahren zur Aufbereitung und Auswertung der Meßdaten erstrecken sich auf qualitative Interpretationen, die durch statistische Analysen gestützt werden.

Entsprechend den im Bodenmeßkomplex des Methodisch-diagnostischen Zentrums für Fernerkundung realisierten technischen Voraussetzungen (vgl. Kap. III) liegen die einzelnen Meßdaten als nicht korrigierte Zahlenwerte auf Magnetbandkassette gespeichert vor und sind deshalb sowohl für die visuelle Interpretation als auch für statistische Analysen in einer effektiven Form bereitzustellen.

Für die Datenübernahme und Datenvorverarbeitung sind dabei automatisierte Programmabläufe unbedingte Voraussetzung. Geht man von 100 Meßserien pro Tag aus, so fallen an einem Meßtag insgesamt ca. 40 000 einzelne Meßwerte an, was eine visuelle Kontrolle und Begutachtung oder manuelle Übernahme in die EDV-Anlage von vornherein ausschließt.

Aus diesem Grunde wurde für das im BMK installierte Datenaufzeichnungsgerät eine Kopplungsmöglichkeit an den im Bereich vorhandenen Kleinrechner SM-4 geschaffen und die zugehörige Software entwickelt. Eine Übersicht zu dem in diesem Zusammenhang erstellten Softwarepaket gibt Abb. 22.

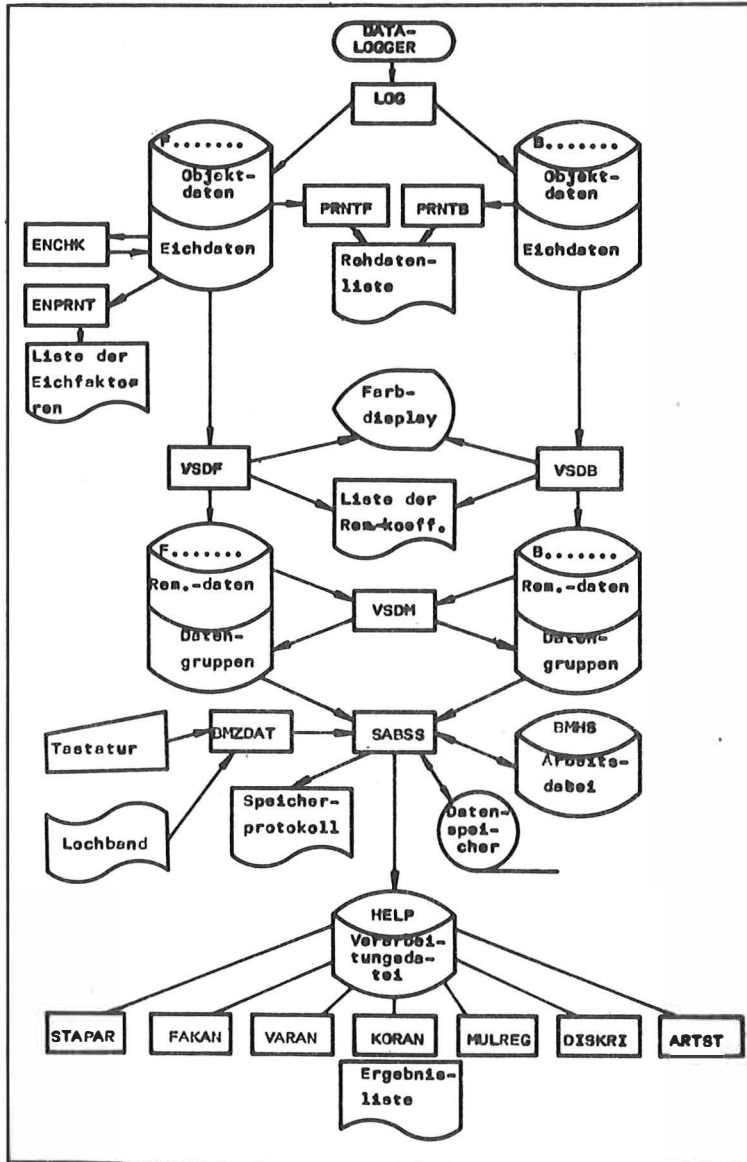


Abb. 22: Übersicht zur Software für die Bearbeitung von Bodenmeßdaten

Grundsätzlich gliedert sich die Auswertung der Meßdaten in 3 Hauptabschnitte:

1. Übernahme, Kontrolle und Korrektur der Rohdaten, Berechnung der Remissionswerte aus den Rohdaten
2. Speichern der Daten in einer Datenbank, Zusammenfügen der zusammengehörigen fach- und fernerkundungsspezifischen Datensätze
3. Visualisierung der korrigierten Daten, qualitative Interpretation und Untersuchung der Datensätze mit statistischen Methoden

Zur Lösung jeder dieser 3 Teilaufgaben wurden spezielle Programme geschaffen. Diese sind der jeweiligen konkreten Aufgabe, der vereinbarten Datenstruktur sowie der aus der Meßmethode herrührenden Datenfolge speziell angepaßt und ermöglichen so eine weitgehend automatisierte technologische Kette bei der Datenverarbeitung von der Datenübernahme an. Entsprechend dieser Gliederung werden die drei Bearbeitungsschritte in den Abschnitten 5.1. - 5.3. vorgestellt.

#### 5.1. Datenübernahme und Vorverarbeitung

Durch das Datenübernahmeprogramm LOG erfolgt das sequentielle Auslesen der Meßwerte aus dem Datensammelgerät. Dabei erkennt das Programm automatisch, mit welchem Gerät die Messung erfolgte und trennt die Meßwerte dementsprechend. Weiterhin generiert das Programm selbständig einen temporären Datennamen für jede aufgenommene Meßserie entsprechend den dafür getroffenen Vereinbarungen. Dieser Name enthält Informationen darüber, mit welchem Gerät die Messung erfolgte, über den Meßort, den Meßtag, die Nummer der Meßserie sowie über das vermessene Objekt. Bei Beginn jeder neuen Meßserie, der ebenfalls automatisch erkannt wird, erfolgt auf dem Bedienmonitor eine Kontrollausdrück der ersten 30 Meßwerte mit der bereits bei der Messung eingegebenen Kontrollcodennummer. Die übernommenen Meßwerte werden auf einer Wechselplatte zwischengespeichert. Von dort kann mit den Programmen PRNTF bzw. PRNTB ein Listenausdruck der Rohdatensätze erfolgen. Die Weiterverarbeitung der Rohdaten erfolgt für die mit dem Feldspektrometer BSF-83 gemessenen Daten mit dem Programm VSDF, für die mit dem Radiometer gemessenen Daten mit dem Programm VSDB. Diese Trennung ist sinnvoll, da sich beide in der Datenstruktur und damit auch in der Form der Bearbeitung stark voneinander unterscheiden.

Die Berechnung der spektralen Remissionskoeffizienten für die Messungen mit dem Feldspektrometer erfolgt mit Hilfe der unmittelbar aufeinanderfolgenden Meßwerte der remittierten und der einfallenden Strahlung sowie der in einer speziellen Datei gespeicherten Eichfaktoren  $F$ , die mittels Eichmessungen vorher bestimmt wurden (vgl. Pkt. 3.4.). Dazu werden die mit den Meßwerten gleichzeitig registrierten Informationen über den von der Steuerautomatik je nach Stärke der auf den Sensor fallenden Strahlung ausgewählten Meßkanal ausgewertet und für die Berechnung entsprechend berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt nach der Formel:

$$R_n = U_{Bn(KX)} \cdot X / U_{Hn(KY)} \cdot Y / F_n$$

- mit
- $U_{Bn}$ : Meßwert der remittierten Strahlung im Spektralkanal  $n$
  - $U_{Hn}$ : Meßwert der einfallenden Strahlung im Spektralkanal  $n$
  - $KX, KY$ : Meßkanal  $X, Y$
  - $X, Y$ : Empfindlichkeitskoeffizienten für Meßkanal  $X, Y$
  - $F_n$ : Eichfaktor für Spektralkanal  $n$



Die Anwendbarkeit der aus den Eichmessungen vorher bestimmten Eichfaktoren  $F$  kann mit einem speziellen Programm vorher an Hand der im Feld durchgeführten Kontrollmessungen überprüft werden. Die berechneten Remissionskoeffizienten werden unter dem gleichen Namen wie die Rohdaten auf der Wechselplatte gespeichert, zusätzlich enthält die Datei nach der Bearbeitung auch noch die umgerechneten Meßwerte der einfallenden Strahlung.

Für das Radiometer erfolgt die Korrektur und Normierung der Daten mit dem Programm VSDB entsprechend der im Kapitel III diskutierten Methodik. Die Meßwerte im Kanal 8 (10,4 - 12,5  $\mu\text{m}$ ) werden dabei entsprechend der vom Hersteller des Gerätes angegebenen Methode in Werte der Objektoberflächentemperatur umgerechnet.

Die fachspezifischen Merkmale werden über spezielle Eingabeprogramme, die eine Übernahme der Daten vom Lochstreifen oder von der Eingabetastatur gestatten, eingelesen. Zum Abschluß des ersten Bearbeitungsteils "Datenvorverarbeitung" werden die bearbeiteten Einzeldatensätze entsprechend ihrer Zusammengehörigkeit in Gruppen zu einer Aufzeichnung zusammengesetzt, so wie auch die spätere Speicherung in der Bodendatenbank erfolgt. Die Ergebnisse in den einzelnen Vorverarbeitungsstufen können jeweils als Datenliste über einen Drucker oder auch als Kurvendarstellung über ein graphisches Display ausgegeben werden.

## 5.2. Datenspeicherung

Im zweiten Bearbeitungsstadium erfolgt die Speicherung der Daten in der Bodendatenbank. Speichermedium ist ein Magnetband. Zur Arbeit mit dieser Datenbank wurde ein universelles Programm geschaffen, das aus den Programmtteilen Steuerprogramm, Verzeichniswartung, Löschen, Datenbereitstellung, Übernahme von Radiometerdaten und Daten- und Verzeichniskorrektur besteht. Die genannten speziellen Datenübernahmeprogramme sind auf die jeweils vorliegende Datenstruktur abgestimmt und arbeiten weitgehend automatisch, das allgemeine Datenübernahmeprogramm ist in erster Linie für die Übernahme der fachspezifischen Daten vorgesehen. Damit enthält die Datenbank sowohl die gemessenen Remissionsdaten als auch alle parallel dazu gewonnenen Daten der fachspezifischen Merkmale. Dabei ist auch ein nachträgliches Vervollständigen einzelner Datensätze möglich. Nicht mehr benötigte Aufzeichnungen können gelöscht werden und belasten so den Speicherplatzbedarf der Bodendatenbank nicht mehr.

Mit dem Programmtteil Verzeichniswartung kann jederzeit ein aktuelles Inhaltsverzeichnis der Datenbank erstellt werden. Dazu wird zu jeder Aufzeichnung die Aufzeichnungsnummer, ein Statussymbol, die Anzahl der in der jeweiligen Aufzeichnung enthaltenen Datensätze, das Datum der Messung sowie der Meßort bzw. das Meßobjekt und die Anzahl der enthaltenen Merkmale sowie ihre Anordnung in einen speziellen Verzeichnissatz vor den zugehörigen Datensätzen gespeichert. Dieser Verzeichnissatz enthält darüber hinaus noch einen bei der Datenübernahme eingebbaren Kommentar zu der jeweiligen Aufzeichnung.

Das Programm ermöglicht darüber hinaus die Auswahl und Bereitstellung einzelner Daten oder Datensätze in einer für die statistische Auswertung günstigen Datenstruktur.

## 5.3. Statistische Datenanalyse

Im dritten Bearbeitungsschritt erfolgt die Auswertung und Analyse der Daten mit Hilfe statistischer Methoden zur Unterstützung der Interpretation der Ergebnisse. Dazu können zunächst die Mittelwerte und Standardabweichungen der aus dem Datenspeicher bereitgestellten Meßdaten berechnet werden. Dies kann zur Vorinformation oder manuellen Grobauswertung benutzt werden. Das Programm zur statistischen Analyse der Meßdaten ermöglicht darüber hinaus die Durchführung von Varianzanalysen,

Regressionsanalysen, Faktorenanalysen, Korrelationsuntersuchungen und Diskriminanzanalysen. Je nach den gegebenen Erfordernissen, Aufgaben und Randbedingungen kann so das Datenmaterial in verschiedener Art und Weise mit Hilfe unterschiedlicher statistischer Methoden untersucht werden. Jede einzelne Methode hat dabei ihre speziellen Aufgaben.

### 5.3.1. Faktorenanalyse

Für die in der Grundlagenforschung der Fernerkundung zu untersuchenden Probleme spielt die Faktorenanalyse insbesondere bei der Untersuchung der Beziehungen der fachspezifischen Merkmale untereinander eine Rolle. Da mitunter die Korrelationen zwischen einzelnen fachspezifischen Merkmalen sehr hoch sind und verschiedene Einflußfaktoren somit gleiche oder ähnliche Wirkungen am Objekt hervorrufen können, ist der Rückschluß vom Remissionswert als Ausdruck dieser Wirkung auf ein einzelnes fachspezifisches Merkmal oft nicht eindeutig und damit nicht stabil. Die Fernerkundung kann nur den Rückschluß auf einen Merkmalskomplex gestatten, der alle Einflußfaktoren bzw. fachspezifischen Merkmale enthält, die eine bestimmte Wirkung hervorrufen oder beschreiben. Die Faktorenanalyse dient der Suche nach solchen komplexen generalisierten Merkmalsgruppen, die sich eindeutig auf die spektralen Merkmale abbilden (siehe Pkt. 2.3.4.). Grundlage der Faktorenanalyse ist das lineare Modell. Dabei geht man von der Annahme aus, daß sich  $n$  verschiedene Merkmale, die untereinander Korrelationen aufweisen können, auf  $s$  Faktoren zurückführen lassen /70/. Dazu werden die  $m$  Merkmale an  $n$  Individuen gemessen und mittels der Faktorenanalyse die Struktur des Merkmalsbereiches untersucht und eine Anzahl von Faktoren oder Merkmalskomplexen extrahiert. Dabei werden i. a. nicht alle extrahierbaren Faktoren berücksichtigt, sondern nur diejenigen, die einen hohen Beitrag zur gesamten Merkmalsvarianz liefern. Man spricht in diesem Falle von einer reduzierten Faktorenlösung. Auf der Grundlage des linearen Modells ergibt sich für die Beziehung zwischen den  $n$  Merkmalen  $X$  und den  $s$  hypothetischen Faktoren  $F$  die Gleichung

$$X = A \cdot F.$$

Die Matrix  $X$  der Merkmale heißt Datenmatrix und ist vom Typ  $(m, n)$ . Die Matrix  $F$  (Faktorenwertematrix) ist vom Typ  $(s, n)$ .

$A$  ist die Matrix der Faktorenladungen und vom Typ  $(m, s)$ . Die Ladungen ändern sich von Merkmal zu Merkmal, jedoch nicht die Werte der Faktoren. Dagegen gehen Unterschiede der Individuen nur in die Faktorenwerte, nicht aber in die Ladungen ein. Die Faktoren werden als unkorrelierte Variable angenommen. Bei der reduzierten Faktorenlösung werden nur die ersten  $k$  Faktoren mit ihren Ladungen berücksichtigt. Es ergibt sich

$$X = A_k \cdot F_k + A_{s-k} \cdot F_{s-k}$$

oder

$$X = X + Q$$

wobei  $Q$  die Matrix der Restwerte (Fehler) ist und  $X$  die reduzierte Datenmatrix genannt wird. Sie ist eine Schätzung der Matrix  $X$ , ihr Rang ist  $k$   $m$ ; sie bezieht sich nur auf die  $k$  interpretierbaren Faktoren.

Das eigentliche faktorenanalytische Modell läßt sich also ausführlich folgendermaßen schreiben:

$$X_1 = a_{11}f_1 + a_{12}f_2 + \dots + a_{1k}f_k + q_1$$

$$X_2 = a_{21}f_1 + a_{22}f_2 + \dots + a_{2k}f_k + q_2$$

·  
·  
·

$$X_m = a_{m1}f_1 + a_{m2}f_2 + \dots + a_{mk}f_k + q_u$$

Von den auftretenden Faktorenladungen können einige sehr klein (nahe 0) sein, so daß ein bestimmtes Merkmal in dem entsprechenden Faktor nicht geladen ist und durch weniger als  $k$  Faktoren bestimmt wird. Die Anzahl der Faktoren, die zu einer linearen Beschreibung eines Merkmals benötigt wird, heißt Komplexität des Merkmals. Dabei wird angestrebt, daß jedes Merkmal nur durch eine möglichst geringe Zahl von Faktoren beschrieben wird. Dies wird durch entsprechende Rotation der Faktoren zu erreichen versucht. Methoden zur Bestimmung der Faktorenladungen sind in /70/ beschrieben, es wird dabei nachgewiesen, daß brauchbare und von der jeweiligen Skalierung unabhängige Ergebnisse nur mit einer auf der Maximum-Likelihood-Schätzung beruhenden Methode erreichbar sind. Daher wurde auch diese etwas aufwendige Methode zur Bestimmung der Faktorenladungen programmiert und in das Programmpaket zur statistischen Datenanalyse implementiert.

### 5.3.2. Varianzanalyse

Die Varianzanalyse dient der Trennung der Varianzanteile der Merkmale und der Untersuchung statistisch gesicherter Unterschiede in den Meßwerten eines Merkmals. Man unterscheidet dabei zwischen Modell I (Modell mit festen Effekten), bei denen die Stufen der Einflußfaktoren fest vorgegeben sind, und Modell II (Modell mit zufälligen Effekten), bei denen die Stufen selbst eine Stichprobe aus der Gesamtheit aller Stufen der Einflußfaktoren darstellen und auch die Wirkungen (Effekte) der Einflußfaktoren zufälligen Charakter tragen /41, 43/. Bei der Anwendung der Varianzanalyse wird davon ausgegangen, daß sich die Wirkungen der Einflußfaktoren einschließlich Wechselwirkungen additiv überlagern. Hinzu kommt ein additiver Versuchsfehler als Ergebnis einer Reihe im einzelnen nicht erfäßbarer Einflüsse und Störungen. Daraus ergibt sich folgendes allgemeines Modell für die Varianzanalyse:

$$y_{ik} = \mu + A_i + E_{ik}$$

wobei  $y_{ik}$  das Versuchsergebnis der  $k$ -ten Messung in der  $i$ -ten Faktorenstufe darstellt,  $\mu$  der "Gesamtmittelwert",  $A_i$  die Wirkung des Einflußfaktors auf der  $i$ -ten Stufe und  $E_{ik}$  der zufällige Fehler der Messung ( $ik$ ) ist. Die  $A_i$  sind im Modell I feste Größen, während sie im Modell II Zufallsvariablen darstellen. Insbesondere findet das Modell II dort Anwendung, wo die Versuchsergebnisse an Hand von Stichproben ermittelt wurden, wobei die Stufen des Einflußfaktors nicht gezielt gewählt wurden bzw. werden konnten. Bei dem nach /41/ erstellten Programm ist sowohl eine Analyse nach Modell I als auch nach Modell II mit einem oder zwei Einflußfaktoren möglich. Zusätzlich gestattet es die Durchführung eines Signifikanztests, an Hand dessen die für die Anwendung der Varianzanalyse nötige Voraussetzung gleicher Streuung bei Versuchsergebnissen, die unter gleichen Bedingungen gewonnen wurden, geprüft werden kann. In den Aufgabengebieten der Fernerkundung ist mit Hilfe der Varianzanalyse insbesondere zu prüfen, ob bestimmte vorgegebene Stufen eines fachspezifl-

schen Merkmals oder einer Einflußgröße bzw. eines Merkmalskomplexes mit verschiedenen Merkmalen und Einflußfaktoren bei den fernerkundungsspezifischen Merkmalen überhaupt zu unterscheidbaren Meßwerten führen.

### 5.3.3. Regressions- und Korrelationsanalyse

Auch bei der Regressionsanalyse muß zwischen dem Modell I mit einseitigen stochastischen Abhängigkeiten, d. h. eine Zufallsvariable hängt von einer oder mehreren deterministischen unabhängigen Variablen ab, und dem Modell II mit zwei- und mehrseitigen stochastischen Abhängigkeiten von meßbaren Merkmalen unterschieden werden. Letzteres wird auch als Korrelationsanalyse bezeichnet. Ziel der Regressionsanalyse (Modell I) ist die Bestimmung der Regressionskoeffizienten  $a_1$ , die die lineare Regressionsgleichung

$$y_k = a_0 + a_1 x_1^{(1)} + \dots + a_m x_m^{(k)} + E_k$$

erfüllen. Dabei sind die  $x_i^{(k)}$  die  $k$ -ten Meßwerte der  $m$  in die Betrachtung einbezogenen unabhängigen Variablen und  $E_k$  die Summe der zufälligen Störungen oder Fehler der Messung  $k$ . Dagegen können mehrseitige stochastische Abhängigkeiten durch Korrelationskoeffizienten beschrieben werden, wobei im Falle von mehr als zwei betrachteten Merkmalen sogenannte partielle und multiple Korrelationskoeffizienten herangezogen werden. Diese werden bei der Korrelationsanalyse bestimmt. Bei der in der Fernerkundung interessierenden Problemstellung kommt es in erster Linie auf die Untersuchung der Korrelationen zwischen den einzelnen fachspezifischen Merkmalen bzw. den mit Hilfe der Faktorenanalyse ermittelten generalisierten Merkmalskomplexen und den spektralen Remissionskoeffizienten der Objekte an. Sind diese Korrelationen bekannt, so kann versucht werden, die von einem Fernerkundungssensor gelieferten Meßwerte als unabhängige, deterministische Größen zu betrachten und Regressionsbeziehungen zu den fachspezifischen Merkmalskomplexen zu finden. Mit diesen wäre dann das Ziel erreicht, aus Fernerkundungsdaten quantitative Objektzustände zu bestimmen. Dabei ist jedoch auch das Problem der Normierung der Fernerkundungsdaten zu berücksichtigen.

### 5.3.4. Diskriminanzanalyse

Die Diskriminanzanalyse ermöglicht die Trennung oder Klassifizierung von Objekten in zwei oder mehrere Gruppen durch Analyse der Werte quantitativ erfaßbarer Merkmale sowie die Aufstellung optimaler Trennfunktionen. Mit Hilfe dieser Trennfunktionen ist dann auch die Klassifizierung weiterer Objekte, deren Gruppenzugehörigkeit unbekannt ist, möglich. Schließlich kann geprüft werden, ob die vorgenommene Trennung mittels der berechneten Trennfunktionen statistisch gesichert ist /41/. Diese Aufgabenstellungen treten in der Fernerkundung an den verschiedensten Stellen auf, daher wurde diese statistische Methode auch in das Programmpaket zur statistischen Auswertung mit aufgenommen.

Auf eine nähere Diskussion der speziellen Probleme der statistischen Auswertung soll hier verzichtet werden, es sei auf die entsprechende Fachliteratur /19, 41, 43, 49, 70/ verwiesen. Hervorheben muß man an dieser Stelle nochmals die nötige Anzahl von Messungen für die statistische Auswertung. Dabei geht es nicht schlechthin um Messungen unter beliebigen Bedingungen, sondern um im statistischen Sinne vergleichbare Messungen unter vergleichbaren Bedingungen. Dies muß in einem ersten Schritt der Datenanalyse geprüft werden

## 6. Auswertung und Ergebnisse der Feldexperimente 1982/83

### 6.1. Ergebnisse der Meßperiode 1982

Von den etwa 300 im Meßjahr 1982 insgesamt durchgeführten Messungen fanden 102 Messungen im Testgebiet Schmergow statt, 61 Messungen im Festgebiet Müncheberg, 36 Messungen wurden für spezielle Forschungen durchgeführt und 86 Messungen erfolgten im Rahmen eines gemeinsamen Komplexexperimentes in der CSSR.

Die Messungen in Schmergow erfolgten entsprechend dem im Kapitel V aufgestellten Versuchsplan in sieben Meßeinsätzen in der Zeit vom 7. 4. bis 4. 10. 1982. Die Messungen betrafen folgende Objekte:

Datum	Roggen A	Roggen B	Wiese D	Boden	Eichmessungen
7. 4. 82	/	6/	/	/	3
6. 5. 82	6	5	3	2	5
20. 5. 82	/	5	3	3	2
4. 6. 82	7	6	1	/	1
14. 7. 82	5	5	3	1	4
26. 7. 82	4	5	2	2	4
4. 10. 82	/	/	2	4	3

Der Einsatz in der CSSR fand vom 22. 6. bis 1. 7. 1982 auf dem Testgebiet bei Brno statt und umfaßte Messungen an 7 verschiedenen Objekten: Weizen, Hafer, Gerste, Mais, Kartoffeln, Zuckerrüben und Ackerboden.

Ausgehend von den im Kapitel III diskutierten Problemen bei der Realisierung der Meßtechnik ist der Einsatz 1982 vordergründig als Testeinsatz und erste Erprobung der im Bodenmeßkomplex installierten Meßtechnik zu bewerten. Trotzdem wurden die hierbei gewonnenen Daten bereits auf ihre Auswertbarkeit geprüft und, wo dies möglich war, entsprechend bearbeitet.

Die Bearbeitung beschränkte sich dabei auf den Bearbeitungsabschnitt 1, d. h. die Vorverarbeitung, Korrektur und Berechnung der spektralen Remissionskoeffizienten der Messungen und bildete die Grundlage für die heuristische Interpretation der Daten. Die berechneten Remissionskoeffizienten ausgewählter Einzelmessungen wurden dabei bezüglich bestimmter fachspezifischer Merkmale qualitativ miteinander verglichen. Die dabei gewonnenen Ergebnisse der Untersuchungen in Schmergow und in der CSSR lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Durch die Messungen an verschiedenen Flächennutzungsobjekten während des Experimentes in der CSSR wurde nachgewiesen, daß sich verschiedene Vegetationsobjekte z. T. im spektralen Verlauf des Remissionskoeffizienten bei Beibehaltung des allgemeinen Verlaufs von lebenden pflanzlichen Objekten recht deutlich voneinander unterscheiden (Abb. 23). Über die Trennbarkeit kann jedoch erst nach Berücksichtigung der jeweiligen Objektzustände sowie der innerhalb eines Zustandes und beim Auftreten mehrerer Zustände entstehenden Streuung der Remissionswerte entschieden werden. Lediglich der prinzipiell andere Verlauf des Remissionskoeffizienten unbelebter, nicht chlorophyllhaltiger Objekte ist aus den Daten mit Sicherheit abtrennbar. Die durch unterschiedliche Objektzustände innerhalb einer Objektart hervorgerufenen Änderungen des spektralen Verlaufes der Remissionskurve kann die Unterschiede zwischen einzelnen Objektarten dabei durchaus übersteigen (Abb. 24). Bei den dar-

gestellten Kurven handelt es sich um Messungen verschiedener Zustände des Objektes Weizen, die Messungen erfolgten ebenfalls während des Experiments in der CSSR. Die unterschiedlichen Zustände wurden durch verschiedene Düngergaben verursacht. Dabei war visuell keine Unterscheidung der einzelnen Zustandsstufen möglich. Trotzdem liegt der Variationskoeffizient im sichtbaren Teil des Spektrums bei ca. 5 - 7 %, im infraroten Teil sogar bei 15 %. Wie groß dabei der Anteil der durch die unterschiedlichen Objektzustände hervorgerufenen Varianz und der durch äußere Faktoren hervorgerufene Varianzanteil war, konnte bei diesen Messungen noch nicht geklärt werden.

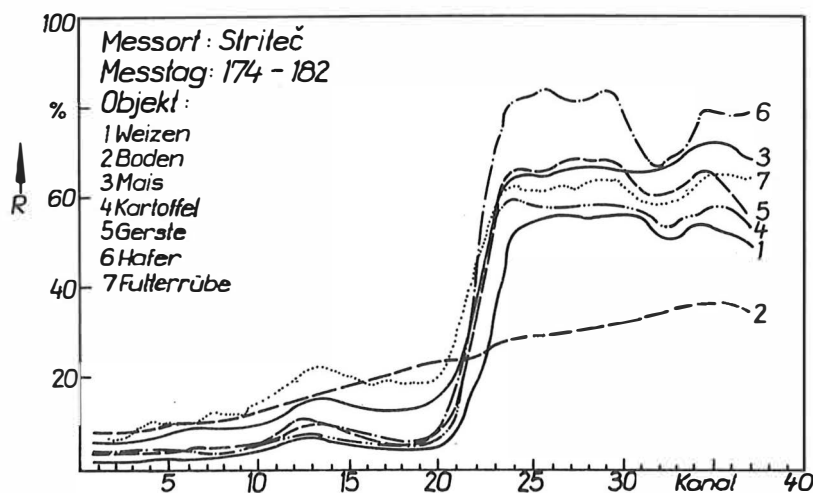


Abb. 23: Spektrale Remissionskurven verschiedener Objekte im Testgebiet Stritec bei Brno

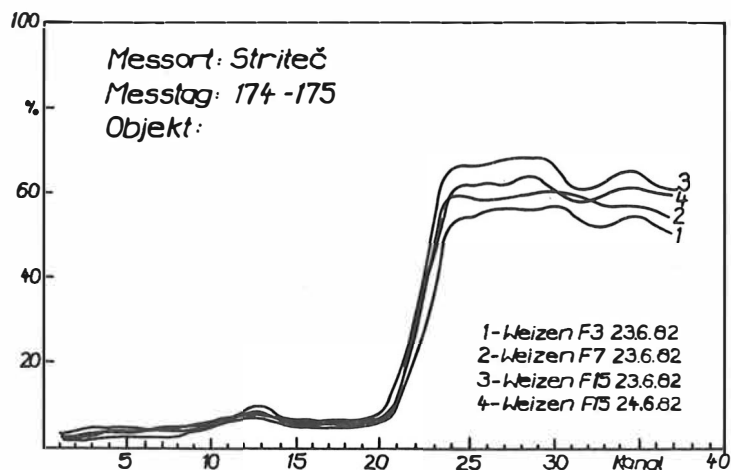


Abb. 24: Remissionskurven verschiedener Weizentestflächen im Testgebiet Stritec bei Brno

Ein weiteres Beispiel (Abb. 25) aus dem Meßeinsatz in der CSSR zeigt wiederum eine deutliche Abhängigkeit der spektralen Remissionskurve vom Objektzustand. Die hier untersuchten Kartoffelpflanzen repräsentierten jeweils unterschiedliche Objektzustände, die durch die Größe bzw. den Durchmesser des überirdisch ausgebildeten Pflanzenteils als deutlichstes Objektmerkmal charakterisiert wurden. Da in allen 4 Testfeldern gleiche Pflanzenabstände vorlagen, wurde zur quantitativen Erfassung des Objektzustandes der projektive Bedeckungsgrad der Pflanzen benutzt.

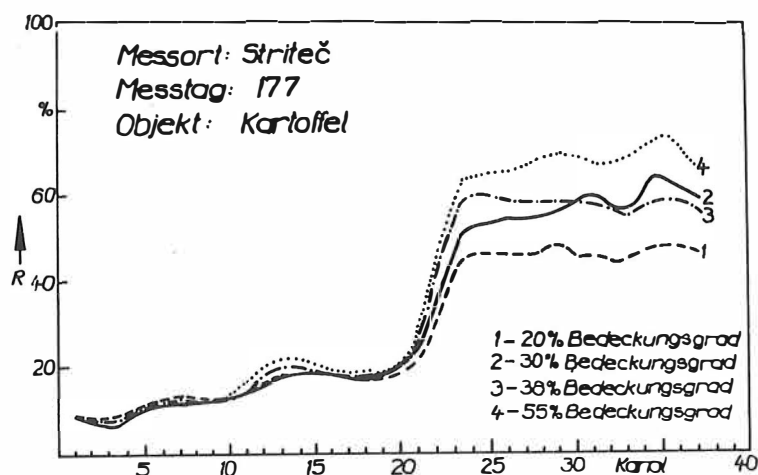


Abb 25: Remissionskurven verschiedener Kartoffeltestflächen im Testgebiet Stritec bei Brno

Dieses Merkmal änderte sich bei den 4 vorliegenden Stichproben von 20 % bis auf 55 %. Die gemessenen Remissionskoeffizienten ergaben sich also aus der Überlagerung von Strahlungsanteilen des Bodens und Strahlungsanteilen der Pflanze im jeweiligen Verhältnis. Die Pflanzen mit dem höchsten Bedeckungsgrad zeigen auch in den Remissionskurven die ausgeprägtesten Vegetationsmerkmale sowohl im sichtbaren Bereich (grüner Pik) als auch im IR-Plateau. Lediglich zwischen Kurve 2 und 3 tritt im Infrarotbereich eine Abweichung auf. Dabei kann es sich sowohl um Abweichungen auf Grund zusätzlicher auf die Objekte wirkender Faktoren oder Einflüsse als auch um Störungen im Meßkanal handeln.

Beim Vergleich der Messungen mit parallel durchgeführten Spektrometeruntersuchungen mit einem tschechischen Meßgerät, entwickelt und gebaut in einem Institut der Akademie der Wissenschaften der CSSR ergab sich zum Teil eine recht gute Übereinstimmung. Jedoch sind die Meßwerte des tschechischen Gerätes auf Grund der technischen Parameter und daraus folgend der meßmethodischen Versuchsdurchführung (geringe Meßhöhe, lange Zeit zwischen der Messung der einfallenden und remittierten Strahlung, manuelles Ablesen) mit einem höheren Fehler behaftet.

Im Testgebiet Schmergow erfolgten 1982 gemeinsam mit der Sektion Geographie der Pädagogischen Hochschule Potsdam Untersuchungen zu den stofflichen Ursachenkomplexen des Zustandes von Winterroggen. Dabei wurden die zu verschiedenen Zeitpunkten gewonnenen Spektralkurven, die damit unterschiedliche Entwicklungsphasen der Getreidepflanzen repräsentieren, mit den jeweils gemessenen fachspezifischen Merkmalen verglichen und qualitative Schlußfolgerungen gezogen. Wie bereits im Kapitel IV dargelegt, beschränkten sich die Messungen im Jahre 1982 im Testgebiet Schmergow auf

zwei Getreidestandorte (A und B) sowie einen Grünlandstandort (D). Diese Standorte sind insbesondere auf Grund ihrer unterschiedlichen Bodenbeschaffenheit zu unterscheiden. Während sich Standort A auf der Anhöhe auf lehmunterlagerter Sand-Rosterde befindet, liegen die Standorte B und D am Unterhang des Plattenrandes auf Sand-Rostgley mit Grundwassereinfluß ab 7 dm Flurabstand.

Detaillierte Ausführungen zu der Entwicklung der Pflanzen sowie den in diesem Zusammenhang gemessenen fachspezifischen Merkmalen findet man in /34/. Aus der gemeinsam mit der Pädagogischen Hochschule Potsdam publizierten Arbeit /4/ seien folgende Ergebnisse genannt:

Nach Aussaat und Bildung des Sprosses im Jahre 1981 erfolgte das Längenwachstum mit Beginn des Mai 1982. Die Blüte setzte Anfang Juni ein, Mitte Juli trat die Reife ein und Ende Juli erfolgte die Ernte. Im Mai stand den Pflanzen ausreichend Feuchtigkeit zur Verfügung. Dagegen traten von Juni an Trockenperioden auf, die bis in den Hochsommer hinein dauerten und kräftig ausgeprägt sowie langandauernd waren.

Beim Vergleich der Meßwerte an den Standorten A und B traten deutlich standortbedingte Unterschiede auf. Der lehmunterlagerte Sand am Standort A konnte im trockenen Sommer 1982 mehr Feuchtigkeit speichern, so daß der Zustand der Pflanzen hier insbesondere nach der Blüte als besser einzuschätzen war als der der Pflanzen im Standort B. Dort fiel wegen der Trockenheit die Versorgung durch das Grundwasser aus, so daß z. B. die Biomasse zur Erntezeit nur wesentlich geringere Werte erreichte. Auch die Werte für Blattflächenindex und Chlorophyllgehalt liegen zu diesem Zeitpunkt wesentlich unter denen des Standortes A.

Diese Besonderheiten in der Entwicklung der Pflanzen im Jahre 1982 drücken sich neben dem in allen Spektralkurven erkennbaren vegetationstypischen Kurvenverlauf deutlich in den gemessenen Spektralkurven Anfang Juni, Mitte Juli und Ende Juli aus. Die Abb. 26, 27 und 28 zeigen den mittleren Kurvenverlauf des gerichteten spektralen Remissionskoeffizienten für jeden untersuchten Standort.

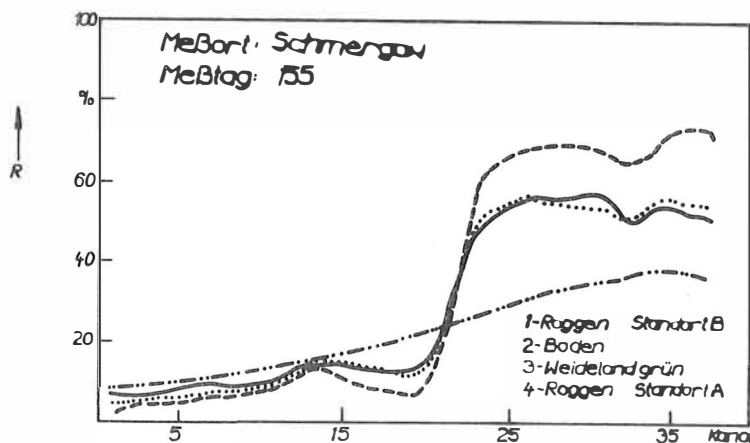


Abb. 26: Remissionskurve verschiedener Meßpunkte im Testgebiet Schmergow vom 4. 6. 1983



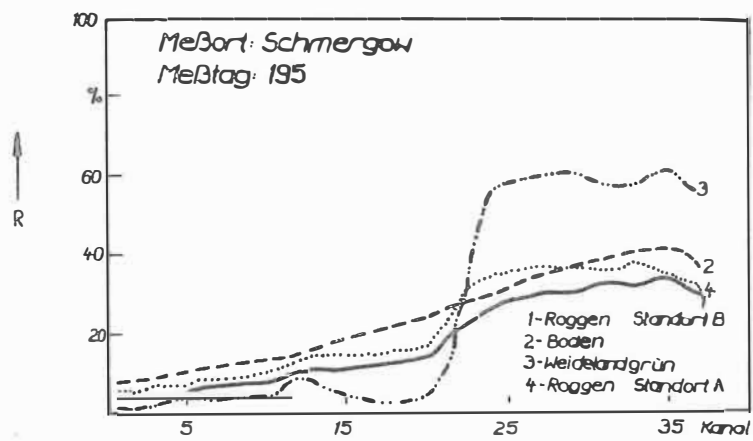


Abb. 27: Remissionskurven verschiedener Meßpunkte im Testgebiet Schmergow vom 14. 7. 1982

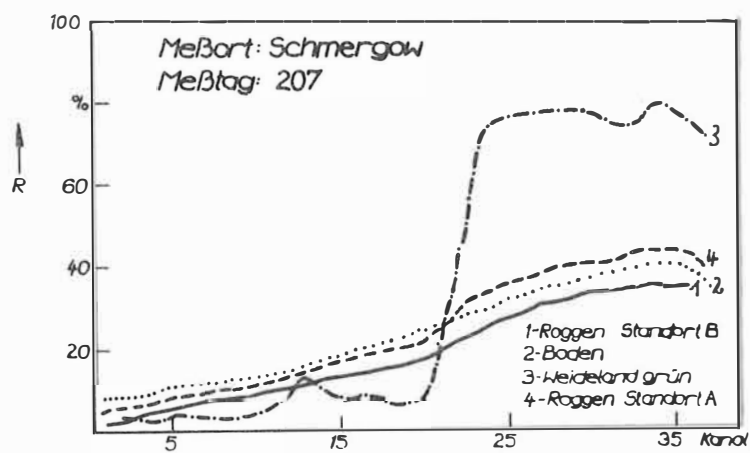


Abb. 28: Remissionskurven verschiedener Meßpunkte im Testgebiet Schmergow vom 26. 7. 1982

Die dargestellten Kurven zeigen Anfang Juni noch keinen erkennbaren Unterschied im Zustand der Pflanzen für die Standorte A und B. Die Entwicklung verlief bis zur Blüte etwa parallel. Die danach einsetzende trockene Witterung bewirkte die bereits beschriebene unterschiedliche Pflanzenentwicklung in beiden Standorten. Durch den Wassermangel war im Standort B zwischen Anfang Juli und Mitte Juli der Entwicklungsprozeß stark gebremst und der Reifeprozeß vollzog sich schneller. Im Kurvenverlauf des spektralen Remissionskoeffizienten spiegelt sich das dadurch wider, daß die Spektralkurve vom Standort B für diesen Zeitpunkt kaum noch typische Anzeichen des spektralen Verlaufes des Remissionskoeffizienten für Vegetation enthält. Sie ist in ihrer Form ähnlich der Remissionskurve vom trockenen Boden. Bei der Remissionskurve des Roggens am Standort A ist dagegen der typische grüne Pik bei  $0,55 \mu\text{m}$  noch erkennbar. Auch der Anstieg der Remission im nahen Infrarotbereich ist noch deutlicher ausgeprägt. Auf Grund des höheren Biomassenanteils erreicht der spektrale Remissionskoeffizient im nahen Infrarotbereich höhere Werte als bei der Spektralkurve vom Standort B.

Ende Juli, 3 Tage vor der Ernte, ist in beiden Standorten der typische Verlauf der spektralen Remissionskurve von Vegetation nicht mehr erkennbar. Lediglich beim Standort A zeichnet sich noch ein leichter Anstieg jenseits der Chlorophyllsorbptionsbande bei  $0,68 \mu\text{m}$  ab. Da am Standort A eine wesentlich höhere Biomasse vorhanden war, liegt die Remissionskurve über der des Roggens vom Standort B. Damit spiegelt sich der Jahresgang sowie spezielle Einflüsse bei der Entwicklung des Roggens in der Testfläche auch deutlich im spektralen Remissionsvermögen wider.

Aus den Kurvenverläufen für die Grünlandflächen ist ebenfalls der saisonale Rhythmus des Objektes (Knäuelgras) erkennbar. Deutlich ist zu sehen, daß in der zweiten Wachstumsphase, Mitte Juli, die Chlorophyllabsorptionsbande tiefer ausgeprägt ist als in der ersten Wachstumsperiode Anfang Juni. Durch Laboruntersuchungen wird bestätigt, daß der Chlorophyllgehalt in der zweiten Wachstumsphase höher ist, wodurch auch hier nachgewiesen ist, daß sich fachspezifische Merkmale im Verlauf der Remissionskurve widerspiegeln.

Zusammenfassend kann man einschätzen, daß bereits durch die ersten Testeinsätze 1982 der Nachweis gelang, daß sich sowohl der saisonale Rhythmus der Pflanzenentwicklung als auch die dabei auftretenden standortbedingten Unterschiede in den Meßwerten der Remissionsmerkmale widerspiegeln.

## 6.2. Ergebnisse der Meßperiode 1983

Wie bereits im Vorjahr, erfolgte auch im Jahre 1983 der größte Teil der Messungen im Testgebiet Schmergow. Dabei konnte die Anzahl der Messungen wesentlich gesteigert werden. Im einzelnen wurden folgende Messungen durchgeführt:

Datum	Roggen A	Roggen B	Roggen C	Grünland	Ackerboden	Eich-tafel
6. 5. 83	16	15	/	10	/	8
2. 6. 83	10	10	10	2	/	7
22. 6. 83	/	10	12	/	/	3
29. 6. 83	5	14 (+2)	13	4	6	6
11. 7. 83	14	15	15	6	1	5
1. 6. 83		50 (Tagesgang)				4

Damit wurde der Nachweis erbracht, daß mit der nunmehr gegebenen Ausrüstung die Gewinnung einer für statistische Auswertungen ausreichenden Menge von Meßwerten innerhalb einer Phänophase möglich ist.

Die Ergebnisse der Messungen bestätigten dabei die bereits gewonnenen Erkenntnisse aus dem Vorjahr. So zeigte sich wiederum deutlich die Änderung des spektralen Remissionsvermögens der Getreidepflanzen im Verlaufe ihrer Entwicklung (Abb. 29). Dabei ist auffallend, daß die charakteristischen Änderungen in der Spektralkurve während des Reifeprozesses nicht gleichzeitig erfolgen. Vielmehr verschwindet zunächst das Remissionsmaximum im Bereich von 560 nm bzw. das Minimum bei 680 nm zum Beginn der Reife, was mit einer rapiden Abnahme des Chlorophyllgehaltes in dieser Entwicklungsphase verbunden ist, während der charakteristische steile Anstieg zum IR-Remissionsplateau bei 720 nm, dessen Ursache in der Zellstruktur liegt, bis zum Ende des Reifeprozesses erhalten bleibt.

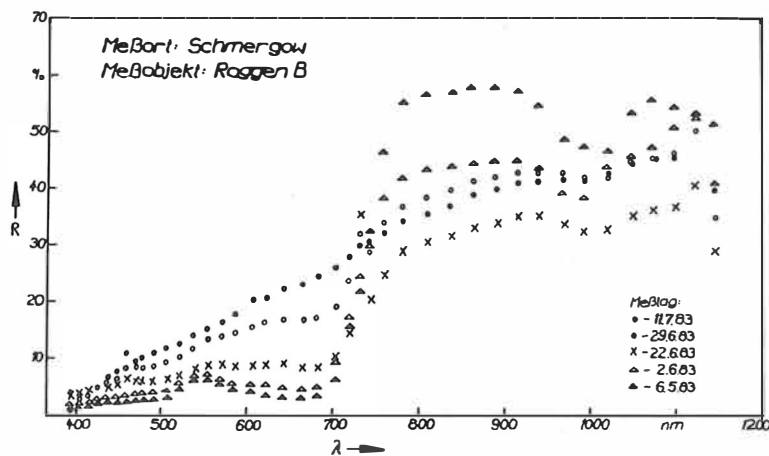


Abb. 29: Remissionskurven von Roggen im Jahre 1983  
im Testgebiet Schmergow (Meßpunkt B)

Dieses Verhalten wird auch durch die Laboruntersuchungen des Chlorophyllgehaltes bestätigt, wo von Anfang Juni bis zur Ernte eine kontinuierliche Abnahme des Chlorophyllgehaltes ablesbar ist. Hier könnte eine höhere zeitliche Auflösung der Chlorophyllmessung sowie eine Erhöhung der Probenanzahl noch detailliertere Aufschlüsse über den Verlauf der Chlorophyllabnahme während des Reifeprozesses erlauben.

Mit den gewonnenen Meßdaten wurden erste statistische Analysen durchgeführt. Dazu wurde zunächst zur Beschreibung des Objektes Roggen versucht, fernerkundungsspezifische Merkmalskomplexe zu bilden. Die Remissionswerte in den einzelnen Kanälen wurden dabei als Einzelmerkmale betrachtet. Die Untersuchungen wurden mit 30 Kanälen durchgeführt. Dabei wurden die Kanäle so ausgewählt, daß die als informationstragend eingeschätzten Bereiche um das Remissionsmaximum bei 560 nm, das Minimum bei 680 nm und das Infrarot-Plateau bei 800-1000 nm mit erfaßt wurden. Die Wellenlängen an den

Filterkanten wurden dagegen ausgelassen. Testuntersuchungen zeigten, daß dadurch kein Informationsverlust auftritt. Die Ergebnisse der Analysen sind in Tabelle 8 dargestellt. Es zeigt sich, daß für dieses Objekt die spektralen Merkmale im Bereich von 400-1100 nm auf zwei Merkmalskomplexe zurückzuführen sind, von denen der erste den Bereich von etwa 415-720 nm in hohem Maße und von 780-910 nm in geringerem Maße bestimmt, während der zweite im Bereich von 780 nm bis 1100 nm hoch geladen ist. Ein dritter Faktor hat keine signifikanten Ladungen mehr. Damit ist es also möglich, die im Jahre 1983 am Objekt Roggen im Testgebiet Schmergow gemessenen Remissionskurven mit Hilfe von zwei fernerkundungsspezifischen Merkmalskomplexen zu beschreiben. Noch deutlicher wird das Ergebnis nach einer Orthogonalrotation der Koordinatenachsen (Tab. 9). Hinweise zur Interpretation und Bearbeitung von Ergebnissen der Faktorenanalyse findet man in /70/.

Tabelle 8: Ergebnisse der Faktorenanalyse

Kanal	Wellenlänge nm	Faktorenladungen			Restvarianz
		1	2	3	
3	415	-0.93	-0.04	-0.33	0.01
4	425	-0.97	0.01	-0.20	0.01
5	437	-0.99	0.07	-0.14	0.00
6	450	-0.99	0.09	-0.07	0.00
16	508	-0.98	0.16	0.13	0.00
17	522	-0.96	0.20	0.16	0.02
18	539	-0.94	0.26	0.19	0.01
19	554	-0.94	0.26	0.19	0.01
20	571	-0.96	0.21	0.18	0.01
21	590	-0.95	0.18	0.25	0.01
22	609	-0.93	0.16	0.27	0.04
23	627	-0.83	0.08	0.23	0.24
24	645	-0.95	0.13	0.27	0.01
25	666	-0.94	0.12	0.29	0.02
26	686	-0.93	0.11	0.31	0.03
27	703	-0.91	0.15	0.35	0.04
28	723	-0.81	0.37	0.38	0.06
35	782	0.62	0.79	-0.04	0.02
36	812	0.58	0.81	-0.06	0.01
37	839	0.53	0.84	-0.06	0.01
38	863	0.49	0.87	-0.05	0.00
39	892	0.49	0.87	-0.04	0.01
40	917	0.43	0.89	-0.05	0.01
41	940	0.25	0.84	-0.04	0.24
42	970	-0.01	0.98	0.06	0.03
43	996	-0.02	0.97	0.14	0.03
44	1020	0.05	0.92	0.21	0.10
45	1050	0.17	0.96	0.03	0.06
46	1070	0.21	0.95	-0.04	0.06
47	1100	0.20	0.90	-0.05	0.16

Tabelle 9: Ergebnisse der Faktorenanalyse nach Orthogonalrotation der Faktorenmatrix

Kanal	Wellenlänge nm	Faktorenloadungen		
		1	2	3
3	415	0.91	-0.29	-0.26
4	425	0.95	-0.23	-0.18
5	437	0.98	-0.17	-0.09
6	450	0.99	-0.14	-0.04
16	508	0.98	-0.08	0.16
17	522	0.97	-0.03	0.18
18	539	0.98	0.03	0.17
19	554	0.98	0.04	0.17
20	571	0.98	-0.01	0.18
21	590	0.97	-0.05	0.22
22	609	0.97	-0.07	0.23
23	627	0.96	-0.09	0.25
24	645	0.96	-0.10	0.26
25	666	0.95	-0.10	0.27
26	686	0.94	-0.10	0.30
27	703	0.92	-0.06	0.35
28	723	0.88	0.17	0.36
35	782	-0.39	0.91	-0.08
36	812	-0.36	0.92	-0.11
37	839	-0.31	0.94	-0.11
38	863	-0.26	0.96	-0.10
39	892	-0.26	0.96	-0.10
40	917	-0.20	0.97	-0.10
41	940	-0.07	0.98	-0.07
42	970	0.25	0.96	0.02
43	996	0.26	0.94	0.08
44	1020	0.18	0.91	0.14
45	1050	0.05	0.98	0.05
46	1070	0.01	0.98	-0.01
47	1100	-0.01	0.94	0.01

Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde versucht, die phänologische Entwicklung des Beispielobjektes durch zwei Remissionsmerkmale in den entsprechenden Wellenlängenbereichen zu beschreiben. Dazu wurden zwei spektrale Merkmalskomplexe durch additive Überlagerung der einzelnen Kanalanteile entsprechend den berechneten Faktorenloadungen gebildet und in einem Diagramm hinsichtlich ihrer dynamischen Entwicklung im Laufe der Vegetationsperiode dargestellt (Abb. 30, 31)

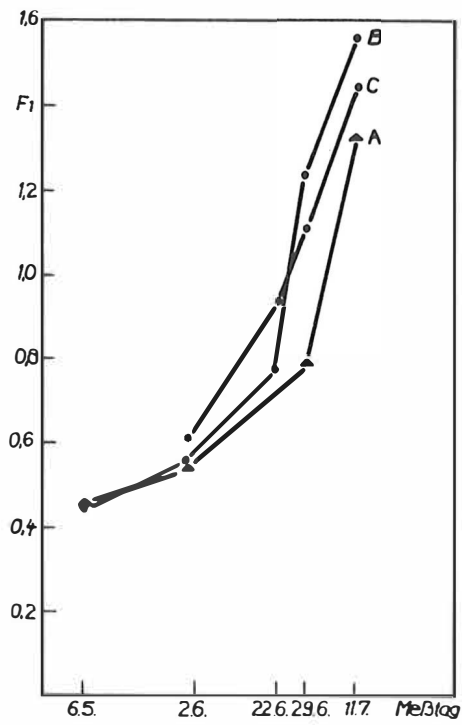


Abb. 30:

Zeitliche Entwicklung des 1. fernerkundungsspezifischen Merkmalskomplexes  $F_1$  im Verlaufe der Vegetationsperiode 1983

A: Meßpunkt A

B: Meßpunkt B

C: Meßpunkt C

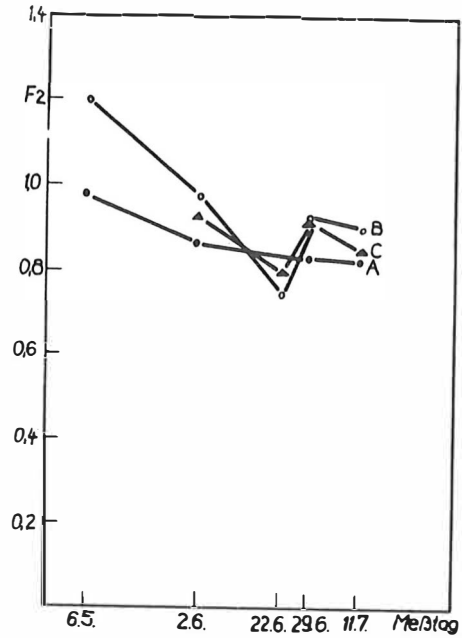


Abb. 31:

Zeitliche Entwicklung des 2. fernerkundungsspezifischen Merkmalskomplexes  $F_2$  im Verlaufe der Vegetationsperiode 1983

A: Meßpunkt A

B: Meßpunkt B

c: Meßpunkt C

Zusätzlich wurde die zeitliche Dynamik von Kombinationen ausgewählter Spektralkanäle (Kanal 14 (19): grüner Pik bei 554 nm, Kanal 20 (25): Chlorophyllabsorptionsbande bei 666 nm, Kanal 30 (38): Ausbildung des IR-Plateaus bei 863 nm dargestellt (Abb. 32, 33). Sowohl diese Kombinationen als auch der aus den Ladungen des ersten Faktors gebildete Merkmalskomplex zeigen ähnliche Ergebnisse. Deutlich sichtbar sind die auch durch Labormessungen bestätigten Unterschiede im zeitlichen Ablauf des Reifeprozesses an den einzelnen Meßpunkten /50/.

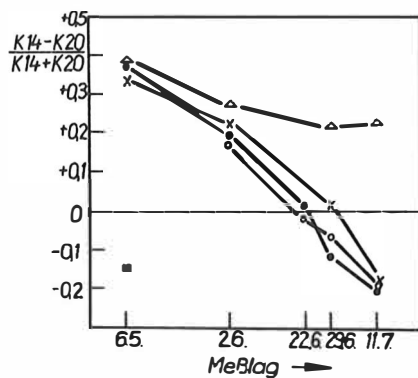


Abb. 32:  
Zeitliche Entwicklung der Kombination von Kanal 19 (K 14) und Kanal 25 (K 20) im Verlaufe der Vegetationsperiode 1983

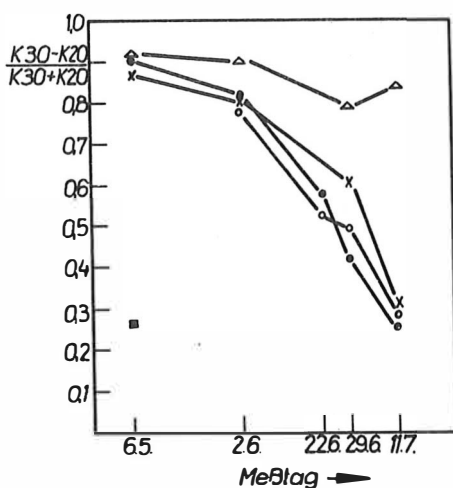


Abb. 33:  
Zeitliche Entwicklung der Kombination von Kanal 38 (K 30) und Kanal 25 (K 20) im Verlaufe der Vegetationsperiode 1983

- RA X - Roggen, Standort A
- RB • - Roggen, Standort B
- RC ◦ - Roggen, Standort C
- GL Δ - Grünland, Standort D
- BO ■ - Ackerboden (Feldweg)

Konstruiert man für die zeitliche Entwicklung der Pflanzen in den Diagrammen eine charakteristische "Lebensbahn" (Abb. 34), so werden entsprechende Punkte von den Objekten des Meßpunktes A später erreicht als beispielsweise von Objekten des Meßpunktes B.

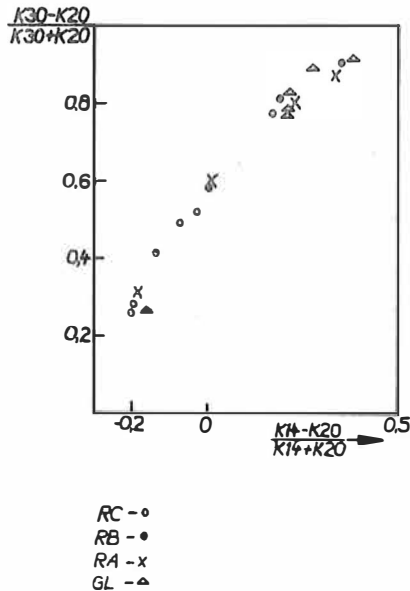


Abb. 34:  
Verhältnis der Kanalkombinationen  
zueinander

RA: Roggen, Meßpunkt A  
 RB: Roggen, Meßpunkt B  
 RC: Roggen, Meßpunkt C  
 GL: Grünland, Meßpunkt D

Remissionsmessungen im Labor sowie die Laborwerte der Chlorophyllanalysen, die von der Pädagogischen Hochschule Potsdam durchgeführt wurden, bestätigen, daß das Getreide im Gebiet um den Meßpunkt B schneller reifte als im Gebiet um den Meßpunkt A. Die zeitliche Entwicklung des in Abb. 31 dargestellten Faktors 2 ist dahingehend zu interpretieren, daß offensichtlich im Zeitraum um den 22. 6. 1983 ein fachspezifischer Einflußfaktor wirkte, der mit dem bisherigen Versuchsplan nicht erfaßt wurde.

Neben den schon im Kapitel III dargestellten Varianzuntersuchungen im Rahmen einer Tagesgangmessung, bei der über einem Meßpunkt im Verlaufe eines Tages bei verschiedenen Beleuchtungssituationen insgesamt 50 Messungen durchgeführt wurden und eine Varianz von ca. 2 - 6 % festgestellt wurde, erfolgten an verschiedenen Meßtagen weitere Untersuchungen zur Trennung der Varianzeinflüsse. Dabei ging es zunächst um eine Abschätzung der Varianzbeiträge von Meßgerät, Meßpunkten und Gesamtobjekt (Abb. 35). Während der Variationskoeffizient bei mehreren aufeinanderfolgenden Messungen über dem gleichen Meßpunkt den erwartet niedrigen Wert von 1 - 2 % ähnlich den o. g. Ergebnissen der Tagesgangmessung ergab, lag der Variationskoeffizient der Messungen an mehreren Meßpunkten in einem als homogen eingeschätzten Gebiet von ca. 25 m x 25 m mit 8 - 10 % deutlich darüber. Kommen noch Meßpunkte mit liegendem Getreide hinzu, so steigt V auf 25 - 30 % an.



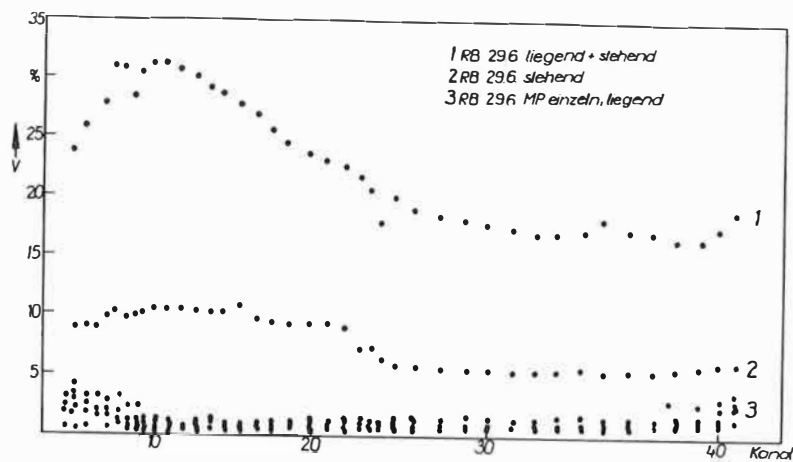


Abb. 35: Variationskoeffizient V von Einzelmessungen, Meßpunkten mit homogenem Objektzustand und Meßpunkten mit stehendem und liegendem Getreide. RB - Roggen, Standort P

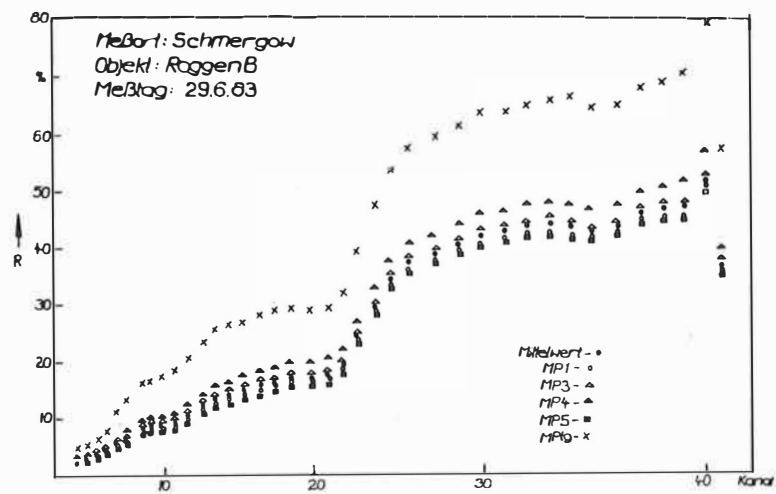


Abb. 36: Remissionskurven von Roggen vom 29. Juni 1983 im Testgebiet Schmergow (Meßpunkt B)  
MP - Meßpunkt, MP19 - Meßpunkt mit liegendem Getreide

Dies zeigt deutlich, daß bei Fernerkundungsdaten aus dem Kosmos mit einer Geländeauflösung von etwa  $50 \times 50 \text{ m}^2$ , bei denen keine zusätzlichen Informationen über die Homogenität der einzelnen Pixel vorhanden sind und nicht bekannt ist, ob z. B. liegendes Getreide auf dem jeweiligen Schlag und im konkreten Pixel vorkommt oder nicht, mit einer hohen Varianz zu rechnen ist, die die Arbeit automatischer Erkennungsalgorithmen sehr erschweren kann. Liegendes Getreide besitzt jedoch einen deutlich höheren Remissionskoeffizienten als das stehende Getreide (Abb. 36). Auf dieser Grundlage müßte mit einem speziellen Algorithmus zur Erkennung solcher Mischpixel deren Eliminierung vorgenommen werden, wodurch die anschließende Bearbeitung ermöglicht wird.

Im Testgebiet Dedelow erfolgten im Jahre 1983 zwei Meßeinsätze mit jeweils 80 - 100 Einzelmessungen. Aus technischer Gründen erfolgte die Messung beim ersten Meßeinsatz mit dem 8-Kanal-Radiometer, beim zweiten Meßeinsatz mit dem Feldspektrometer BSP-83. Bei einem dritten Meßeinsatz trat gleich zu Beginn eine technische Havarie am Meßausleger auf, so daß dieser Einsatz nicht ausgewertet werden konnte. Die Auswertung des Datenmaterials erfolgte unter dem Aspekt, inwieweit sich Unterschiede in der Bodenform mit Hilfe der Messungen der spektralen Eigenschaften der darauf befindlichen Vegetationsobjekte in diesem Testgebiet nachweisen lassen. Zur Differenzierung der Objekte innerhalb eines Meßeinsatzes wurden die Meßpunkte entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu den jeweiligen Bodenformen zusammengefaßt. Tab. 10 gibt einen Überblick über die Zugehörigkeit der Meßpunkte zu den jeweiligen Bodenformen sowie die wichtigsten Resultate der fachspezifischen Bodenmessungen zum 1. und 2. Meßeinsatz. Daraus ist deutlich erkennbar, daß sich auf der Grundlage der fachspezifischen Merkmale des Bodens die verschiedenen Bodenformen kaum voneinander unterscheiden. Lediglich Bodenform 6 mit dem Meßpunkt 5/8 weicht in einigen Parametern (Humusgehalt, C/N-Verhältnis) von den übrigen Meßpunkten ab. An Hand der fachspezifischen Merkmale der den jeweiligen Bodenformen zugehörigen Vegetationsobjekte läßt sich bereits eine deutlichere Gliederung der Meßpunkte vornehmen. Insbesondere lassen sich die Bodenformen 3 und 6 an Hand des Zustandes der Pflanzen deutlich von den übrigen Bodenformen unterscheiden. Diese Verhältnisse spiegeln sich auch in den Meßergebnissen der spektralen Objekteigenschaften wider. Tabelle 11 zeigt die Meßergebnisse des ersten Meßeinsatzes. Auf der Grundlage der spektralen Remissionswerte wurde eine willkürliche Einteilung der Meßpunkte in 4 Gruppen vorgenommen. Eine strenge Zuordnung zu den Bodenformen kann dabei nicht nachgewiesen werden, jedoch ist erkennbar, daß sich die Bodenformen 3 und 6 in den Gruppen 3 und 4 konzentrieren.

Tabelle 10: Übersicht über die fachspezifischen Bodenmessungen in Dedelow

Bodenform-Nr.	Meßpunkt	Charakter. Bodenform	Körnung	CaCO <sub>3</sub>	Gehalt an		(in %)		pH	C/N	Feuchte 14.4. %
					Kies	N	C	Humus			
1	1/6	m/l P	sL	-	4	0.082	0.67	1.16	6.8	8.2	14.8
	3/1	m/l B-(F)	sL	0.3	2	0.070	0.63	1.09	6.9	9.0	16.0
2	3/3	I P	IU	0.7	2	0.092	0.64	1.10	6.6	7.0	19.8
	6/5	p P	sL	0.2	3	0.096	0.80	1.38	6.8	8.3	14.1
3	1/3	p C	sL	6.1	3	0.077	0.57	0.98	6.8	7.4	14.6
	1/8	p C	sL	1.3	5	0.082	0.61	1.05	7.0	7.4	15.0
	3/5	I C	L	4.7	6	0.092	0.61	1.05	7.0	6.6	18.2
	6/4	p C	sL	3.0	4	0.127	0.94	1.62	7.0	7.4	15.6
4	2/2	p U-(X)	sL	-	2	0.102	0.81	1.40	6.7	7.9	17.0
	6/8	I U	L	0.2	7	0.137	1.10	1.90	6.6	8.0	15.9
5	5/5	s/l L	IS	0.3	4	0.072	0.53	0.92	6.2	7.4	14.2
	6/7	p L	L	0.3	2	0.162	1.37	2.36	6.5	8.5	21.4
6	5/8	s/l R	S	0.3	5	0.080	0.42	0.72	6.4	5.3	11.2
7	2/1	s/m B	IS	-	2	0.072	0.55	0.94	6.7	7.6	14.1
	5/7	m/l B	sL	1.0	8	0.082	0.70	1.20	6.2	8.5	14.8

Tabelle 10: (Fortsetzung)

Bodenform-Nr.	Meßpunkt	Höhe in cm		Chlorophyllgehalt in mg/g Frischmasse		Gesamtchlorophyll- je m <sup>2</sup> in g	Ernte- proben ( Trocken- masse) in g/m <sup>2</sup>	Bedeckungsgrad in %	
		28.4.	17.5.	22.4.	26.5.			28.4.	20.5.
1	1/6	16	42	1.76	2.96	9.5	511	82	98
	3/1	15	43	1.77	2.86	9.2	521	88	100
2	3/3	12	40	1.64	2.87	7.1	474	79	98
	6/5	14	39	1.99	2.38	4.5	294	38	87
3	1/3	11	31	1.36	2.45	2.4	180	22	69
	1/8	13	27	1.62	2.39	2.7	183	38	69
	3/5	10	27	1.66	2.35	2.9	211	28	60
	6/4	16	39	1.68	2.68	5.7	337	46	94
4	2/2	17	41	1.72	2.80	9.6	511	76	99
	6/8	15	39	1.77	2.76	5.4	330	53	96
5	5/5	20	47	1.23	2.60	7.6	389	93	100
	6/7	20	57	1.89	2.89	7.1	433	83	99
6	5/8	8	19	1.81	2.15	1.6	112	29	48
7	2/1	22	48	1.99	3.26	10.8	570	83	100
	5/7	12	36	1.06	2.63	5.2	361	58	97

**Tabelle 11:** Übersicht über die Ergebnisse der Radiometermessungen des 1. Meßeinsatzes in Dedelow

Gruppe	Bodenform	Meßpunkt	Remissionskoeffizient %							Feuchte %	Bedeckungsgrad %
			K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7		
1	5	6/7	3.4	6.0	5.2	46.5	52.5	38.3	27.1	21.4	83
	5	5/5	3.5	6.0	5.6	41.4	48.4	38.3	28.2	14.2	93
	7	2/1	3.6	6.9	6.2	49.9	57.8	46.1	34.0	14.1	83
	2	3/3	4.1	7.4	5.8	52.7	58.2	42.3	33.3	19.8	79
2	1	3/1	4.5	7.8	7.1	44.6	55.9	49.8	41.3	16.0	88
	4	2/2	4.9	8.6	8.3	44.8	50.8	40.6	33.3	17.0	76
3	1	1/6	5.4	8.6	9.0	49.1	62.5	57.6	50.6	14.8	82
	7	5/7	5.3	9.1	10.6	39.9	54.3	53.5	48.7	14.8	58
	4	6/8	5.4	9.5	11.4	34.4	47.6	48.1	49.4	15.9	53
	3	6/4	5.5	9.8	10.8	37.9	47.7	42.7	41.7	15.6	46
	2	6/5	5.7	9.6	12.6	39.0	56.8	55.2	49.4	14.1	38
	6	5/8	5.8	9.6	12.3	35.6	48.2	54.1	63.0	11.2	29
4	3	1/8	7.7	13.2	17.4	37.4	53.6	60.9	72.7	15.0	38
	3	3/5	9.0	11.1	13.9	38.8	52.6	56.7	63.5	18.2	28
	3	1/3	9.1	14.7	19.4	35.2	52.2	64.1	77.7	14.6	22

In der Tabelle 11 sind zum Vergleich die Bodenfeuchte und der Bedeckungsgrad mit aufgeführt. Es zeigte sich, daß trotz des teilweise geringen Bedeckungsgrades keine Korrelation zwischen der Bodenfeuchte und den Remissionsdaten besteht ( $r = 0.1 \dots 0.5$ ). (Tab. 12). Dies kann allerdings auch daran liegen, daß die Bestimmung der Bodenfeuchte bereits 7 Tage vor den Remissionsmessungen erfolgte und nachträgliche Veränderungen nicht auszuschließen sind. Dagegen besteht eine gute Korrelation ( $r = 0,7 \dots 0,9$ ) zwischen den Remissionsmerkmalen mit Ausnahme von Kanal 5 und dem Bedeckungsgrad der Vegetation. Die Meßwerte im Kanal 5 sind zufällig verteilt, es ergab sich zu keinem der berücksichtigten fachspezifischen Merkmale eine Beziehung.

Mit den Meßergebnissen des zweiten Meßeinsatzes ist ebenfalls eine Trennung der Bodenformen 6 und 3 möglich (Abb. 37).

**Tabelle 12:** Korrelationsmatrix der Merkmale aus Tabelle 11

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	Bodenfeuchte	Bedeckungsgrad
K 1	1.0	0.9	0.9	-0.6	-0.1	0.8	0.9	-0.2	-0.8
K 2	0.9	1.0	1.0	-0.7	-0.1	0.8	0.9	-0.3	-0.8
K 3	0.9	1.0	1.0	-0.7	-0.2	0.8	1.0	-0.4	-0.9
K 4	-0.6	-0.7	-0.7	1.0	0.7	-0.5	-0.7	0.5	0.8
K 5	-0.1	-0.1	-0.2	0.7	1.0	0.3	-0.1	0.1	0.3
K 6	0.8	0.8	0.8	-0.5	0.3	1.0	0.9	-0.4	-0.7
K 7	0.9	0.9	1.0	-0.7	-0.1	0.9	1.0	-0.4	-0.9
Bodenfeuchte	-0.2	-0.3	-0.4	0.5	0.1	-0.4	-0.4	1.0	0.3
Bedeckungsgrad	-0.8	-0.8	-0.9	0.8	0.3	-0.7	-0.9	0.3	1.0

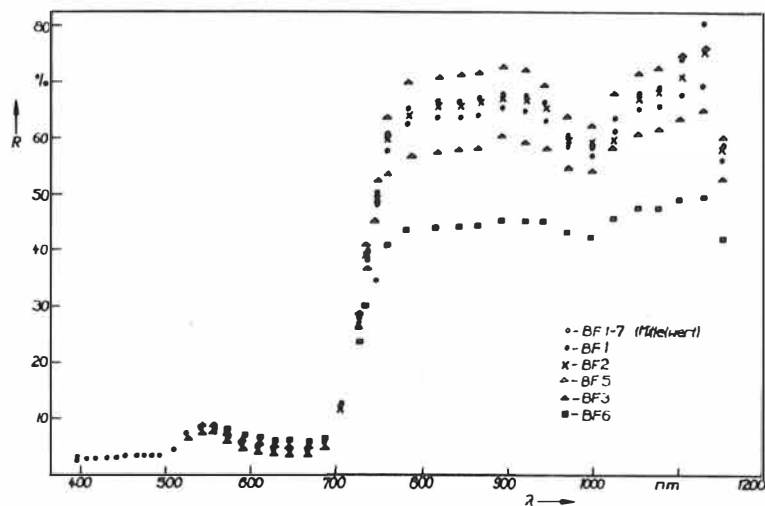


Abb. 37: Remissionskurven von Klee im Testgebiet Dedelow (II. Meßeinsatz 1983), BF - Bodenform

Die Bodenform 6 zeigt deutliche Abweichungen der Remissionswerte, bei Bodenform 3 läßt sich diese Abweichung noch erkennen. Alle anderen Kurven sind nahezu identisch. Eine Untersuchung des Datenmaterials mit Hilfe der Varianzanalyse bestätigt dies. Wie Tabelle 13 zeigt, läßt sich bei Einbeziehung aller 7 Bodenformen statistisch gesichert fast im gesamten Spektralbereich feststellen, daß sie nicht der gleichen Grundgesamtheit entstammen. Wird die Varianzanalyse ohne Bodenform 6 durchgeführt, so lassen sich in vielen Spektralkanälen zwar geringere, aber statistisch noch abgesicherte Unterschiede feststellen. Ohne Bodenform 6 und 3 sind keine statistisch gesicherten Unterschiede mehr nachweisbar. Damit erscheint es möglich, die aus den Messungen der fachspezifischen Merkmale erkennbaren Differenzierungen der Bodenform auch mit spektralen Daten vornehmen zu können, wenn sich diese Unterschiede in der den Boden bedeckenden Vegetation und ihren Merkmalen, z. B. dem Bedeckungsgrad, niederschlagen.

Tabelle 13: Ergebnisse der Varianzanalyse Dedelow, 26. Mai 1983

Kanal	Wellen- länge nm	gesamt	Testgröße F ohne BF 6	ohne BF 3, BF 6
3	415	1.19	1.32	1.34
4	425	1.74	1.98	1.68
5	437	4.94	4.72	3.40
6	450	4.26	3.56	1.20
16	508	7.41	5.20	1.94
17	522	5.32	4.20	1.49
18	539	4.87	4.42	2.00
19	554	5.47	4.47	1.62
20	571	8.84	5.91	1.80
21	590	10.27	6.43	2.20
22	609	10.15	6.11	2.27
23	627	10.54	6.10	2.47
24	645	10.14	5.94	2.19
25	666	9.07	5.39	1.64
26	686	7.44	4.28	1.09
27	703	2.64	2.78	2.04
28	723	8.14	3.44	3.93
35	782	13.62	7.39	2.81
36	812	13.68	7.27	2.69
37	839	13.76	7.51	2.94
38	863	13.93	7.65	2.96
39	892	12.60	5.85	2.80
40	917	13.07	5.97	2.93
41	940	11.89	5.84	3.08
42	970	11.53	5.21	3.54
43	996	11.09	4.75	3.23
44	1020	5.03	2,24	1.46
45	1050	11.67	5.46	2.88
46	1070	10.98	4.82	3.07
47	1100	10.10	4.75	3.61
Freiheitsgrade		6; 68	5; 63	4; 49
Signifikanzschränke		3.73	4.43	5.71

### 6.3. Ergebnisse der Radiometermessungen

Mit dem 8-Kanal-Radiometer werden Strahlungsäquivalente der gerichtet remittierten Objektstrahlung parallel gemessen (vgl. Kap. III). Die zusätzliche Bestimmung des spektralen gerichteten Remissionskoeffizienten erfordert bei diesem Meßprinzip jeweils eine weitere Messung über einem Eichetalon. Das setzt jedoch eine stabile Beleuchtungssituation voraus, da das Gerät für eine quasisynchrone Messung der einfallenden und der remittierten Strahlung nicht ausgelegt ist. So wiesen z. B. die auf diese Weise unter realen Bedingungen gemessenen Remissionskoeffizienten vom 21. 4. (Testgebiet Dedelow) bei mehreren unmittelbar nacheinander durchgeführten Wiederholungsmessungen am gleichen Objekt einen Variationskoeffizienten von durchschnittlich 9,1 % auf, der Variationskoeffizient der Messungen zwischen den einzelnen Meßpunkten einer Bodenform stieg dadurch auf 14,6 %.

Im Verlaufe des Jahres 1983 wurde die Methodik für die Messungen mit dem Ziel der Ableitung von Remissionskoeffizienten mehrmals verbessert. Damit sind mit dem Radiometer sowohl Messungen der der remittierten Objektstrahlung proportionalen Strahlungsäquivalente als auch die Bestimmung der spektralen gerichteten Remissionskoeffizienten möglich. Entsprechend diesen beiden Meßprinzipien erfolgt auch die Auswertung der Daten unter zwei verschiedenen Gesichtspunkten. Für die Auswertung der Messungen von Strahlungsäquivalenten wurde die Bildung des Quotienten jeweils benachbarter Kanäle vorgenommen. Dabei wird vorausgesetzt, daß sich eine Änderung der Meßbedingungen in jeweils dicht benachbarten Spektralkanälen gleichartig auswirkt. Abb. 38 zeigt einen Ausschnitt aus einer Tagesgangmessung des Remissionsstandards. Dabei wurden die Quotienten der benachbarten Kanäle gebildet und jeweils auf den ersten Meßwert jeder Kanalkombination normiert, es zeigen sich also die relativen Abweichungen im zeitlichen Verlaufe der Messung bei Änderung der Einstrahlungsbedingungen.

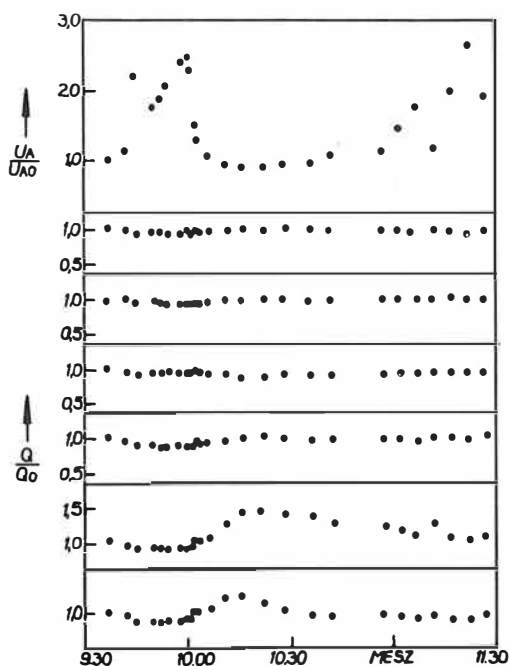


Abb. 38:

Ausschnitt aus einer Tagesgangmessung des Remissionsstandards

$U_A$ : Äquivalent der Globalstrahlung

$Q$ : Quotient benachbarter Kanäle

A: Kanal 1/Kanal 2

B: Kanal 2/Kanal 3

C: Kanal 3/Kanal 4

D: Kanal 4/Kanal 5

E: Kanal 5/Kanal 6

F: Kanal 6/Kanal 7

Zum Vergleich wurde die ebenfalls normierte Summe aller Kanäle als Ausdruck für die globale Einstrahlung in dem Diagramm mit dargestellt. Es zeigt sich, daß sich ein solches Normierungsverfahren nur für die Kanäle im sichtbaren bis nahen Infrarotbereich eignet, im mittleren Infrarotbereich treten zusätzliche Effekte auf (Temperaturstrahlung, Wärmeabsorption in der Atmosphäre), die Abweichungen von bis zu 30 % ohne streng damit korrelierte Gesamthelligkeitsänderungen bewirken können.

Ähnliche Ergebnisse lieferte ein weiteres Experiment zur Normierung von Spektraldaten (Abb. 39). Hierbei ging es um die Ausschaltung des Blickwinkeleinflusses auf die Remissionsmessungen. Als Testobjekt wurde Grünland vermessen. Es zeigte sich wiederum eine Verbesserung, die größten Abweichungen traten jedoch auch hier in den Kanälen des mittleren IR-Bereiches auf.

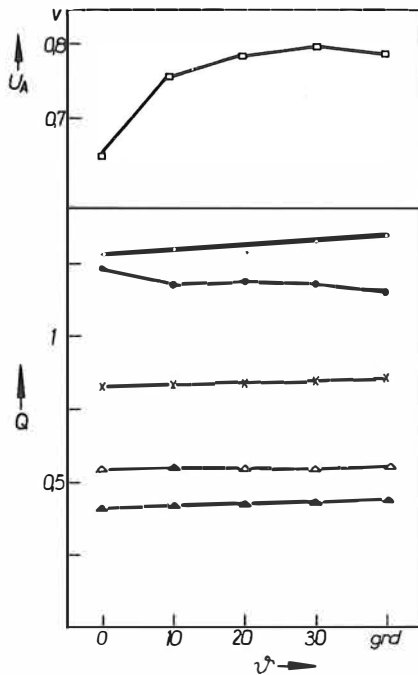
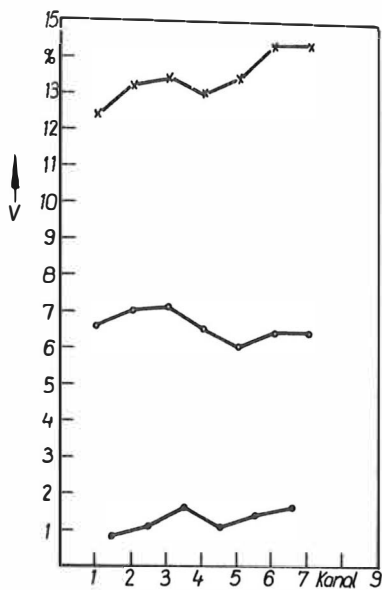


Abb. 39:  
Einfluß des Blickwinkels  
auf den Remissionswert  
 $U_A$ : Meßspannung  
(Strahlungsäquivalent)  
 $Q$ : Quotienten jeweils be-  
nachbarter Kanäle  
X Kanal 1/Kanal 2  
△ Kanal 2/Kanal 3  
▲ Kanal 3/Kanal 4  
○ Kanal 5/Kanal 6  
● Kanal 6/Kanal 7

Zum Vergleich der beiden Meßprinzipien erfolgte an Messungen von Grünland und Ackerboden auch die Bildung des spektralen gerichteten Remissionskoeffizienten. Die Schwierigkeit dabei besteht darin, daß die zur Normierung benötigte Messung der einfallenden Strahlung einige Sekunden vor bzw. nach der Objektmessung erfolgen muß. Dies erfordert entsprechend konstante meteorologische Bedingungen. Während der Durchführung der hier als Beispiel untersuchten Messungen waren die meteorologischen Bedingungen gut, es trat insgesamt während der Messungen eine Varianz der Einstrahlung von ca. 15 % auf, was sich in der Varianz der Rohdaten widerspiegelt. Die Normierung durch Quotientenbildung zeigt sich hierbei jedoch auf Grund der besprochenen Zeitversetzung der Messung der Einfallstrahlung und der remittierten Strahlung der Berechnung des Remissionskoeffizienten überlegen, wie die Abb. 40 zeigt.





x  $V(U_A)$   
o  $V(R)$   
•  $V(Q)$

Abb. 40:

Normierung der Meßwerte durch Bildung des Remissionskoeffizienten und des Quotienten benachbarter Kanäle

$V(U_A)$ : Variationskoeffizient der Meßspannung (Strahlungsäquivalent)

$V(R)$ : Variationskoeffizient der Remissionskoeffizienten

$V(Q)$ : Variationskoeffizient der Quotienten

Bei Untersuchungen an verschiedenen Objekten wurde die Eignung der durch Quotientenbildung normierten Messungen für die Erkennung des Objektzustandes geprüft. Dabei muß man davon ausgehen, daß durch dieses Normierungsverfahren die absoluten Werte der remittierten Stahldichte, also auch die Helligkeitsunterschiede der Meßobjekte, eliminiert werden. In den Koeffizienten der Kanalquotienten spiegeln sich dann die Unterschiede in der Form der Spektralkurve der Meßobjekte wider. Deshalb sind die Quotienten insbesondere zur Erkennung von Zustandsänderungen geeignet, die sich auf die Form der Spektralkurve auswirken, dagegen können Zustandsänderungen, die sich auf die Helligkeit auswirken und eine Verschiebung der Spektralkurve bewirken, ohne deren Form zu ändern, so nicht erkannt werden. Dies wird an den Messungen in Abb. 41 deutlich.

Die Änderung der Feuchte von Ackerboden wirkt sich nicht in einer Änderung des prinzipiellen Verlaufes der Spektralkurve des Bodens aus, trockener Boden besitzt generell höhere Remissionswerte in allen Kanälen, feuchter Boden ist dagegen dunkler. Man könnte aus den Ergebnissen schließen, daß die dargestellte Kurve charakteristisch für Ackerboden und gegen Bodenfeuchteänderungen invariant ist. Dagegen wirkt sich Wassermangel auf Vegetation so aus, daß das grüne Remissionsmaximum verschwindet und die Spektralkurve ihren charakteristischen Verlauf verliert. Dementsprechend wirkt sich dieser Wassermangel, wenn er zu der entsprechenden Zustandsänderung bei den Pflanzen führt, stark auf die Quotienten der Spektralkanäle aus. Auffallend ist dabei, daß die Quotienten von trockenen, gelben Weideland denen von Ackerboden stark ähneln.

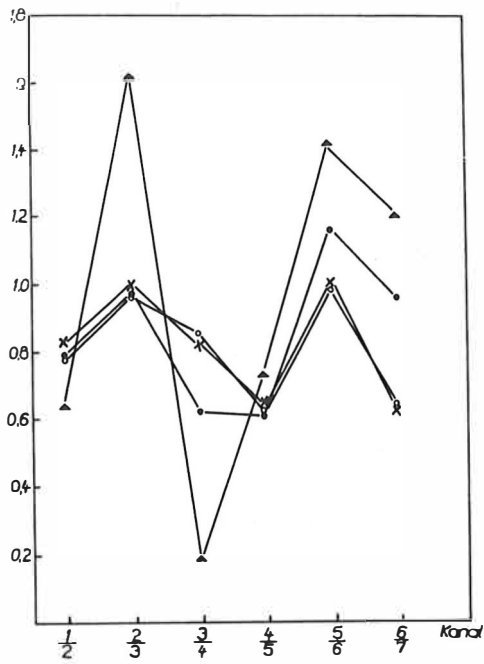


Abb. 41:  
Quotientenkurve von  
Grünland und Acker-  
boden mit je zwei  
Zuständen

Ebenfalls starke Ähnlichkeiten zeigen die Kurven der Quotienten verschiedener Futterpflanzenarten (Abb. 42).

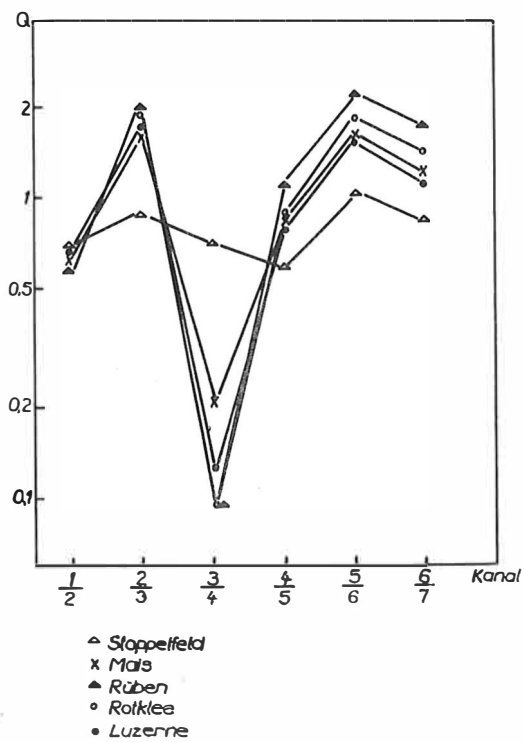


Abb. 42:  
Quotientenkurven  
verschiedener Futter-  
pflanzenarten

In Analogie zu der charakteristischen Kurve des spektralen gerichteten Remissionskoeffizienten für Vegetationen könnte man auch bei der Kurve der Quotienten von einem charakteristischen Verlauf für Vegetationsobjekte sprechen. Dabei muß man jedoch mögliche Schwankungen der spektralen Verhältnisse der Einstrahlung berücksichtigen, die, wie bereits gezeigt wurde, insbesondere in den Kanälen über 1  $\mu\text{m}$  zu Schwankungen führen und Abweichungen von  $\pm 30\%$  hervorrufen können. Die gezeigten Beispiele wurden bei entsprechend guten Wetterbedingungen gewonnen.

In der Meßperiode 1982 konnte das Radiometer aus technischen Gründen erst ab Ende Juni (Fertigstellung des Meßauslegers) parallel zu dem Feldspektrometer eingesetzt werden.

Insgesamt kam das Radiometer in Schmergow bei drei Testeinsätzen mit dem neuen Ausleger zum Einsatz. Darüber hinaus wurden Messungen im Testgebiet Dedelow sowie zu den Meßeinsätzen für geologische Zwecke durchgeführt. Die meteorologischen Bedingungen während dieser Meßeinsätze waren unterschiedlich.

Aus den Erfahrungen dieser Testeinsätze kann gesagt werden, daß die Ergebnisse bezüglich der Reproduzierbarkeit der Meßwerte bei bewölktem Himmel noch nicht in vollem Umfang den Erwartungen entsprechen. Die Streuung der Remissionskoeffizienten ist etwa um den Faktor 3 - 5 höher als bei dem parallel eingesetzten Feldspektrometer BSF-83. Zusätzlich wirkt sich erschwerend auf die Messungen aus, daß das Radiometer einen relativ geringen Dynamikbereich aufweist und so größere Helligkeitsschwankungen der einfallenden Strahlung nur ungenügend verkraftet. Die dafür vorgesehene Umschaltung der Verstärkung ist am Meßkopf installiert und würde es erforderlich machen, den Ausleger bei jeder Umschaltung abzusenken.

Zur Ausschaltung dieser Nachteile wurden aus den Erfahrungen der Testeinsätze 1983 technische und methodische Lösungen erarbeitet, die im Winterhalbjahr 1983/84 realisiert und im Frühjahr 1984 erprobt werden sollen. Dadurch soll das Problem der Gewinnung stabiler und reproduzierbarer Meßwerte mit dem Multiband-Radiometer endgültig gelöst werden.

## 7. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden experimentell-technische und methodische Grundlagen für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen spektralen und fachspezifischen Merkmalen ausgewählter Bodenobjekte geschaffen. Diese Untersuchungen dienen der Erweiterung der Grundlagenkenntnisse über die Beziehungen und Wechselwirkungen der Zustandsmerkmale der Objekte und entsprechender fernerkundungsspezifischer Merkmale sowie der Vertiefung des physikalischen Verständnisses bei der Auswertung und Interpretation von Daten der Fernerkundung. Dadurch wird sowohl der physikalische Aspekt bei der visuellen Interpretation durch die Aufstellung entsprechender qualitativer Regeln unterstützt als auch zu einer Verbesserung der Arbeit automatischer Erkennungsalgorithmen durch die physikalisch fundierte Definition von Musterklassen und Merkmalsstufen beigetragen.

In diesem Zusammenhang wird im Kapitel II vorgeschlagen, bei der Untersuchung der Abbildungsbeziehungen zwischen fachspezifischen und fernerkundungsspezifischen Merkmalen generalisierte Merkmalskomplexe zu bilden, die die Forderungen nach Stabilität und Eindeutigkeit der Abbildung besser erfüllen. In der Praxis werden mit einem automatischen Erkennungsalgorithmus nach diesem Prinzip nur bestimmte, genau umrissene Aufgabenstellungen lösbar sein, insbesondere solche, bei denen bestimmte Zustandsstufen der Objekte unterschieden werden sollen. Dazu sind entsprechende Voraussetzungen, wie z. B. die Ausgrenzung der Objektarten, zu erfüllen. Für die Aufstellung entsprechender statistischer Modelle sind umfangreiche Grundlagenforschungen zu den physikalischen Eigenschaften der Objekte mit aufwendigen Feldexperimenten nötig, da die Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen den Objektmerkmalen eine statistische Herangehensweise mit entsprechend umfangreichem Datenmaterial erfordern.

Diese Feldexperimente verlangen spezielle, für die Erfassung der fernerkundungsspezifischen Merkmale am Boden geeignete Meßgeräte, die in der DDR und im SW in dieser Form bei Beginn der Arbeiten nicht verfügbar waren und daher zu einem Schwerpunkt der Arbeit wurden. Die Möglichkeiten der Gewinnung qualitativ und quantitativ ausreichender fernerkundungsspezifischer Daten mit Hilfe des für diese Zwecke entwickelten Feldspektrometers BSP 83 wurde im Rahmen der Arbeit nachgewiesen. Ausgehend von den wissenschaftlich begründeten Anforderungen an die Gewinnung von Spektraldaten am Boden wurde damit ein Gerät geschaffen, das die Anforderungen bezüglich Genauigkeit, Empfindlichkeit, Stabilität und Geschwindigkeit der Messung erfüllt. Insbesondere durch die automatische Korrektur der Offset- und Driftgrößen der Signalverstärker, das völlig neu konzipierte Steuergerät und die mechanischen Änderungen an der Spiegel- und Filterradbewegung wurden die im Kapitel III dargestellten Eigenschaften erreicht. Zur Bestimmung und ständigen Überwachung der Eigenschaften der eingesetzten Feldspektrometer wurden entsprechende Meßmittel und -anordnungen aufgebaut.

Neben diesen Arbeiten zur Schaffung der meßtechnischen Voraussetzungen wurden methodische Fragen der Organisation und Durchführung der Feldexperimente sowie die effektive Übernahme, Speicherung und Verarbeitung der Daten untersucht und gelöst. Die Verarbeitung und Analyse der dabei anfallenden Datenmengen setzt den Einsatz elektronischer Datenverarbeitungsanlagen voraus.

Bei den im Rahmen der Arbeit durchgeführten Testeinsätzen und Meßfahrten erfolgten insgesamt über 1000 Einzelmessungen. Neben der Auswertung hinsichtlich technischer und methodischer Fragestellungen, die zu den schon genannten Ergebnissen (Kapitel III und IV) führten, wurden die Meßergebnisse insbesondere auf ihre Aussagefähigkeit hinsichtlich fachlicher Probleme geprüft. Dabei konnten in Übereinstimmung mit den fachspezifischen Merkmalen entsprechende charakteristische Änderungen der Remissionskurven von Vegetationsobjekten im Verlaufe ihrer Entwicklung nachgewiesen werden. Gleichfalls waren standortbedingte Entwicklungsunterschiede aus den am Boden gemessenen Re-

missionswerten ableitbar. An einzelnen Beispielen konnte die Unterscheidbarkeit verschiedener Objektzustände gezeigt werden. Erstmals wurden die Ergebnisse der Meßperiode 1983 mit Methoden der mathematischen Statistik untersucht. Mit Hilfe der Faktorenanalyse der Messungen 1983 am Objekt Roggen im Testgebiet Schmergow konnte nachgewiesen werden, daß die spektralen Remissionskoeffizienten von 30 ausgewählten Kanälen im sichtbaren Spektralbereich und nahen Infrarot auf zwei Hauptfaktoren (bzw. Merkmalskomplexe) zurückführbar sind. Mit Hilfe von varianzanalytischen Untersuchungen wurden Aussagen zur Unterscheidbarkeit und Stabilität der Meßergebnisse gewonnen. Die Fortsetzung der auf den geschaffenen Grundlagen aufbauenden Feldexperimente in enger Kooperation mit den Bereichen der angewandten Forschung bis zur Erarbeitung einer anwendungsbereiten Methodik ist notwendig. Der praktische Nutzen der vorgelegten Arbeit kommt dabei darin zum Ausdruck, daß meßtechnische und methodische Voraussetzungen für die Durchführung solcher Experimente und damit letzten Endes für die Ableitung von Interpretationsregeln als Unterstützung für die Auswertung von DFE geschaffen wurden. Solche Regeln tragen unter dem gegenwärtig erreichten Niveau qualitativen Charakter. Der Übergang zu quantitativen Aussagen ist in Zukunft in Verbindung mit der Einbeziehung automatischer Analyseverfahren anzustreben.

Aus den Ergebnissen der Arbeit sind folgende Schlußfolgerungen für die Weiterführung der Untersuchungen zu ziehen:

Ausgehend von den technischen Parametern und den Möglichkeiten der Fernerkundungssysteme, von denen in der nächsten Zukunft die Bereitstellung von Daten im Routinebetrieb zu erwarten ist, muß die Übertragbarkeit der am Boden gewonnenen Resultate auf die aus realen Fernerkundungsdaten gewinnbaren Informationen untersucht werden. Dazu ist die Einbeziehung von Luftaufnahmen der Testgebiete als Beispielmessung eines Fernerkundungssensors notwendig. Bei diesen Untersuchungen ist davon auszugehen, daß Fernerkundungsdaten ebenfalls nur unkorrigierte, nicht normierte Strahldichteäquivalente darstellen. Allerdings stehen hier durch die gleichzeitige Messung der remittierten Strahlung eines größeren Gebietes der Erdoberfläche im Unterschied zu einer Einzelmessung mit dem BARNES-Radiometer i.a. die Strahldichteäquivalente mehrerer verschiedener Objekte als Information zur Verfügung. Daher ergeben sich zur Normierung der routinemäßig gewonnenen Fernerkundungsdaten, die in gewissem Sinne als Voraussetzung für die Ableitung ähnlicher Resultate wie aus den Bodenmessungen angesehen wird, mehrere Möglichkeiten:

- a) Konstruktion und Anwendung von Störmodellen, die mit Hilfe von zusätzlich während der Aufnahme gewonnenen Parametern die Beleuchtungsbedingungen, Atmosphäreneinflüsse und andere varianzerzeugende Einflußfaktoren eliminieren,
- b) Ableitung stabiler und gegen die genannten Störungen invarianter fernerkundungsspezifischer Merkmalskomplexe,
- c) Benutzung von Normobjekten, Etalonflächen oder Kontextinformationen im Fernerkundungsdatensatz zur Normierung der interessierenden Objekte.

Zur Klärung dieser Fragen sowie zur weiteren detaillierten Untersuchung der Abbildungsbeziehungen von bestimmten fachspezifischen Merkmalen auf Fernerkundungsdaten ist die weitere Fortführung der Experimente entsprechend den langfristig angelegten Forschungsprogrammen notwendig.

8. Literaturverzeichnis

- /1/ Bähr, M. P.: Wechselwirkung von Photogrammetrie und Fernerkundung durch Anwendung digitaler Bildverarbeitung. Wiss. Arb. Fachricht. Vermess.-wesen. Univ. Hannover, Nr. 97 (1979).
- /2/ Barsch, H.; Wirth, H.: Methodische Untersuchungen zur Auswertung multispektraler Fernerkundungsdaten für Flächennutzungskartierungen in der DDR. Peterm. Geogr. Mitt., Gotha 127 (1983) 3, S. 191-202.
- /3/ Barsch, H.; Wirth, H.: Ergebnisse der Dechiffrierung von Satellitendaten zur Landnutzung mit Hilfe des Vegetationsindex. Vermessungstechnik, Berlin 32 (1984), (im Druck).
- /4/ Barsch, H.; Marek, K.-H.; Söllner, R.; Weichelt, H.: Zur Diagnose des Entwicklungszustandes von Getreide- und Grünlandflächen im Potsdam-Brandenburger Havelgebiet an Hand von fernerkundungsspezifischen Merkmalen. Wiss. Kolloquium "Spektrale Objektsignaturen", Bordeaux 1983.
- /5/ Bauer, H. E.; Cipra, I. E.; Anuta, P. E.; Etheridge, I. B.: Identification and Area Estimation of Agricultural Crops by Computer Classification of LANDSAT SS Data. Remote Sensing of Environment, New York 8 (1979), S. 77-92.
- /6/ Baume, O.: Standortabhängige und witterungsbedingte Ertragsunterschiede von Winterroggen- und Apfelkulturen im Havelgebiet bei Potsdam. Dissertation (A). Pädagogische Hochschule Potsdam, 1982 (unveröff.).
- /7/ Boehnel, H. I. u. a.: The Dependence of the Spectral Signature of Sugar Beets on the Observation Level and Reflection Geometry. XIV. Intern. Congress Soc. Photogrammetry. Hamburg 1980, Bd. 23, T. 7, S. 102-111.
- /8/ Bormann, P.: Erdfernerkundung. Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde Nr. 65. Potsdam 1980, 128 S.
- /9/ Brach, E. I.; Tinker, R.W.; Amour, G. T. St.: Improvements in Spectral Reflectance Measurements of Field Crops. Canadian Agricult. Engineering, 19 (1977) 2, S. 78-83.
- /10/ Chance, I. E.: Application of Suits' Spectral Model to Wheat. Remote Sensing of Environment, New York 6 (1977), S. 147-150.
- /11/ Chaume, D.; Nguyen, T.; Cudin, M. F.; Savery, G.: Characterisation of the Spectral Signature of Tropical Landscape Units Using Principal Component Analysis. 23. COSPAR-Meeting, Paper A-1.2.7. Budapest 1980.
- /12/ Clausnitzer, I.: Zur Differenzierbarkeit verschiedener Getreidearten in MKF-6-Fotos. 1. Konferenz Stand und Entwicklungstendenzen der Fernerkundung. Karl-Marx-Stadt 1981. Potsdam 1982, S. 114-120.
- /13/ Colwell, I. E.: Vegetation Canopy Reflectance. Remote Sensing of Environment, New York 3 (1974), S. 175-183.

- /14/ Fedcenko, P. P.; Kondrat'ev K. Ja.: Spektral'naja Otrazatel'naja Sposobnost' Nekatorych Pocv. Gidrometeol'zdat. Leningrad 1981.
- /15/ Fleming, M. D.; Berkebile, I. G.; Hoffee, R. M.: Computer-Aided Analysis of LANDSAT-1 MSS-Data. LARS Information Note 072475. Purdue University, West Lafayette, Indiana (USA) 1975.
- /16/ Gallo, K. P.; Daughtry, C. S. T.: Spectral Derived Inputs to Crop Yield Models. 7. Intern. Symp. of Machine Processing of Remotely Sensed Data 1981, S. 52-65. Purdue University, West Lafayette, Indiana (USA).
- /17/ Guyot, G.: Analysis of Factors Acting on the Variability of Spectral Signatures of Natural Surfaces. XIV. Intern. Congress Soc. Photogrammetry. Hamburg 1980, Bd. 23, T. 7, S. 382-393.
- /18/ Haberacker, P.: Multispektrale Klassifizierung in DIBIAS. Informatik-Fachberichte, Bd. 8 Berlin (West), Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1977, S. 71-79.
- /19/ Härtler, G.: Versuchsplanung und statistische Datenanalyse. Beiträge zur Forschungstechnologie. Berlin: Akad.-Verlag, 1976.
- /20/ Herr, W.: Varianz der abgebildeten Remissionseigenschaften natürlicher Objekte im sichtbaren und infraroten Spektralbereich. Studie. Zentralinstitut für Physik der Erde, Potsdam 1983 (unveröff.).
- /21/ Heffer, R. M.; Bauer, M. E.: Spektral Interrelationships between Vegetation and the Soil Background. 23. COSPAR-Meeting, Paper A-1.1.3. Budapest 1980.
- /22/ Jones, I. E.: Calculation of Evapotranspiration Using Color-Infrared Photography. Geological Survey Prof. Paper 655-0. US Governm. Print. Office. Washington 1977.
- /23/ Kanemasu, E. T.: Seasonal Canopy Reflectance Patterns of Wheat, Sorghum, and Soybean. Remote Sensing of Environment, New York 3 (1974), S. 43-47.
- /24/ Kanemasu, E. T. u.a.: Wheat: Its Growth and Disease Severity as Deduced from ERTS-1. Remote Sensing of Environment, New York 3 (1974), S. 235-260.
- /25/ Kautzleben, H.; Kroitzsch, V.; Wirth, H.: Die Fernerkundung der Erde mit Hilfe der Multispektralphotographie. Vermessungstechnik, Berlin 25 (1977) 3, S. 78-81.
- /26/ Kautzleben, H.; Söllner, R.: Fernerkundung der Erde durch Multispektralphotographie. Wiss. u. Fortschritt, Berlin 27 (1977) 7, S. 320-324.
- /27/ Kautzleben, H.; Marek, K.-H.; Geschke, A.; Joachim, R.: First Results of the Experiment RADUGA for Photographic Remote Sensing. Intern. Conf. on Earth Observation from Space. Toulouse 1978, ESA SP-134.
- /28/ Kautzleben, H.; Marek, K.-H.: Zur Entwicklung der Geofernerkundung in der DDR. 1. Konferenz Stand und Entwicklungstendenzen der Fernerkundung, Karl-Marx-Stadt 1981. Potsdam 1982, S. 13-24.

- /29/ Knipling, E. B.: Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation. Remote Sensing of Environment, New York 1 (1970), S. 155-159.
- /30/ Knothe, D.: Ergebnisse der Kennzeichnung, Klassifizierung und Kartierung von Mikro- und Nanochorentypen |im Havelgebiet unterhalb Potsdam. Forschungsmaterial. Pädagogische Hochschule Potsdam, 1980 (unveröff.).
- /31/ Kondrat'jev, K. Ja.; Fedcenko, P. P.: Spektral'naja Otrazatel'naja Sposobnost' i Raspoznavanie Restitel'nosti. Gidrometeoizdat. Leningrad 1981.
- /32/ Kriebel, K. T.: On the Variability of the Reflected Radiation Field Due to Differing Distributions of the Irradiation. Remote Sensing of Environment, New York 4 (1976), S. 257-264.
- /33/ Kriebel, K. T.: Average Variability of the Radiation Reflected by Vegetated Surfaces Due to Differing Irradiations. Remote Sensing of Environment, New York 7 (1978), S. 81-83.
- /34/ Krüger, W.: Zur jahreszeitlichen Veränderung von Merkmalen des Bodens und der Vegetation am Standortmeßkomplex Schmergow im Havelgebiet westlich Potsdam. Forschungsmaterial. Pädagogische Hochschule Potsdam, 1982 (unveröff.).
- /35/ Lowitz, G. E.; Leboucher, G.: An Iterativ Procedure for the K. L. Transform of a Sequence of Adjacent Data Blocks. Proc. Conf. Pattern Recognition and Image Processing. New York (1977), S. 275-279.
- /36/ Marek, K.-H.; Röser, S.: Wissenschaftliche Resultate der Flugzeugexperimente zur Erdfernerkundung. Forschungsbericht. Zentralinstitut für Physik der Erde, Potsdam 1979 (unveröff.).
- /37/ Marek, K.-H. u.a.: Methoden und Geräte zur Gewinnung von Fernerkundungsdaten. 3. Lehrheft Geofernerkundung. Dresden: Zentralstelle für das Hochschulfernstudium, 1982.
- /38/ Marek, K.-H. u.a.: Erste Erfahrungen beim Einsatz von RC-Bildflugzeugen für Grundlagenforschungen zur Fernerkundung. Vermessungstechnik, Berlin 30 (1982) 10. S. 329-331.
- /39/ Miller, L. D.; Pearson, R. L.; Trucker, C. I.: A Mobile Field Spectrometer Laboratory. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 42 (1976) 4, S. 569-572.
- /40/ Nilson, T. A. u.a.: Ob Ocenke stepeni sozrevanija sernovych kultur distancionimi opticeskimi metodami. Issl. Zemli iz Kosmosa, Moskva (1982) 1, S. 41-47.
- /41/ Nollau, V.: Statistische Analysen. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1979
- /42/ Pelz, E.: Einige Aspekte zur Luftbildinterpretation in der Forstwirtschaft. Beiträge für die Forstwirtschaft, Eberswalde 7 (1973) 4, S. 153-157.



- /43/ Rasch, D.: Elementare Einführung in die mathematische Statistik. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1968.
- /44/ Reginato, R. I.; Idso, S. B. Jackson, R. D.: Estimating Forage Crop Produktion: A Technique Adaptable to Remote Sensing. Remote Sensing of Environment, New York 7 (1978), S. 77-80.
- /45/ Robinson, B. F. u. a.: A Multiband Radiometer and Data Acquisition System for Remote Sensing Field Research. XIV Intern. Congress Soc. Photogrammetry, Hamburg 1980, Bd. 23, T. 8, S. 783-793.
- /46/ Rosanov, L. G.; Ticenok, A. P.: Raspoznavanie prirodnykh ob'ektov po spektral'nim priznakam. Aerokosm. issled. zemli, obrabotke videoinformacit na EVM, Moskva: Isdat. Nauka, 1978, S. 107-112.
- /47/ Rosenfeld, A.: Iterative Methods in Image Analysis. Proc. Conf. Pattern Recognition and Image Processing. New York (1977), S. 14-18.
- /48/ Sagdejev, R. S.; Salistcev, K. A.; Kautzleben, H. (HRGG): Atlas zur Interpretation aerokosmischer Multispektralaufnahmen. Berlin, Moskau, Akademie Verlag, Verlag Nauka, 1982.
- /49/ Scheffler, E.: Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1974.
- /50/ Schubert, R.; Barsch, M.: Untersuchungen zur Bestimmung des Zustandes der Vegetation sowie der Wechselwirkungen zwischen Boden und Vegetation am Standortmeßkomplex Schmergow westlich Werder. Forschungsbericht. Pädagogische Hochschule Potsdam, 1983 (unveröff.).
- /51/ Sievers, I.: Zusammenhänge zwischen Objektreflexion und Bildschwärzung in Luftbildern. Dissertation. München: Verlag d. Bayr. Akademie der Wissenschaften, 1976.
- /52/ Soer, G. I. R.: Estimation of Regional Evapotranspiration and Soil Moisture Conditions Using Remotely Sensed Crop Surface Temperatures. Remote Sensing of Environment, New York 9 (1980), S. 27-47.
- /53/ Söllner, R.; Weichelt, H.: O formalisacii processov identificirovanije sadacach distancionovo zondirovanija. Beiträge der 2. wiss. Konferenz der IK-AG Fernerkundung. Brno 1980, S. 171-176.
- /54/ Söllner, R.: Untersuchungen zur interpretationsgerechten Aufbereitung von Multispektralfotografien. Veröffentlichungen des Zentralinstitut für Physik der Erde Nr. 68. Potsdam 1982.
- /55/ Söllner, R.; Marek, K.-H.; Weichelt, H.; Wirth, H.: Zur Formalisierung von Erkennungsprozessen in der Fernerkundung. Vermessungstechnik, Berlin 30 (1982) 3, S. 81-84.

- /56/ Söllner, R.: Zur Formallsierung fernerkundungsspezifischer Erkennungsprozesse. 1. Konferenz Stand und Entwicklungstendenzen der Fernerkundung, Karl-Marx-Stadt 1981. Potsdam 1982, S. 43-52.
- /57/ Söllner, R.: Tollinger, V. u. a.: Methodik des Einsatzes von RC-Flugmodellen zur Datengewinnung in der Fernerkundung (im Druck).
- /58/ Späth, H.: Cluster-Analyse-Algorithmen zur Objektklassifizierung und Datenreduktion. München, Wien: Oldenburg Verlag, 1977.
- /59/ Steinhagen, H.: Fuchs, S.: Objekterkennung. Berlin: VEB Verlag Technik, 1976.
- /60/ Stiller, H.: Spektrale Untersuchungen der Erde und ihrer Atmosphäre aus dem Kosmos. Spektrum, Berlin 8 (1977) 8, S. 11-14.
- /61/ Stone, L. R.: Kanemasu, E. T.: Horton M. L.: Grain Sorghum Canopy Temperature as Influenced by Clouds. Remote Sensing of Environment, New York 4 (1975), S. 177-181.
- /62/ Storck, H.-H.: Weichert, H.: Beispiele für die Anwendung von Fernerkundungsdaten in der Obstproduktion. 1. Konferenz Stand und Entwicklungstendenzen der Fernerkundung, Karl-Marx-Stadt 1981. Potsdam 1982, S. 121-131.
- /63/ Suite, G. H.: The Calculation of the Directional Reflectance of a Vegetation Canopy. Remote Sensing of Environment, New York 2 (1972), S. 117-125.
- /64/ Suite, G. H.: The Cause of Azimutal Variations in Direktional Reflectance of Vegetative Canopies. Remote Sensing of Environment, New York 2 (1972), S. 175-182.
- /65/ Suite, G. H.: Safir, G. R.: Verification of a Reflectance Model for Mature Corn with Applications to Corn Blight Detection. Remote Sensing of Environment, New York 2 (1972), S. 183-192.
- /66/ Tucker, C. I.: Resolution of Grass Canopy Biomass Classes. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 8 (1977), S. 1059-1067.
- /67/ Tucker, C. I. Relationship of Crop Radiance to Alfalfa Agronomic Values. Internat. Journ. Remote Sensing, Berkshire (U. K.) 1 (1980) 1, S. 69-75.
- /68/ Ungar, S. G.: Successful Determination of Growth Stage from Reflectance Spectra of Crops. 23. COSPAR-Meeting, Paper A-1.1.4. Budapest 1980.
- /69/ Wasilev, L. N.: Desifrirovane pocvennovo i rastitel'novo pokrova s ispol' zovaniem cislovoj informacii. Issl. Zemli iz kosmosa, Moskva (1982) 1, S. 68-73.
- /70/ Weber, E.: Einführung in die Faktorenanalyse, Jena: VEB Gustav-Fischer-Verlag, 1974.

- /71/ Weichelt, H.: Herr, W.: Röser, S.: Söllner, R.: Methodik und erste Ergebnisse von Bodenexperimenten auf Testflächen. 1. Konferenz Stand und Entwicklungstendenzen der Fernerkundung, Karl-Marx-Stadt 1981, Potsdam 1982, S. 162-167.
- /72/ Weichelt, H.: Experimentelle Einsatztechnologie des Bodenmeßkomplexes. Forschungsbericht. Zentralinstitut für Physik der ERde. Potsdam 1983 (unveröff.).
- /73/ Weisse, R.: Verallgemeinerte Ergebnisse zum inneren und äußeren Bau von Grundmoränenplatten im Potsdamer Raum. Peterm. Geogr. Mitt., Gotha 126 (1982), S. 103-11.
- /74/ Winogradov, B. W.: Distancionoe izmerenie fitomassy. Issl. Zemli iz kosmosa, Moskva (1982) 5, S. 36-45.
- /75/ Wirth, H.: Schilbach, G.: Weichelt, H.: Rechnergestützte Analyse von MKF-6-Aufnahmen durch überwachte Klassifizierung. Vermessungstechnik, Berlin 28 (1980) 6, S. 194-197.
- /76/ Akademie Nauk SSSR: Principi i metodi sozdanija kataloga spektral'nych i predmetno-specificheskich priznakov, ocenki sostojanija i klassifikacii prirodnych ob'ektov. Forschungsbericht. Institut für Kosmosforschung der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, Moskau 1980.
- /77/ Zentrallabor für Kosmosforschung der Bulgarischen Akademie der Wissenschaften: Rukovodstvo po nazemnym izmerenijem na poligonach socialisticheskich stran. Forschungsbericht. Sofia 1981.
- /78/ Akademie Nauk Azerbaidzanskoj SSR: Tipovaja Naucnaja Programma Podsputnikovyh Eksperimentov na poligonach stran-ucastnik programmy Interkosmos, Forschungsbericht. Institut kosmicheskich issledovanij prirodnych resursov, Baku 1981.





