

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

Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde
Nr 65

ERDFERNERKUNDUNG

von

Peter Bormann

Herausgeber: Der Direktor des Zentralinstituts für Physik der Erde Potsdam

Als Manuskript gedruckt Potsdam 1980

F 106 / 81 P 329 / 80

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassungen	5
Vorbemerkung	7
1. Begriffs- und Problembestimmung	9
2. Naturwissenschaftliche Grundlagen der Fernerkundung	12
2.1. Elektromagnetisches Spektrum, atmosphärische Fenster und Strahlungsbilanz der Erde	12
2.2. Zum Einfluß gasförmiger, flüssiger und fester Substanzen auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen	21
2.2.1. Zur Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im sichtbaren und IR-Bereich des Spektrums	21
2.2.2. Zur Ausbreitung von Mikrowellen	24
3. Technische Grundlagen sowie Stand und Entwicklungstendenzen der Fernerkundung	35
3.1. Fernerkundungssensoren	35
3.1.1. Generelle Bemerkungen zum Auflösungsvermögen von Fernerkundungssensoren	35
3.1.2. Passive Sensoren	40
3.1.2.1. Fotografische Fernerkundungssysteme	40
3.1.2.2. Hochauflösende Scannersysteme für Erd- und Erdressourcenbeobachtungen	45
3.1.2.3. Passive Sensoren für Fernbeobachtungen der Atmosphäre, Ozeane und großräumiger Umweltphänomene	51
3.1.3. Aktive Sensoren	53
3.1.3.1. Radarsensoren mit realer Apertur	53
3.1.3.2. Radarsensoren mit synthetischer Apertur	56
3.2. Bodensysteme für den Empfang, die Vorverarbeitung und die Verteilung von Satellitendaten	60
3.3. Nutzerzentren für die Interpretation von Fernerkundungsdaten	63
4. Grundlagen und Methodik der Aufbereitung und Interpretation von Fernerkundungsdaten	68
4.1. Generelle Bemerkungen	68
4.2. Grundlagen der visuellen Interpretation und Methoden der analogen fotografisch-optischen Bildbearbeitung	70
4.3. Methoden der digitalen Datenbearbeitung	72
4.3.1. Generelle Übersicht	72
4.3.2. Zur automatischen Klassifizierung und Hauptachsentransformation multispektraler Bilddaten	74
4.3.3. Zur Flächenbestimmung mit Hilfe klassifizierter digitaler Bilddaten	78
4.4. Methoden der Datensammlung, Interpretation und Verifikation	80
4.4.1. Sammlung von Daten in verschiedenen Niveaus und ihre gemeinsame Auswertung	80

	Seite
4.4.2. Methodik der Sammlung und Nutzung unabhängiger Bodeninformationen	82
4.4.3. Zur Abgrenzung homogener Merkmalsschichten in Fernerkundungsaufnahmen	85
4.4.4. Konstruktion eines Flächenrahmens für die Datensammlung	86
4.4.5. Agro-meteorologische Methode der Abschätzung von Ernteerträgen	87
4.4.6. Klassifizierung von Landbedeckung und -nutzung	89
4.4.7. Zur Feststellung und Überwachung von Umweltverunreinigungen	93
4.4.8. Geologische Interpretation von Fernerkundungsdaten	95
5. Voraussetzungen, Bedürfnisse, Nutzung und Organisation der Fernerkundung	102
5.1. Generelle Voraussetzungen und Bedürfnisse	102
5.2. Kosten-Nutzen-Betrachtungen in der Fernerkundung	105
5.3. Allgemeine Gesichtspunkte der Organisation von Fernerkundungsaktivitäten	106
6. Schlußfolgerungen	111
Erläuterung von Abkürzungen	115
Literatur	118

Zusammenfassung

Die Arbeit vermittelt einen Überblick über wissenschaftlich-technische, erkenntnistheoretische, methodische, ökonomische und organisatorische Probleme der Erdfernerkundung mittels Flugzeugen und Satelliten. Dabei liegt die Betonung auf der Veranschaulichung und kritischen Bewertung der Grundlagen, des Standes wie der Entwicklungstendenzen dieser neuen Erkundungsmethode. Behandelt werden folgende Fragenkomplexe:

- Einfluß gasförmiger, flüssiger und fester Substanzen auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen;
- Passive und aktive Fernerkundungssensoren;
- Definition und Bedeutung des Auflösungsvermögens von Fernerkundungssensoren;
- Bodensysteme für den Empfang, die Vorverarbeitung, Verteilung und Interpretation von Fernerkundungsdaten;
- Grundlagen der visuellen Interpretation;
- Methoden der digitalen Bearbeitung von Fernerkundungsdaten;
- Methoden der Datensammlung, Interpretation und Verifikation;
- Voraussetzungen und Kosten-Nutzen-Betrachtungen zur Fernerkundung;
- Betrieb und Organisation von Fernerkundungssystemen.

Summary

The paper provides a comprehensive survey of scientific-technical, cognitive, methodological, economic and organizational problems of aerial and satellite remote sensing of the earth. Emphasis is laid on the demonstration and critical assessment of the fundamentals, the present state and the tendencies of development of this new survey and exploration method. Major topics covered are:

- Influence of gaseous, liquid and solid media on the propagation of electromagnetic waves;
- Passive and active remote sensors;
- Definition and meaning of the resolution of remote sensors;
- Ground systems for the reception, pre-processing, dissemination and interpretation of remote sensing data;
- Fundamentals of visual interpretation;
- Digital processing methods of remote sensing data;
- Methods of data collection, interpretation and verification;
- Prerequisites and cost-benefit considerations;
- Operation and organization of remote sensing systems.

Резюме

В статье дается обзор научно-технических, познавательных, методических, экономических и организационных проблем дальнего зондирования Земли с помощью самолетов и спутников Земли. При этом делается упор на изложение и критическую оценку основ уровня и направлений развития этого нового метода зондирования. Обсуждаются следующие вопросы:

- влияние газовой, жидкой и твердой среды на распространение электромагнитных волн,
- пассивные и активные датчики для дальнего зондирования,
- что такое разрешающая способность датчиков зондирования?
- наземные системы приема, системы предварительной обработки, системы распределения и интерпретации данных дальнего зондирования,
- основы визуальной интерпретации,
- методы числовой обработки данных дальнего зондирования,
- методы сбора данных, интерпретации и проверки,
- предпосылки и вопрос стоимости и пользы дальнего зондирования;
- организация и эксплуатация систем дальнего зондирования.

Vorbemerkung

Mit der vorliegenden Arbeit von Dr. sc. nat. Peter BORMANN wird in der Reihe der Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde erstmals ein Beitrag zur Fernerkundung der Erde mit aerokosmischen Mitteln publiziert. Diese Arbeit beruht vor allem auf den Erkenntnissen und Erfahrungen, die der Verfasser während seiner mehrjährigen Tätigkeit in der Weltraum-Abteilung des Sekretariates der UNO in New York sammeln konnte. Weiterhin sind Erkenntnisse ausgewertet worden, die in der DDR beim Aufbau dieses neuen Arbeitsgebietes, insbesondere im Zentralinstitut für Physik der Erde, gewonnen wurden. Über die dabei erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse wurde bereits mehrfach in einschlägigen Zeitschriften publiziert.

In seiner Arbeit behandelt Dr. BORMANN in kritisch-wertender Form die wissenschaftlichen, technischen, methodischen und organisatorischen Grundlagen der Fernerkundung. Er liefert damit auch einen Beitrag zu der international geführten Diskussion über die Möglichkeiten und Grenzen dieser Technologie zur effektiven Gewinnung von Daten über die Objekte und Sachverhalte an der Oberfläche der Erde von Bord künstlicher Satelliten aus. Die Arbeit ist jedoch vor allem dazu bestimmt, der Vielzahl von Interessenten an der Fernerkundung einen konzentrierten und kompetenten Überblick über die für die wissenschaftliche und volkswirtschaftliche Anwendung wichtigsten wissenschaftlich-technischen Fragen sowie ausgewählte methodische Aspekte der gezielten Sammlung und Aufbereitung von Fernerkundungsdaten zu geben. Vergleichsweise kurz behandelt werden alle Probleme, die mit der Detailinterpretation der Daten, d. h. ihrer Umwandlung in konkrete nützliche Aussagen über die Objekte und Sachverhalte an der Erdoberfläche, z. B. über die natürlichen Ressourcen der Erde und den Zustand der Umwelt, verknüpft sind. Diese Probleme sind nach wie vor Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten, geht es doch dabei um die Integration dieser neuartigen Daten in die seit vielen Jahren bewährten Daten- und Informationsstrukturen der traditionellen geo- und biowissenschaftlichen Arbeitsgebiete.

Prof. Dr. habil. Heinz KAUTZLEBEN
Institutsdirektor

1. Begriffs- und Problembestimmung

Die wohl allgemeinste und kürzeste Definition des Begriffs "Fernerkundung" (engl.: remote sensing) gaben BARRETT und CURTIS [1]: "Fernerkundung ist die Beobachtung eines Objektes (Zieles) mittels einer Vorrichtung, die von diesem durch eine gewisse Entfernung getrennt ist." Im heutigen wissenschaftlich-technischen Sprachgebrauch wird allerdings der Begriff der Fernerkundung, insbesondere der Satellitenfern- erkundung, enger gefaßt. In einem Grundlagendokument zur Satellitenfern- erkundung, das 1973 vom Sekretariat der Vereinten Nationen auf Ersuchen der Arbeitsgruppe Fernerkundung des UNO-Ausschusses für die friedliche Nutzung des Weltraums (COPUOS - Committee on the Peaceful Uses of Outer Space) angefertigt wurde, wird folgende Definition gegeben [2]: "Die Fern- erkundung der Erde vom Weltraum aus ist eine Methodologie zur U n t e r s t ü t z u n g (Hervorhebung durch Vf.) der Charakterisierung der Natur und der Beschaffenheit von Naturressourcen, -merkmalen und -erscheinungen sowie der Erdumwelt mittels Beobachtungen und Messungen von Weltraumplattformen aus. Im besonderen beruhen diese Methoden gegenwärtig auf der Emission und Reflexion elektromagnetischer Strahlung".

Eine andere, recht umfassende und präzise Definition enthält ein Arbeitspapier, das 1977 von der sowjetischen Delegation im Unterausschuß Wissenschaft und Technik (STSC) des COPUOS vorgelegt wurde [3]. Danach bezieht sich der Begriff "Fernerkundung" auf "Beobachtungen und Messungen der energetischen und Polarisationscharakteristika der Eigen- und Reflexionsstrahlung von Elementen des Festlandes, der Weltmeere und der Atmosphäre der Erde in verschiedenen elektromagnetischen Wellenlängenbereichen, die zur Beschreibung des Ortes, der Natur und der zeitlichen Veränderlichkeit der natürlichen Parameter und Erscheinungen, der natürlichen Ressourcen der Erde, der Umwelt sowie antropogener Objekte und Gebilde b e i t r a g e n " (Hervorhebung durch Vf.). Diese Definition wurde wörtlich in den Artikel I der "Konvention über die Übergabe und Nutzung von Daten der Fernerkundung der Erde aus dem Weltraum" aufgenommen, die am 19. Mai 1978 in Moskau von 9 sozialistischen Staaten unterzeichnet wurde.

Aus diesen Definitionen wird deutlich, daß es sich bei der Fernerkundung um eine spezifische Methode zur effektiven Gewinnung von Informationen handelt, die für die Planung und Leitung wirtschaftlicher und anderer gesellschaftlicher Aktivitäten erforderlich bzw. vorteilhaft sind.

Im Prinzip kann die Fernerkundung als eine technische Nachbildung, Vervollkommnung und Erweiterung des natürlichen Systems Auge - Gehirn angesehen werden. Die Sensoren zur Durchführung von Fernerkundungsbeobachtungen können auf verschiedenartigsten Meßplattformen montiert sein wie Masten, Ballonen, Drachen, Hubschraubern, Flugzeugen, Raketen, bemannten oder unbemannten künstlichen Erdsatelliten und Weltraumlaboratorien. Es können passive (s. 3.1.2.) oder aktive Sensoren (s. 3.1.3.) mit sehr unterschiedlichem geometrischen, spektralen und radiometrischen Auflösungsvermögen sein. Dabei stellen verschiedene Anwendungsarten der Fernerkundung unterschiedliche Anforderungen an diese Parameter wie auch an die günstigsten Zeitintervalle zur Wiederholung bestimmter Beobachtungen (zeitliche Auflösung T_w). Deshalb müssen in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung die Sensorparameter optimiert und die geeignetsten Plattform-Sensor-Kombinationen gefunden werden.

Ein besonderes Merkmal der Fernerkundung ist die Erweiterung des bei visuellen Beobachtungen bzw. in der konventionellen Fotografie genutzten Spektralbereichs. Verglichen mit konventionellen Methoden der Datengewinnung fallen insbesondere bei der Satellitenfernerkundung in kürzerer Zeit weit größere Datenmengen für wesentlich größere Gebiete an. Das gestattet einerseits, den Umfang aufwendiger Bodenerhebungen und -messungen zu reduzieren (s. 4.4.1. und 4.4.2.), erfordert aber zum anderen auch die immer umfassendere Nutzung technischer Hilfsmittel zur Automatisierung des Prozesses der Gewinnung (s. 3.1.2., 3.2.) sowie der Bearbeitung und Analyse (s. 3.2., 4.3.) von Fernerkundungsdaten.

Es besteht ein objektiver Trend zur automatisierten routinemäßigen Informationsgewinnung unmittelbar durch das komplexe technische System zur Gewinnung und Auswertung von Fernerkundungsdaten. Dennoch kann im Prozeß der Umsetzung dieser Daten in praktisch nutzbare Informationen in der Regel nicht auf die Einbeziehung zusätzlicher Daten und Informationen aus unabhängigen Quellen verzichtet werden (s. u. sowie 2.2. und 4.4.). Eine Vielzahl von Anwendungen erfordert darüber hinaus die Einbeziehung des erfahrenen Fachinterpretators mit den speziellen kosteneffektiven Fähigkeiten seines Auge-Gehirn-Systems (s. 4.2., 4.4.3., 4.4.4., 4.4.8.).

Die Fernerkundung vermag in gewissem Maße die konventionellen Informationssysteme mit ihrem oft hohen Aufwand an menschlichen Aktivitäten zu ersetzen, rationalisieren, intensivieren und in mancher Hinsicht auch zu erweitern, doch erfordert dies eine weitgehende technologische und methodische Umgestaltung der konventionellen Informationssysteme. Prinzipiell sind jedoch (sieht man von der Fernerkundung atmosphärischer Parameter ab) direkte Aussagen der Fernerkundung auf Sachverhalte an der Erd- und Wasseroberfläche beschränkt. Sie sind nur dann möglich, wenn sich diese Sachverhalte durch physikalische und geometrische Eigenschaften der elektromagnetischen Strahlung übertragen und abbilden lassen (s. 2.). Auf weitere, nicht oberflächliche Objekteigenschaften kann nur indirekt aus Sachverhalten an der Oberfläche geschlossen werden. Dazu muß bekannt sein, in welcher Beziehung die gesuchten Eigenschaften/Parameter zu den physikalischen und geometrischen Eigenschaften der Oberfläche stehen. Die Aufhellung der komplexen Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften/Parametern der Objekte und der von ihnen ausgehenden reflektierten und emittierten elektromagnetischen Strahlung erfordert neben umfassenden Grundlagenforschungen auch die gezielte Sammlung und Aufbereitung von Bodeninformationen bei der Durchführung konkreter Fernerkundungsprojekte (s. 4.4.2.).

Auf einige entscheidende Detailfragen der komplexen wissenschaftlich-technischen und methodischen Gesamtproblematik soll im folgenden näher eingegangen werden. Dabei liegt der Schwerpunkt auf Fragen der Satellitenfernerkundung. Der volle Nutzen der Satellitenfernerkundung läßt sich aber nur im Rahmen komplexer Erkundungen (engl.: integrated surveys) realisieren. Deshalb werden auch die Fernerkundung von luftgetragenen Plattformen aus sowie Messungen in unmittelbarer Objektnähe (engl.: proximate sensing) in dem für das Verständnis der Problematik erforderlichen Umfang behandelt.

Die Begriffe "Daten" und "Informationen" werden in der vorliegenden Arbeit in Übereinstimmung mit den Empfehlungen des Unterausschusses Wissenschaft und Technik des COPUOS [7] und den in der o. g. Konvention gegebenen Definitionen verwendet:

- "Der Begriff 'Primärdaten' bedeutet solche Daten, die von den auf Satelliten zur Fernerkundung eingesetzten Sensoren gewonnen und vom Satelliten aus entweder über telemetrische Kanäle in Form elektromagnetischer Signale oder körperlich in beliebiger Form wie z. B. auf photographischem Film oder Magnetband übermittelt werden sowie auch die aus diesen Daten abgeleiteten vorverarbeiteten Produkte, die für nachfolgende Analysen verwendet werden können."
- "Der Begriff 'analysierte Information' bedeutet das im analytischen Prozeß der Bearbeitung von Primärdaten in Verbindung mit Daten und Kenntnissen aus **a n d e r e n Q u e l l e n** (Hervorhebung Vf.) als Fernerkundungssatelliten gewonnene Endprodukt."

2. Naturwissenschaftliche Grundlagen der Fernerkundung

Ausführliche Abhandlungen zu den naturwissenschaftlichen Grundlagen der Fernerkundung finden sich in einer Vielzahl von Handbüchern, Monographien und Artikeln (z. B. [1], [4], [5], [6], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [19]). Hier sollen sie nur soweit dargestellt werden, wie es zum Verständnis und zur sachlichen Beurteilung der Möglichkeiten und Erfordernisse von Fernerkundungsaktivitäten nötig ist.

2.1. Elektromagnetisches Spektrum, atmosphärische Fenster und Strahlungsbilanz der Erde

Abb. 1 gibt eine Übersicht über das elektromagnetische Wellenspektrum und die zur Verfügung stehenden "atmosphärischen Fenster", d. h. die Wellenlängenbereiche, für die die Atmosphäre transparent ist. Daraus ist ersichtlich, daß unabhängig vom natürlichen Strahlungsangebot bzw. den technisch realisierbaren Strahlungsquellen und -sensoren nur ein kleiner Ausschnitt für die Fernerkundung von Satelliten bzw. hochfliegenden Flugzeugen aus zur Verfügung steht. Für die lebensschädigende energiereiche kurzwellige Strahlung ($\lambda < 0,3 \mu\text{m}$) ist die Atmosphäre praktisch undurchlässig. Sie bildet somit einen natürlichen Schutzschild für das Leben auf der Erde. Die wichtigsten "atmosphärischen Fenster" liegen im Bereich des sichtbaren Lichts, des nahen Infrarots, des thermischen Infrarots und der Mikrowellen. Praktisch werden alle diese Fenster heute bereits genutzt. Dabei werden für die Registrierung der Strahlung im sichtbaren und nahen IR-Bereich Filmemulsionen bzw. photoelektrische Elemente, für die Registrierung thermischer Strahlung in Flüssiggasen tiefstgekühlte Festkörperdetektoren (z. B. InSb bzw. Cd Hg Te) und für den Empfang von Mikro- und Radarwellen elektronische Empfangseinrichtungen (z. B. Antennen mit rauscharmen Verstärkern) verwendet (s. 3.).

Abb. 2 zeigt Kurven der spektralen Energieverteilung der solaren und terrestrischen Strahlung oberhalb der Erdatmosphäre bzw. am Erdboden. Ihr Vergleich macht den absorbierenden Einfluß der Erdatmosphäre deutlich. Für die atmosphärische Absorption sind in erster Linie Wasserdampf, Kohlendioxyd und Ozon verantwortlich. Etwa die Hälfte der Strahlungsenergie der Sonne entfällt auf den Bereich des sichtbaren Lichts zwischen $0,40 \mu\text{m} < \lambda < 0,75 \mu\text{m}$. Die Verschiebung der Maxima der Strahlungskurven für Sonne und Erde ergibt sich mit T als der absoluten Temperatur aus dem WIENSchen Verschiebungsgesetz

$$(1) \quad \lambda_{\text{max}} \cdot T = \text{const.} \quad \text{mit} \quad \text{const.} = 2897 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

und der auffällige Unterschied der ausgestrahlten Gesamtenergie aus dem STEFAN-BOLTZ-MANNschen Gesetz

$$(2) \quad E_{\text{gesamt}} = \sigma \cdot T^4 \quad \text{mit} \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} .$$

Es fällt des weiteren auf, daß die Kurve für die extraterrestrische Sonnenstrahlung sich nahezu ideal der PLANCKschen Strahlungskurve für einen "schwarzen Körper" mit $T = 6000 \text{ K}$ anpaßt. Demgegenüber strahlen natürliche Objekte auf der Erde bei einer gegebenen Wellenlänge allgemein weniger Energie aus als ein schwarzer Körper der gleichen Temperatur, d. h. ihr Emissionsvermögen ϵ ist kleiner als 1 ("graue Körper"). Das Emissionsvermögen grauer Körper ist von deren Materialeigenschaften, Form und Oberflächenbeschaffenheit sowie von der Wellenlänge der ausgesandten Strahlung abhängig.

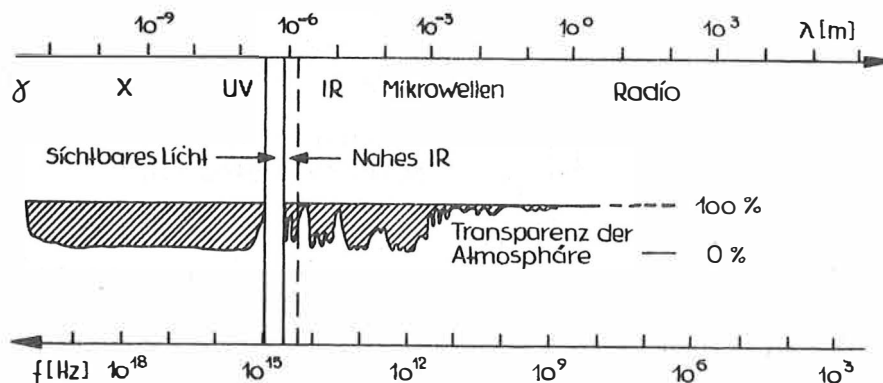


Abb. 1. Elektromagnetisches Spektrum und Transparenz der Atmosphäre

Abb. 3 zeigt als Beispiel die Abhängigkeit des Emissionsvermögens ε silikatischer Gesteine im thermischen IR-Bereich von der Wellenlänge λ . Werte für ε irdischer Strahler liegen im thermischen IR allgemein zwischen etwa $0,7 < \varepsilon < 1,0$. Da jedoch die ausgestrahlte Energie in diesem Bereich des Spektrums eine sehr starke Temperaturabhängigkeit zeigt ($\sim T^4$ bis $\sim T^8$), dominiert der Einfluß von Temperaturvariationen bei weitem.

Nach Abb. 2 existieren neben dem atmosphärischen Hauptfenster für die irdische Strahlung zwischen etwa $8 \mu\text{m} < \lambda < 12,5 \mu\text{m}$ weitere Fenster um $\lambda \approx 4 \mu\text{m}$ bzw. $\lambda \approx 5 \mu\text{m}$. Auf Grund des steileren Flankenverlaufs der Strahlungskurve der Erde im Bereich der letztgenannten Fenster sind bei Änderungen der Oberflächentemperatur eines irdischen Strahlers dort wesentlich stärkere Änderungen der entsprechenden Strahlungsenergien zu erwarten als im Bereich der langwelligen Flanke des Spektrums. Das macht eine Nutzung dieser Bänder besonders attraktiv für die Bestimmung von Oberflächentemperaturen

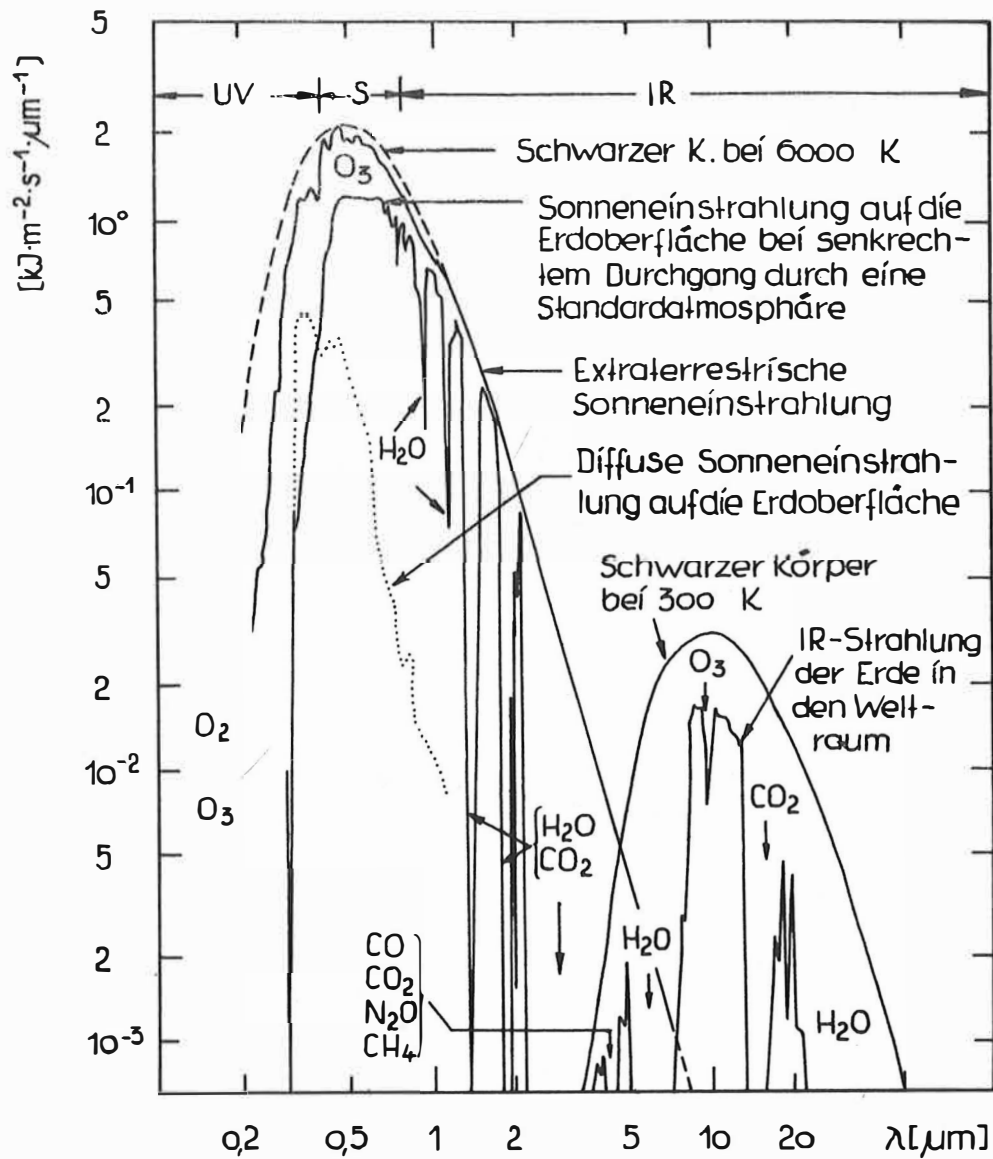


Abb. 2. Spektrale Energiedichten der solaren und terrestrischen Strahlung (nach SELLERS [19] und VALLEY [22])

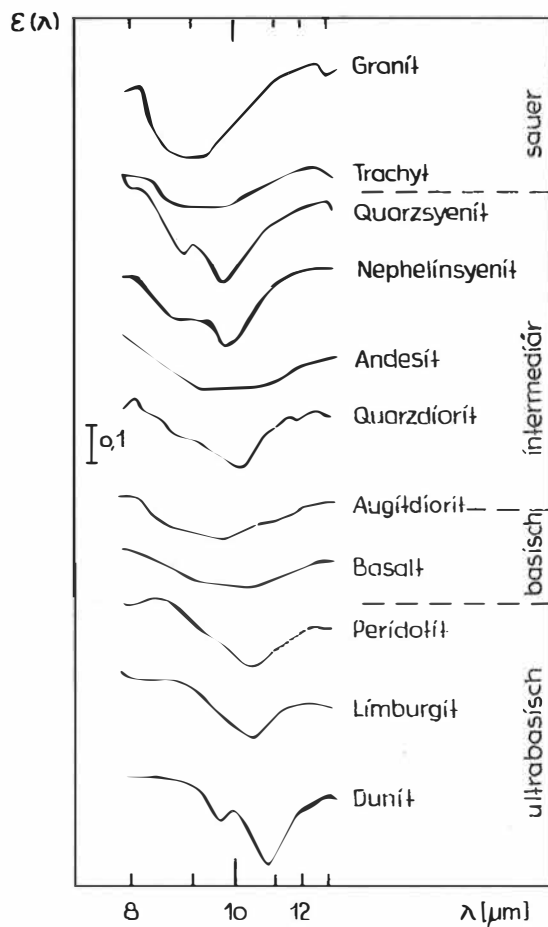


Abb. 3. Normales spektrales Emissionsvermögen ausgewählter Gesteine im thermischen IR (nach Labormessungen). Die Spektren sind von oben nach unten entsprechend abnehmendem SiO_2 -Gehalt geordnet (nach LYON, [21])

(z. B. in TIROS-N/NOAA-6, s. [163]_7) Allerdings ist sie, zumindest über dem Festland, nur zur Nachtzeit sinnvoll, da tagsüber die reflektierte Sonnenstrahlung für diese Wellenlängen in der gleichen Größenordnung liegt. Die Trennung und richtige Interpretation der verschiedenen Strahlungsanteile wird dadurch sehr erschwert und setzt umfangreiche gleichzeitige Beobachtungen der Strahlungsbilanz und der Objekteigenschaften am Boden voraus.

Die im Mikrowellenbereich von einem grauen Körper abgestrahlte Energie $E(\lambda)$ kann annähernd durch die Beziehung

$$(3) \quad E(\lambda) = \frac{2k}{\lambda^2} \epsilon T$$

beschrieben werden (s. [18]). $E(\lambda)$ hängt also sowohl von ϵ als auch von T linear ab. Damit beeinflusst das Emissionsvermögen eines Körpers im Mikrowellenbereich viel stärker als im thermischen IR die von ihm abgestrahlte Energie. Nach Abb. 4 kann ϵ

für Mikrowellen in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel (Inzidenzwinkel) α , von der Art des Materials, seinem Feuchtigkeitsgehalt wie auch der Rauigkeit seiner Oberfläche bezogen auf die Wellenlänge Werte zwischen $0 < \epsilon \leq 1$ annehmen.

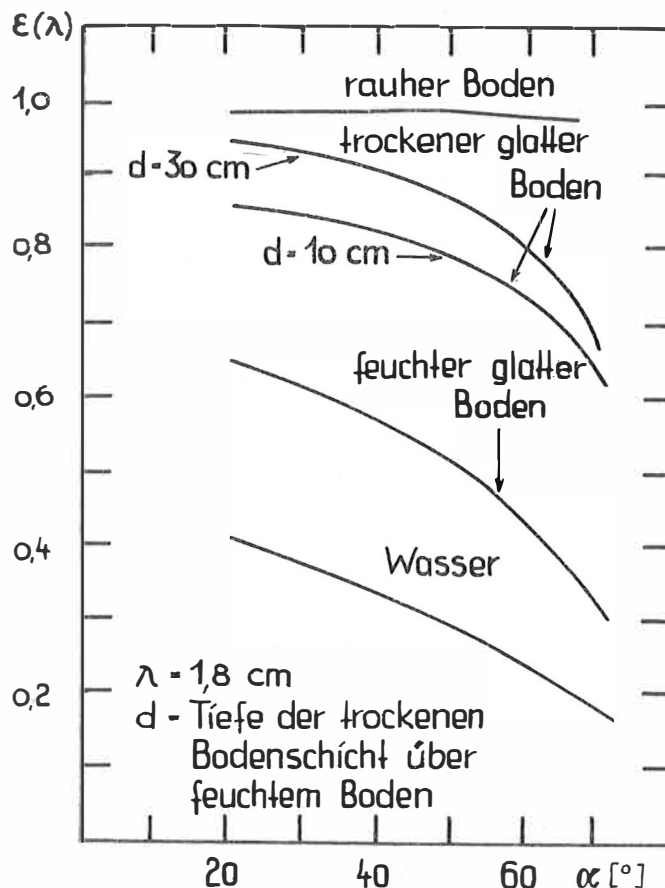


Abb. 4. Emissionsvermögen $\epsilon(\lambda)$ natürlicher Oberflächen für horizontal polarisierte Mikrowellen in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel α (nach FARROW [9])

Das beobachtete Emissionsvermögen hängt außerdem von der Polarisationsrichtung ab, für die der Sensor empfindlich ist. Während beispielsweise die Strahlung einer rauhen Oberfläche praktisch keine bevorzugte Polarisationsrichtung zeigt, ist die von einer glatten Oberfläche im flachen Winkel abgestrahlte Strahlung deutlich polarisiert.

Die beobachtete scheinbare Strahlungstemperatur $T_s = \epsilon T$ eines Objektes kann deshalb erheblich von der wahren Temperatur T abweichen. T_s entspricht der Temperatur eines schwarzen Körpers der gleichen Strahlungsenergie. Dieser Umstand gestattet es, Körper zu trennen, die die gleiche Temperatur aber unterschiedliches ϵ haben (z. B. Eis und Wasser in einem Eis-Wasser-Gemisch). Andererseits können Strahler auch sehr

unterschiedlicher Temperatur bei entsprechenden Unterschieden von ϵ im Mikrowellenbild gleich erscheinen. Deshalb erfordert die zuverlässige Interpretation entsprechender Daten in der Regel umfangreiche Zusatzinformationen aus anderen Wellenlängenbereichen (z. B. dem IR) und/oder unabhängige Bodeninformationen.

Abb. 5 zeigt in einer schematischen Übersicht die mittlere Strahlungsbilanz der Erde. Daraus wird neben der o. g. Absorption durch atmosphärische Gase der zusätzliche erhebliche Einfluß der Wolkenbedeckung, atmosphärischer Verunreinigungen sowie von Verdunstung, Konvektion und Wärmeleitung auf die Strahlungsbilanz offensichtlich. Die Vielzahl von Wärmetransporten zwischen der Atmosphäre und den verschiedenen Umweltgrenzflächen (z. B. Boden-, Wasser- und Pflanzenoberflächen) werden durch die verfügbare Nettostrahlung N realisiert. N ergibt sich aus der Differenz aller auf die Erdoberfläche einfallenden bzw. von dieser ausgehenden kurz- und langwelligigen Strahlungsanteile. Die wichtigsten Wärmetransport- und Umwandlungsprozesse sind Wärmeleitung und Konvektion (fühlbarer Wärme fluß S) sowie Evapotranspiration und Kondensation (latenter Wärme fluß L). Dazu kommt der Bodenwärme fluß B . Er kann bei bestimmten lokalen Bedingungen erheblich sein (s. Abb. 7), ist aber bei der Betrachtung großräumiger und langfristiger Energiebilanzen zu vernachlässigen. Zusammenfassend läßt sich die Strahlungs-Wärme-Bilanz des Systems Sonne-Erde-Atmosphäre-Weltraum an der Erdoberfläche wie folgt darstellen:

$$(4) \quad Q + q + I \downarrow - (Q + q) \cdot a - I \uparrow = N \stackrel{N}{=} S + L + B,$$

mit Q - direkte Sonneneinstrahlung, q - diffuse kurzwellige Himmelsstrahlung, a - Albedokoeffizient, $I \uparrow$ - langwellige terrestrische Strahlung, $I \downarrow$ - Wärmerückstrahlung der Atmosphäre (Glashauseffekt). Infolge advektiver Zu- bzw. Abflüsse von Warm- oder Kaltluftmassen kann die Bilanz für lokale Gebiete unausgeglichen sein, d. h. N ist dann größer oder auch kleiner als die Summe der verschiedenen Wärmetransporte. Generell zeigen die für die Strahlungs-Wärme-Bilanz maßgeblichen Parameter bzw. Umweltbedingungen tages- und jahreszeitliche, lokale wie auch regionale Schwankungen (z. B. Abb. 6 und 7). Deshalb setzt eine zuverlässige Auswertung radiometrisch-spektraler Merkmale von Fernerkundungsdaten die möglichst genaue Kenntnis dieser verschiedenen Parameter und Bedingungen sowie die quantitative Modellierung und Korrektur ihres Einflusses auf die Daten voraus. Das erfordert neben (oft noch nicht vorhandener) guter Kenntnis der zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten einen erheblichen zusätzlichen Meß- und Rechenaufwand, der nicht immer realisierbar oder ökonomisch vertretbar ist.

Aerokosmische Fernbeobachtungen der Erdoberfläche im sichtbaren und infraroten Bereich des Spektrums setzen Wolkenfreiheit voraus. Viele Regionen weisen aber nach Abb. 6 zu allen Jahreszeiten mehr als 50 % durchschnittliche Bewölkung zur Tageszeit auf. Das schränkt Wiederholungsbeobachtungen und damit die Feststellung kurzzeitig veränderlicher Phänomene in diesen Spektralbereichen drastisch ein. Prinzipiell kann man nahezu wolkenfreie Bilder eines Gebietes auch durch Überlagerung mehrerer stärker bewölkter Aufnahmen der gleichen Szene synthetisieren. Allerdings ist eine spektrale Klassifizierung des Bildinhaltes dann erschwert, da sich die verschiedenen wolkenfreien Bildausschnitte auf unterschiedliche Zeitpunkte und damit unterschiedliche Wachstumsphasen der Vegetation, verschiedenen Sonnenstand etc. beziehen. Außerdem wird die spektrale Zusammensetzung des auf die Erdoberfläche einfallenden Lichtes durch Beugung, Streuung und Brechung an bzw. in den Wolken stark modifiziert.

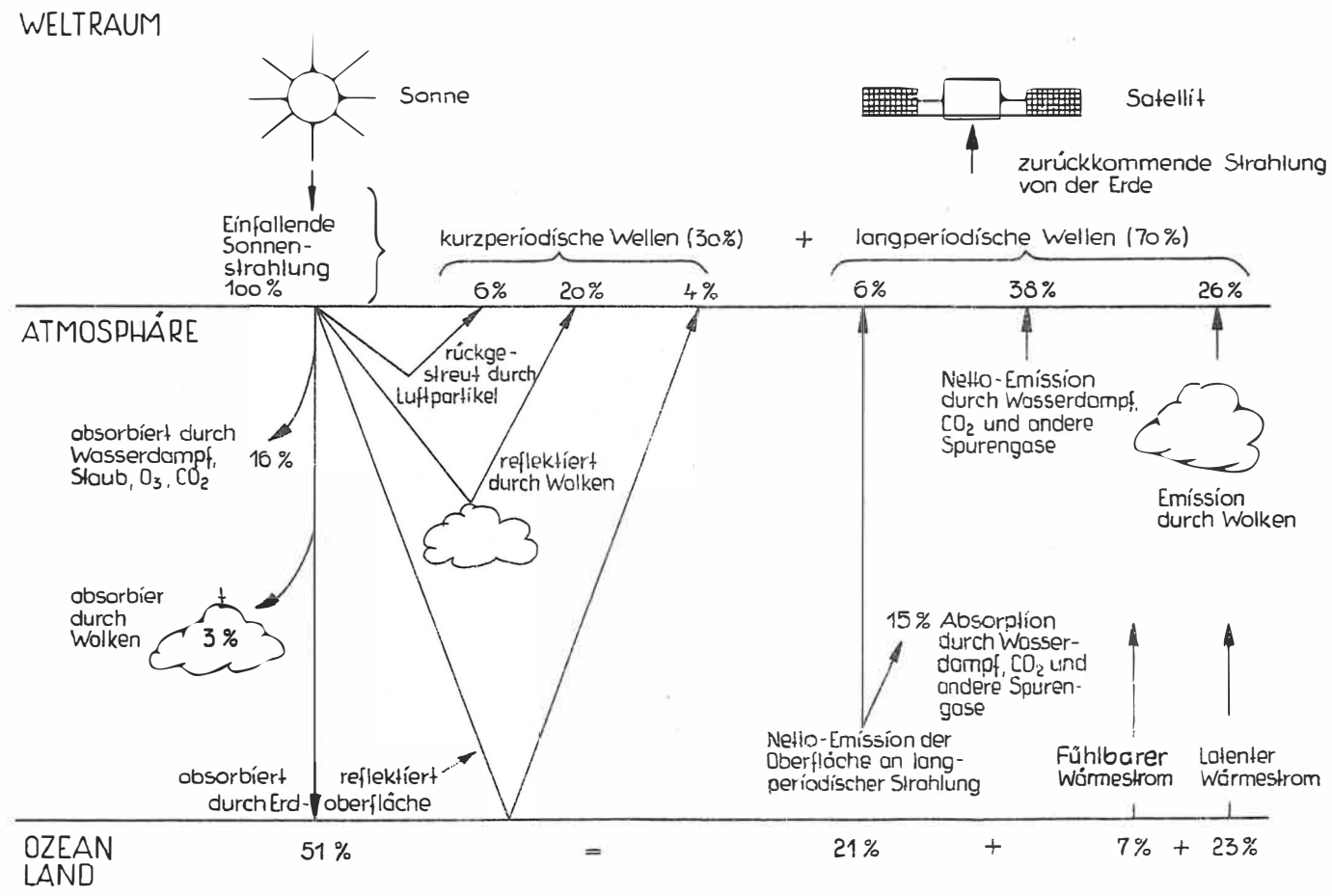


Abb. 5. Mittlerer Strahlungshaushalt der Erde (nach [23])

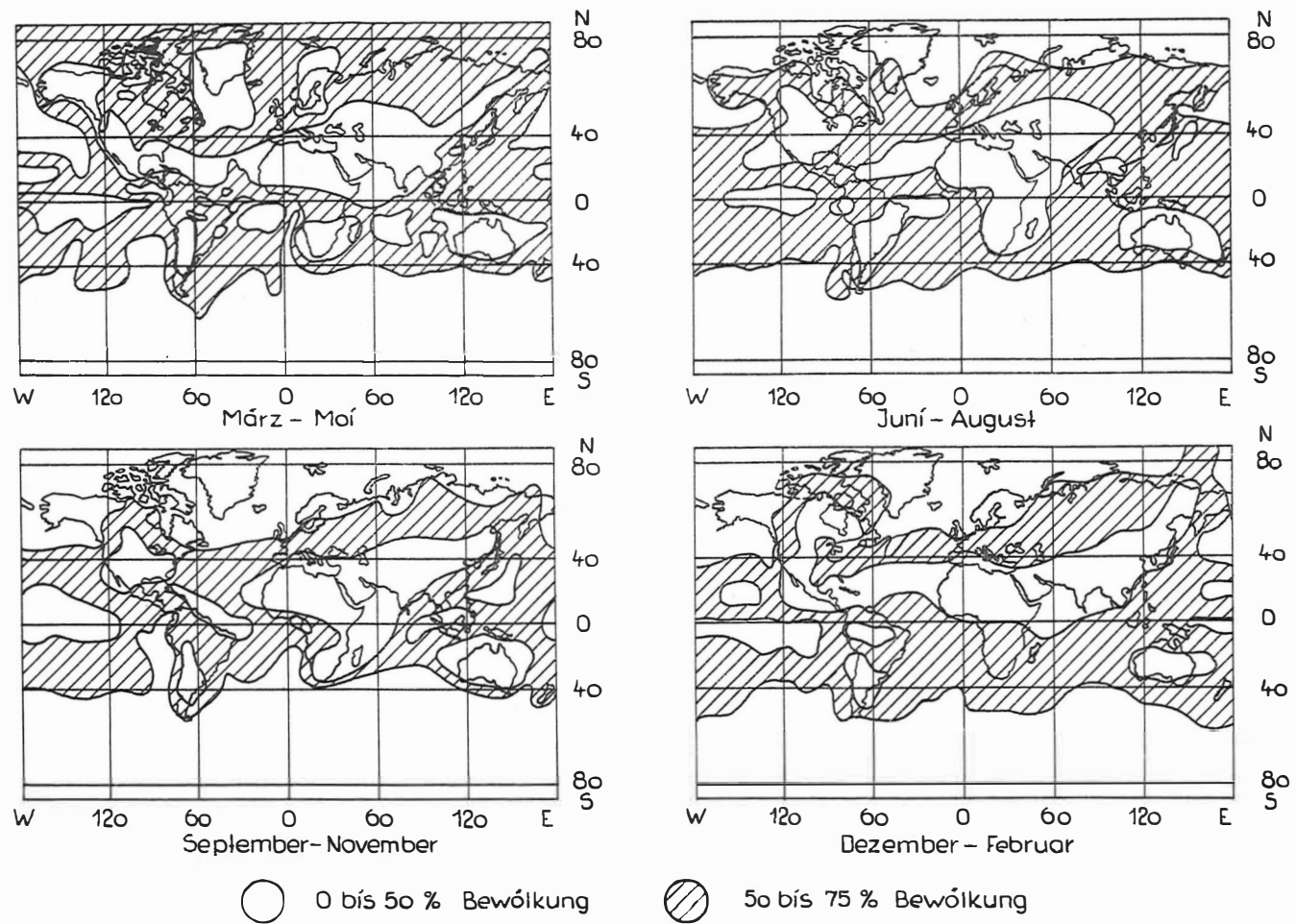


Abb. 6. Globale Verteilung der durchschnittlichen Bewölkung zur Tageszeit während verschiedener Jahreszeiten (nach FARROW [9])

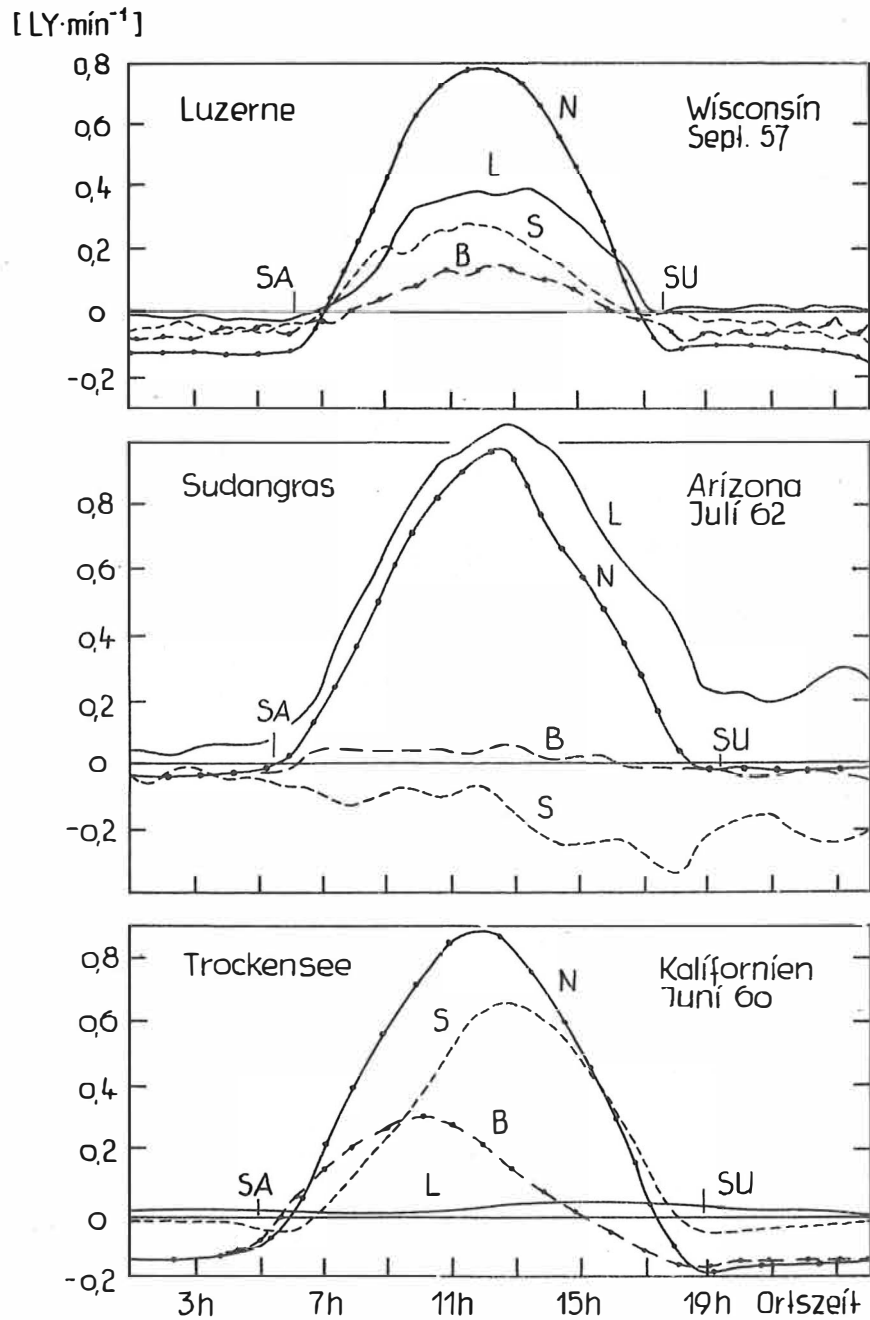


Abb. 7. Durchschnittliche Tagesvariationen der Komponenten der Oberflächenenergiebilanz über Vegetationsbedeckung bzw. nacktem Boden. SA - Sonnenaufgang, SU - Sonnenuntergang N - Nettostrahlung, L - latente Wärme, S - sensible Wärme, B - Bodenwärmefluß (nach SELLERS [19])

2.2. Zum Einfluß gasförmiger, flüssiger und fester Substanzen auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

2.2.1. Zur Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im sichtbaren und IR-Bereich des Spektrums

Die wichtigsten Einflüsse, denen elektromagnetische Wellen bei ihrer Ausbreitung in gasförmigen, flüssigen und festen Substanzen unterliegen, sind Absorption, Streuung, Reflexion, Beugung, Brechung und Änderung der Polarisierung. Diese Einflüsse hängen von der Art des wechselwirkenden Mediums sowie von der Wellenlänge und dem Einfallswinkel der Strahlung ab. Auf die Absorption des Sonnenlichts und der von der Erde emittierten thermischen Strahlung durch atmosphärische Gase und Wasserdampf war bereits in 2.1. hingewiesen worden. Sie ist für einige Wellenlängen im IR-Bereich besonders stark. Das ermöglicht mit gewissen Einschränkungen eine Bestimmung dieser Bestandteile. Die Absorption der IR-Strahlung ist in erster Linie das Ergebnis einer Resonanzwechselwirkung der Photonen mit den charakteristischen Schwingungs- und Rotationsmoden der Gasmoleküle. Während Wolken- und Nebelschichten die Fernbeobachtung der Erdoberfläche im sichtbaren Licht und im IR unmöglich machen, ist die wolkenfreie Atmosphäre für den gesamten Bereich des sichtbaren Spektrums und in einigen Fenstern im IR in ihrer ganzen Dicke durchsichtig. Dadurch wird die Fernbeobachtung aus großen Höhen überhaupt erst möglich. Die spektrale Transparenz der Atmosphäre hängt aber außer von der Absorption auch von der Streuung des Lichtes ab. Ihre Intensität wird vor allem vom Verhältnis der Wellenlänge der Strahlung zur Größe der streuenden Partikel bestimmt.

Neben den Gasmolekülen kommen als Streupartikel vor allem atmosphärische Aerosole in Betracht, d. h. Schwebeteilchen, die aus Wassertropfen, Staub, Rauch, Salz u. ä. zusammengesetzt sind und Durchmesser zwischen etwa 10 nm und 1 mm aufweisen. Bei Partikeldurchmessern $D \ll \lambda$, d. h. für Moleküle und feine Aerosole, dominiert die RAYLEIGH-Streuung, deren Intensität $I \sim \lambda^{-4}$ ist. Sie ist für blaues Licht mit $\lambda = 0,42 \mu\text{m}$ etwa 10 mal so groß wie für rotes Licht ($\lambda = 0,72 \mu\text{m}$) und etwa 100 mal so groß wie für nahes IR mit $\lambda = 1,2 \mu\text{m}$. Für Partikeldurchmesser $D \approx \lambda$ dominiert die MIE-Streuung, die neben einer sehr starken Bevorzugung der Vorwärts- und Rückwärtsstreuung eine entgegengesetzte λ -Abhängigkeit zeigt (s. Abb. 9). Bei $D \gg \lambda$ ist die Streuung geometrisch und nicht sehr selektiv. Das gilt z. B. für die Streuung an Wassertropfen, für die Durchmesser zwischen $1 \mu\text{m} < D < 30 \mu\text{m}$ mit einer Häufung bei $D \approx 5 \mu\text{m}$ typisch sind [32].

Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Wasser ist wesentlich schlechter als in der Luft. Licht im sichtbaren und nahen IR-Bereich wird bereits innerhalb der ersten 2 m einer Wasserschicht zum größten Teil absorbiert. Wellenlängen um $\lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$ können in klarem Wasser tiefer als 20 m eindringen, während Wellenlängen um $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$ bereits in ca. 20 cm Wassertiefe praktisch vollständig absorbiert sind (s. Abb. 8). Für Wellenlängen zwischen $2,5 \mu\text{m} < \lambda < 9 \mu\text{m}$ werden für die optische Tiefe im Wasser in der Literatur sogar nur noch Werte zwischen $1 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$ angegeben [33]. Dementsprechend beziehen sich auch die aus Messungen der Wärmestrahlung über Wasserkörpern abgeleiteten Temperaturen nur auf deren unmittelbare Oberfläche.

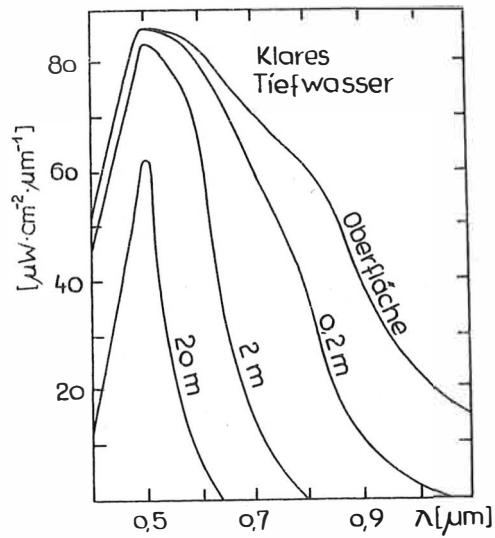


Abb. 8. Veränderung der spektralen Energiedichte des einfallenden Lichts beim Eindringen in klares tiefes Wasser in Abhängigkeit von der Wellenlänge (nach MOORE [13])

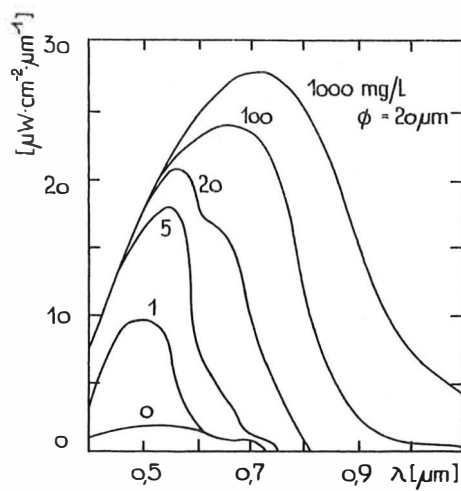


Abb. 9. Spektrale Energiedichte des rückgestreuten Lichts in Abhängigkeit von der Schwebstoffkonzentration im Wasser (berechnet für Partikeldurchmesser von $20 \mu\text{m}$ (nach MOORE [13]))

Auch für Wellenlängen $\lambda < 0,5 \mu\text{m}$ nimmt die Absorption im Wasser rapide zu. Nur 1 bis 3 % der Sonnenenergie, die durch die Oberfläche eines unbegrenzt tiefen klaren Wasserkörpers tritt, wird zur Oberfläche zurückgestreut (vorwiegend im Wellenlängenbereich zwischen $0,5 \mu\text{m} < \lambda < 0,7 \mu\text{m}$). 50 % des zurückgestreuten roten Lichts stammen dabei aus dem obersten Meter, 50 % des grünen Lichts aus den obersten 6 m und 50 % des blauen Lichts aus den obersten 15 m eines klaren Wasserkörpers [13].

Diese Charakteristiken für klares Wasser werden wesentlich modifiziert durch Verunreinigungen. Während Lösungen allgemein die Reflexion bzw. Rückstreuung des Wassers weiter erniedrigen, erhöht sich die Intensität des zurückgestreuten Lichts deutlich mit der Konzentration von Schwebstoffen sowohl in fester als auch in kolloidaler Form. Abb. 9 zeigt die zurückgestreute Energie in Abhängigkeit von λ und der Schwebstoffkonzentration von Tonschlamm. Während für niedrige und mittlere Konzentrationen die Kurvenform vor allem durch die Absorptionscharakteristik des Wassers bestimmt wird, sind für hohe Konzentrationen die Absorptionseigenschaften der Schwebstoffteilchen ausschlaggebend. Auch die Teilchengröße hat entscheidenden Einfluß auf die Größe der zurückgestreuten Energie. Wenige Milligramm pro Liter feiner Tonpartikel erzeugen beispielsweise die gleiche Rückstreuung von Licht wie einige tausend Milligramm pro Liter Sandteilchen [13]. Die quantitative Bestimmung von Wasserqualitätsfaktoren anhand spektraler Charakteristiken des zurückgestreuten Lichtes bereitet deshalb erhebliche Schwierigkeiten.

Als ein weiteres Merkmal zur Untersuchung von Wasser- und Luftverunreinigungen eignet sich die Polarisation des Lichtes. Sie hängt außer vom Beobachtungswinkel stark vom Schwebstoff- bzw. Aerosolgehalt ab. Generell verringert sich der Grad der Polarisation mit zunehmender Konzentration der Schweb- bzw. Aerosolpartikel infolge multipler Reflexionen an den Teilchen. Eine Zusammenstellung gefundener Gesetzmäßigkeiten findet sich in [16] und [24]. Anwendungen in der Satellitenfernerkundung befinden sich noch im experimentellen Stadium. Nach [47] soll ein sechskanaliges Multispektralarimeter Anfang der 80er Jahre an Bord der NASA-Weltraumfähre (Space Shuttle) zur Bestimmung des Eis- und Wassergehaltes in Wolken und möglicherweise auch für Messungen des atmosphärischen Aerosolgehalts und Kartierungen der Bodenfeuchtigkeit eingesetzt werden.

Während Mikrowellen (s. 2.2.2.) auch in undurchsichtige Körper in günstigen Fällen viele Meter bis zu mehreren 100 m tief eindringen können, ist die entsprechende Eindringtiefe des sichtbaren und nahen IR-Lichtes generell verschwindend klein (nm- bis mm-Bruchteile). Daraus folgt, daß sich Aussagen über Eigenschaften undurchsichtiger Körper anhand der beobachteten Spektralintensitäten in diesem Bereich des Spektrums nur auf die unmittelbare Oberfläche der Objekte beziehen. Aussagen über tieferliegende Bereiche sind nicht direkt möglich. Sie können nur mit sehr unterschiedlicher Sicherheit aus empirischen Korrelationsbeziehungen zwischen Oberflächenerscheinungen und tieferliegenden Eigenschaften unter Zuhilfenahme von Zusatzinformationen und komplexen Erfahrungen gefolgert werden.

Trotz dieser Schwierigkeiten ist die Identifizierung von Objekten auf Grund ihres unterschiedlichen spektralen Reflexionsvermögens im sichtbaren und nahen IR-Bereich des Lichts das am meisten angewandte Fernerkundungsverfahren. Teilweise markante Unterschiede der Reflexions- bzw. Absorptionseigenschaften einiger Klassen von Objekten machen eine

Grobklassifizierung (z. B. nach Wasser, Vegetation und nacktem Boden) recht einfach (s. Abb. 10). Andererseits sind die Variationen innerhalb dieser groben Klassen und damit die Überlappungsbereiche so beträchtlich, daß eine detaillierte Klassifizierung von Objekten anhand von Fernerkundungsdaten in der Regel auf beträchtliche Schwierigkeiten stößt und ohne die Einbeziehung unabhängiger Bodeninformationen (engl.: "ground truth") praktisch unmöglich ist.

Faktoren, die die Spektralcharakteristiken für Vegetation beeinflussen, sind beispielsweise die vom Pflanzentyp abhängige Blattstruktur (Abb. 11), das erreichte Wachstums- bzw. Reifestadium der Pflanzen (Abb. 12), die Blattdichte, -form und -orientierung, der Feuchtigkeits-, Dünger- und/oder Metallspurengehalt des Bodens (Abb. 13), der Sonnenstand und Beobachtungswinkel (Abb. 14 und 15), die Beobachtungshöhe (Abb. 16 und 17) sowie die z. Z. der Beobachtungen herrschenden atmosphärischen Sichtbedingungen (Abb. 18).

Abb. 16 demonstriert überzeugend, daß im Laboratorium gemessene Reflexionsspektren von Pflanzenblättern keine gute Vorhersage des Reflexionsverhaltens der entsprechenden Pflanzenkultur unter natürlichen Bedingungen gestatten. Das gilt insbesondere für den nahen IR-Anteil, der wesentlich abgeschwächt wird. Hauptursache sind die Streuverluste infolge Mehrfachreflexionen zwischen den Blättern des Blattbaldachins bzw. mehrerer Blattstockwerke. Sie nehmen mit höherem Sonnenstand und zunehmender Irregularität der Blattoberflächen und ihrer räumlichen Orientierung zu. Demgegenüber zeigt Abb. 17 deutlich den Einfluß der Atmosphäre auf die Verzerrung des Spektralsignals von chlorophyllem bzw. chlorophyllreichem Wasser. Der Effekt ist am größten im Bereich kurzer Wellenlängen. Er führt dazu, daß mit zunehmender Höhe die Unterscheidbarkeit der beiden verschiedenen Spektralkurven immer geringer (Kontrastabschwächung) und damit die Feststellung beispielsweise von Planktonkonzentrationen im Meerwasser von hochfliegenden Fernerkundungsplattformen aus immer schwieriger wird.

Auch die Auswertung von Fernerkundungsdaten im thermischen IR wirft z. T. komplizierte Interpretationsprobleme auf, deren Lösung die Nutzung unabhängiger Bodeninformationen erfordert. Einerseits stellen der starke Einfluß der Bodenfeuchte auf die scheinbare Strahlungstemperatur der Böden (Evapotranspirations-Abkühlung) bzw. die erheblichen Unterschiede in der thermischen Trägheit von Objekten der Erdoberfläche für die Fernerkundung attraktive Effekte dar, andererseits können sie durch die Komplexität der natürlichen Verhältnisse (z. B. Einflüsse des Wetters, der Morphologie, der Vegetationsbedeckung, der Kaltluftdrainage und der Bodenfeuchte) erheblich maskiert und verzerrt werden. Das erschwert die Trennung und richtige Deutung der verschiedenen Effekte.

2.2.2. Zur Ausbreitung von Mikrowellen

Während Wolken und Nebel für sichtbare und infrarote Wellenstrahlung auf Grund der starken Streuung und Absorption praktisch undurchsichtig sind, sind sie für Mikrowellen im cm- und dm-Bereich weitgehend transparent. Mikrowellen eignen sich somit für die Allwetter-Fernerkundung. Allerdings kann die Dämpfung im Falle starker Regengüsse für hochfrequente Mikrowellen erheblich sein (Abb. 19 und 20).

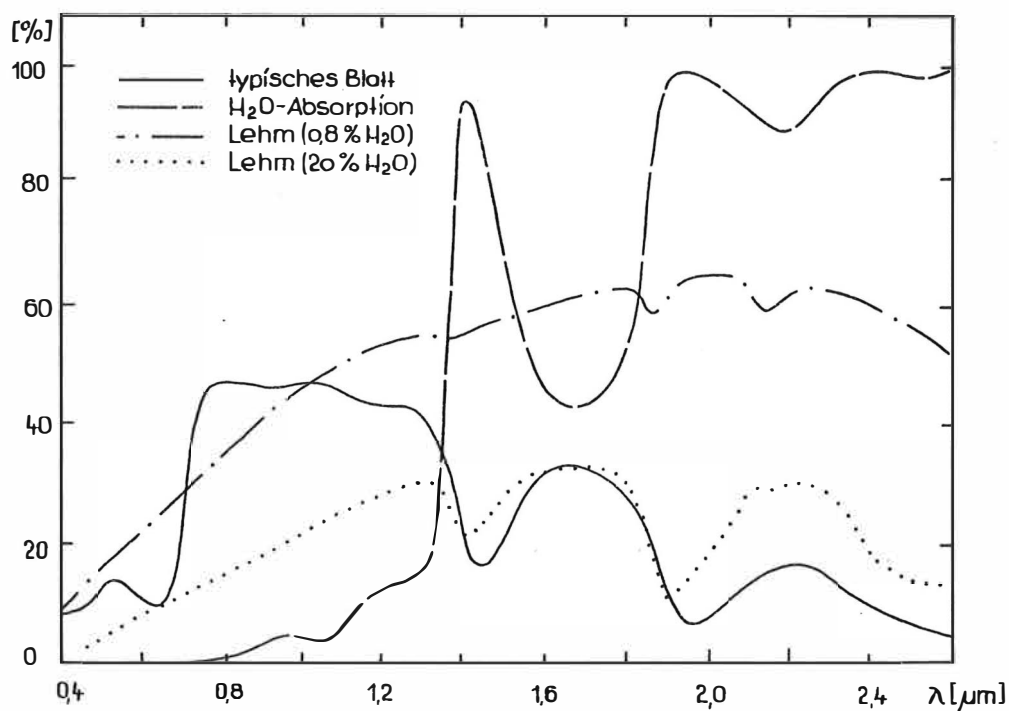


Abb. 10. Spektrales Reflexionsvermögen eines typischen grünen Blattes bzw. von Lehmboden unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehaltes sowie spektrales Absorptionsvermögen von Wasser (umgezeichnet nach BOWERS und HANKS [25] und SAVIGEAR u. a. [17])

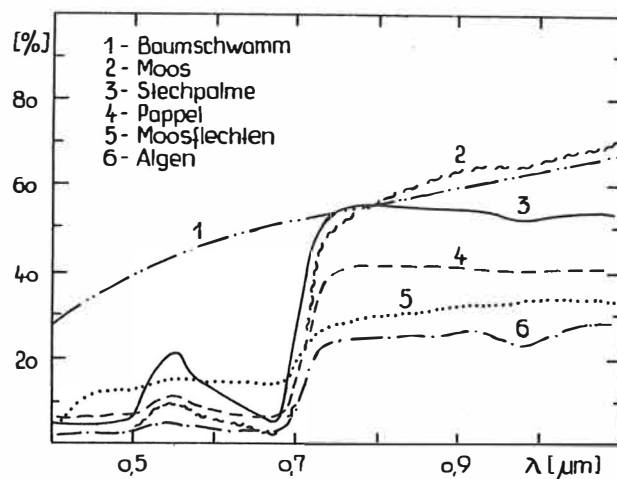


Abb. 11. Spektrales Reflexionsvermögen verschiedener Pflanzenarten (nach GATES [26])

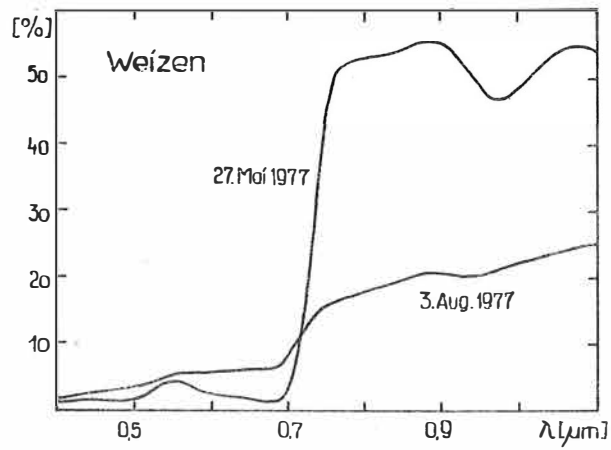


Abb. 12. Spektrales Reflexionsvermögen von Weizen unterschiedlichen Reifegrades (nach FISCHER [27])

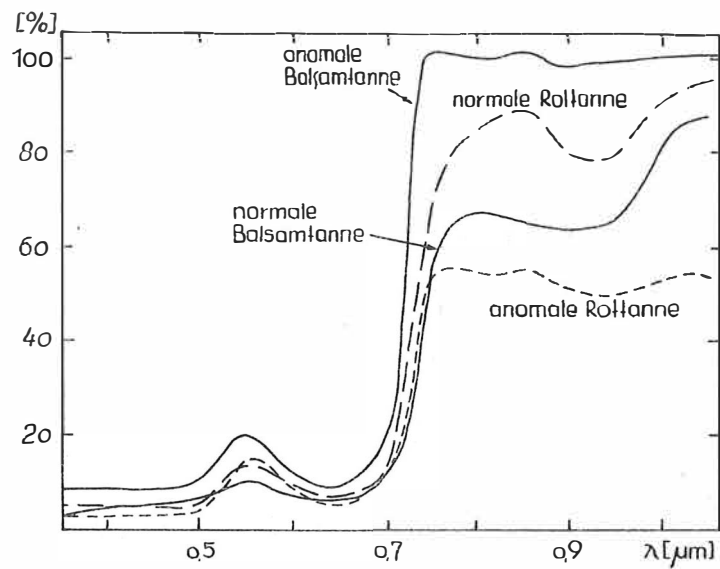


Abb. 13. Einfluß anomaler Metallspurengehalte im Boden (Kupfer und Molybdän) auf das mittlere spektrale Reflexionsvermögen von Balsam- und Rottanne (nach YOST und WENDEROTH [28])

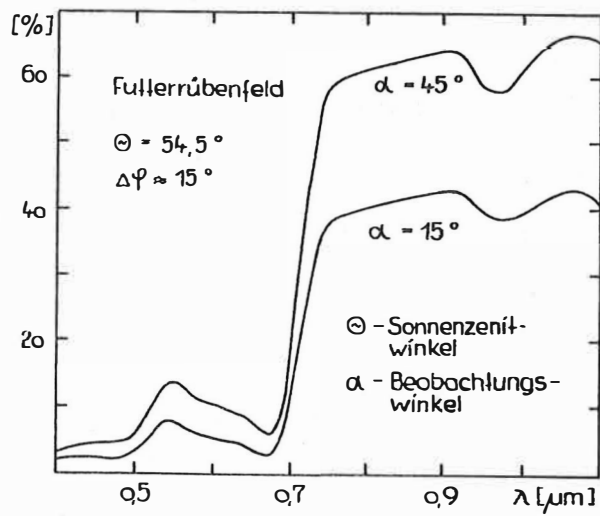


Abb. 14. Abhängigkeit des spektralen Reflexionsvermögens vom Beobachtungswinkel (nach FISCHER [27])

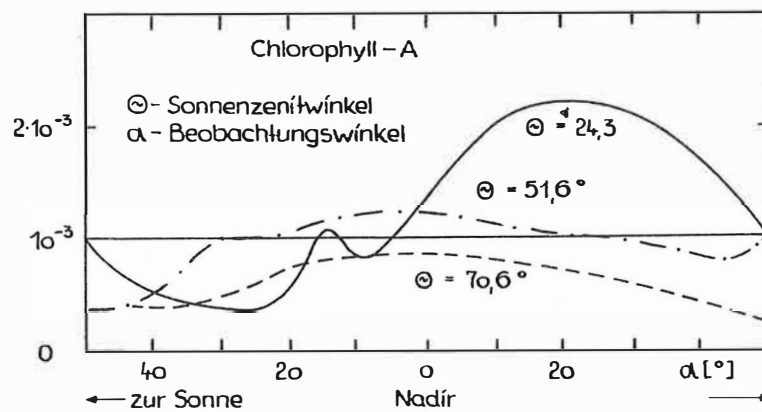


Abb. 15. Abhängigkeit des scheinbaren Kontrastes von Chlorophyll-A im Meerwasser vom Beobachtungswinkel α und Sonnenzenitwinkel Θ . Randbedingungen: Beobachtung vom Weltraum aus im grünen Licht ($\lambda = 560 \text{ nm}$); Chlorophyllkonzentration - $0,30 \text{ mg/m}^3$; klarer Tag; Windgeschwindigkeit - 18 km/h (nach DUNTLEY [29])

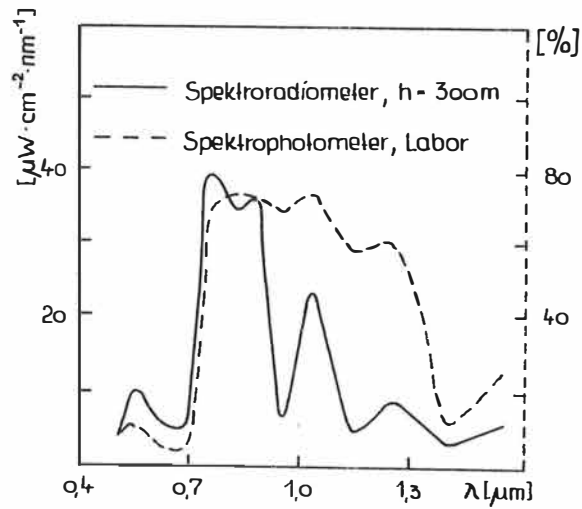


Abb. 16. Spektrale Energiedichte der reflektierten Strahlung über einem Baumwollfeld ($h = 300 \text{ m}$, gemessen mit einem Spektroradiometer) und spektrales Reflexionsvermögen eines Baumwollblatts (Labormessung mit einem Spektrophotometer) (nach MYERS [30])

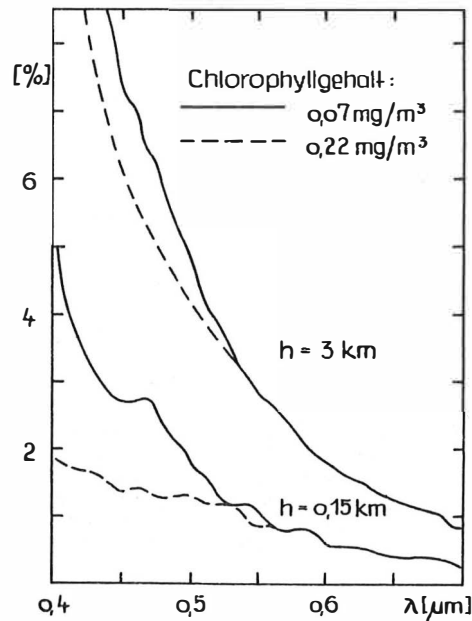


Abb. 17. Spektrales Reflexionsvermögen von chlorophyllreichen und chlorophyllarmen Meeresgebieten, beobachtet aus verschiedener Höhe (nach CLARKE u. a. [31])

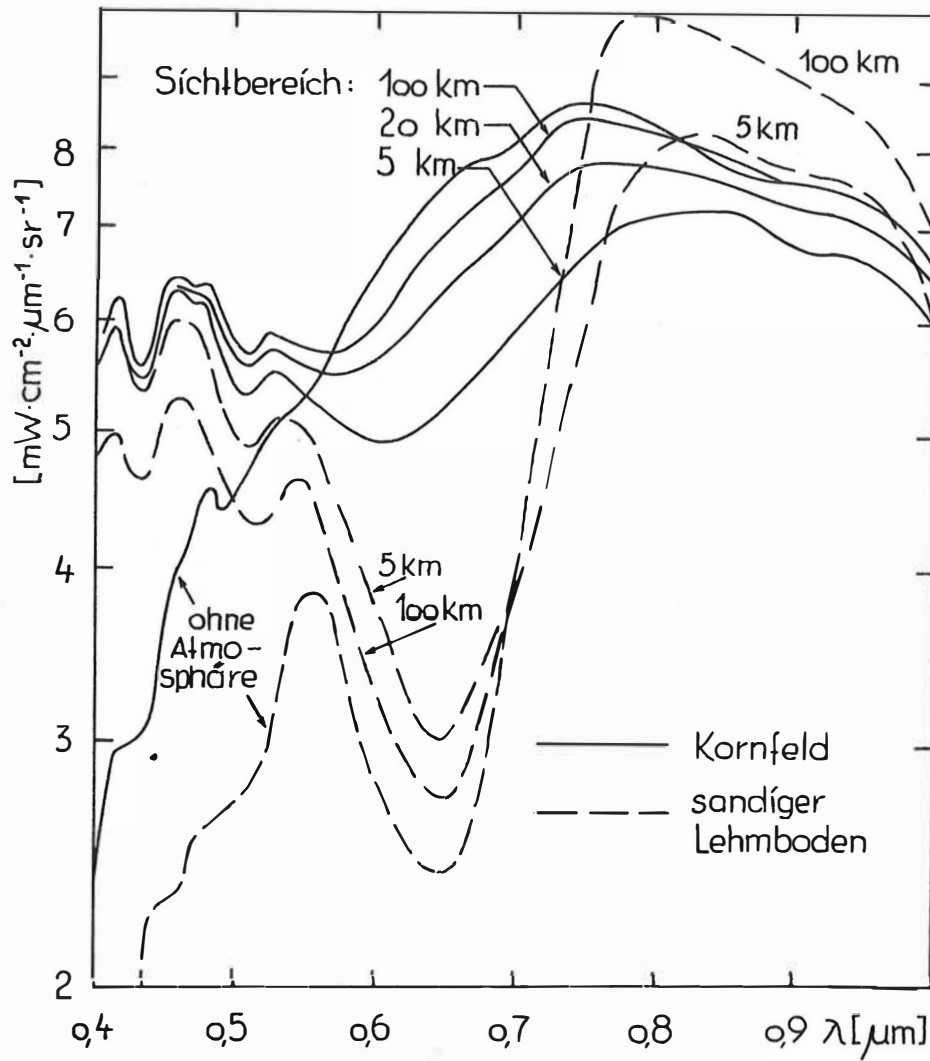


Abb. 18. Spektraler Energiefluß der von einem Kornfeld bzw. von einem sandigen Lehm Boden reflektierten Strahlung bei Beobachtung aus dem Weltraum für unterschiedliche atmosphärische Sichtbedingungen (zusammengestellt nach FARROW [9])

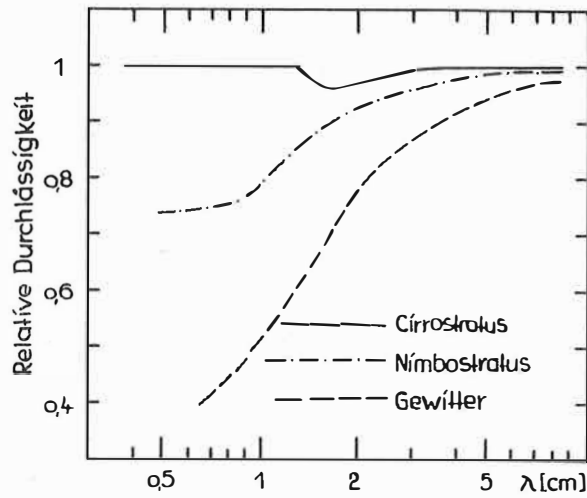


Abb. 19. Relative Durchlässigkeit der Atmosphäre mit Wolken im Vergleich zur wolkenfreien Atmosphäre (nach FARROW [9])

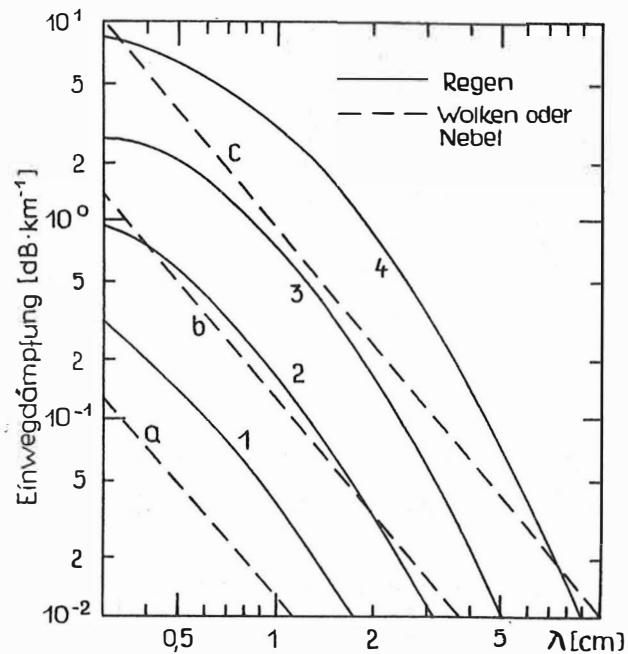


Abb. 20. Einwegdämpfung von Mikrowellen beim Durchgang durch die Atmosphäre in Abhängigkeit von der Regenintensität (1 - 0,25 mm/h, 2 - 1 mm/h, 3 - 4 mm/h, 4 - 16 mm/h) und bei Anwesenheit von Nebel bzw. Wolken (Sichtweite a - ca. 600 m, b - ca. 130 m, c - ca. 30 m) (nach FARROW [9])

Die für das Emissionsvermögen wie auch die Eindringtiefe (Skintiefe) von Mikrowellen entscheidende Materialeigenschaft ist die komplexe Dielektrizitätskonstante. Ihr frequenzabhängiger Imaginärteil hängt von der elektrischen Leitfähigkeit des Materials ab. Ist diese Null, dann ist das Material für Mikrowellen transparent, d. h. sie breiten sich in ihm ohne Wirbelstromverluste aus. Sind sowohl der Realteil als auch der Imaginärteil groß, dann hat das Material metallische Eigenschaften und wirkt als Reflektor. Da bereits geringe Mengen Wasser in Böden und Gesteinen deren Leitfähigkeit drastisch ändern, ist der Nachweis von Feuchtigkeit die wohl bedeutsamste potentielle Anwendung von Mikrowellen für die Fernerkundung.

Die Eindringtiefe von Mikrowellen in Wasser ist im cm- und dm-Bereich noch wesentlich geringer als die des sichtbaren Lichts (< 1 dm), dagegen recht beträchtlich für Eis. Sie entspricht für Eis etwa der Skintiefe für trockene und sehr trockene Böden (ca. 1 bis 100 m), während die Eindringtiefe in sehr feuchte Böden etwa mit der in Süßwasser vergleichbar ist (ca. 1 mm bis 10 cm) (vgl. Abb. 21 und 22).

Für größere Wellenlängen zeigt die Eindringtiefe in Wasser einen deutlichen Unterschied zwischen Salz- und Süßwasser. Gelöstes Salz erhöht die elektrische Leitfähigkeit des Wassers und damit den Skineffekt. Steigender Salzgehalt führt deshalb auch zu einer Erniedrigung von ϵ und damit zu einer Abnahme der scheinbaren Strahlungstemperatur T_s . Bei einem Salzgehalt von 3,5 % liegt sie für $f = 1,42$ GHz ($\lambda = 21$ cm) nach [18] um 20 K niedriger als für Süßwasser. Diese starke Abhängigkeit gestattet die Nutzung von Mikrowellen für Salzgehaltsbestimmungen, vorausgesetzt, daß der Einfluß anderer Faktoren auf T_s (z. B. die Rauigkeit der Wasseroberfläche) erfaßt und korrigiert werden kann.

Den kombinierten Effekt der Oberflächenrauigkeit und der Bodenfeuchtigkeit auf die Intensität der natürlichen Mikrowellenstrahlung und der daraus abgeleiteten scheinbaren Strahlungstemperatur T_s zeigt Abb. 23. Generell erniedrigt sich T_s bei erhöhtem Feuchtigkeitsgehalt. Andererseits erhöht sie sich durch Mehrfachstreuung an Oberflächenunebenheiten, falls deren Undulationen größer als λ sind. Demzufolge liegen die T_s -Werte für (bezogen auf λ) "rauhe" Oberflächen über denen vergleichbar "glatter" Oberflächen mit gleichem Feuchtigkeitsgehalt. In Abb. 23 fällt auf, daß für das rauhe, gepflügte Feld T_s im Falle der vertikalpolarisierten Welle praktisch keine Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel α (Nadirwinkel) zeigt (LAMBERTsche Oberflächen), wohl aber für das geeegte Feld. Letzteres zeigt zudem eine wesentlich markantere Aufspaltung der beiden Kurvenverläufe für vertikal- und horizontalpolarisierte Wellen.

Abb. 24 ist ein eindrucksvolles Beispiel für die ausgezeichnete Unterscheidbarkeit einer Reihe von Objekten sowohl hinsichtlich des Niveaus als auch des qualitativ unterschiedlichen Verlaufs der T_s -Kurven für vertikal- und horizontalpolarisierte Mikrowellen ($\lambda = 1,5$ cm) in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel. Dennoch muß in Übereinstimmung mit SCHANDA u.a. [20] zusammenfassend eingeschätzt werden, daß weder der Umfang noch die Genauigkeit der bisher zur Verfügung stehenden statistischen Daten ausreichen, um die verschiedenen unter natürlichen Verhältnissen bestimmenden Einflußfaktoren wie Boden- und Vegetationstyp, Feuchtigkeit und Rauigkeit sauber trennen zu können. Bereits die Schwierigkeit repräsentativer Probenahmen und genauer Bestimmungen des Feuchtigkeitsgehalts durch Labor- oder Feldmessungen stellt in diesem Zusammenhang ein ernstes Problem dar. Auch gibt es bisher keine brauchbare Theorie zur Interpretation des Strahlungsverhaltens realer heterogener Medien mit rauhen Oberflächen.

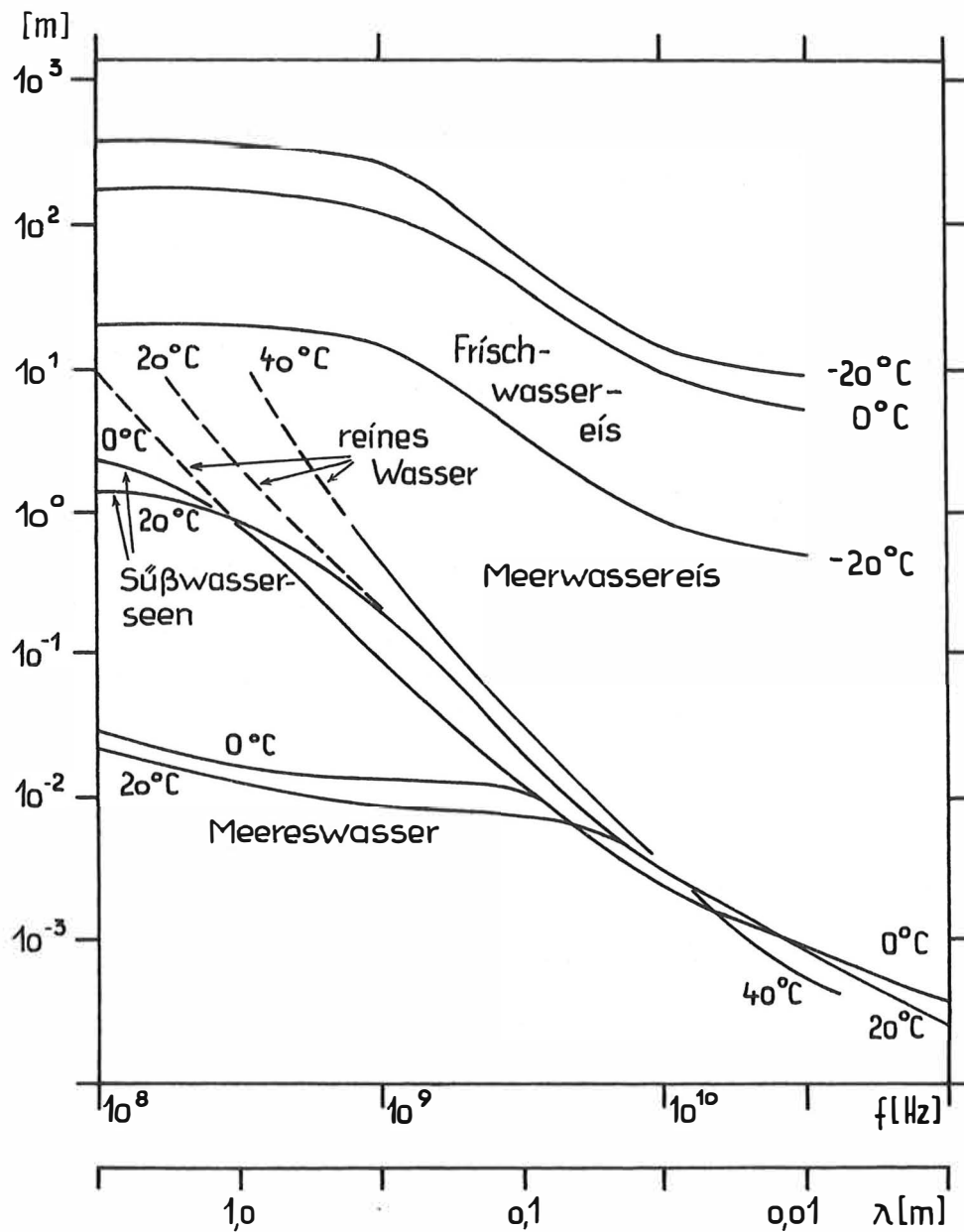


Abb. 21. Eindringtiefe von Mikrowellen in Wasser und Eis in Abhängigkeit von der Wellenlänge, berechnet nach Messungen der Dielektrizitätskonstante (nach DEANE und DOMVILLE [12])

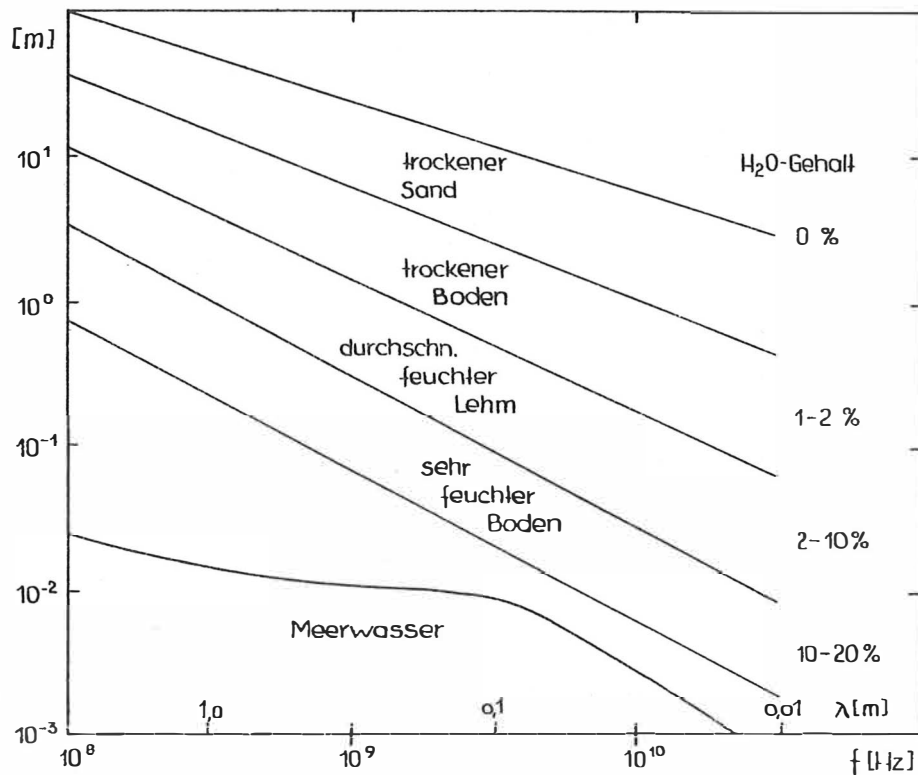


Abb. 22. Berechnete Eindringtiefe von Mikrowellen in Böden (nach DEANE und DOMVILLE [12])

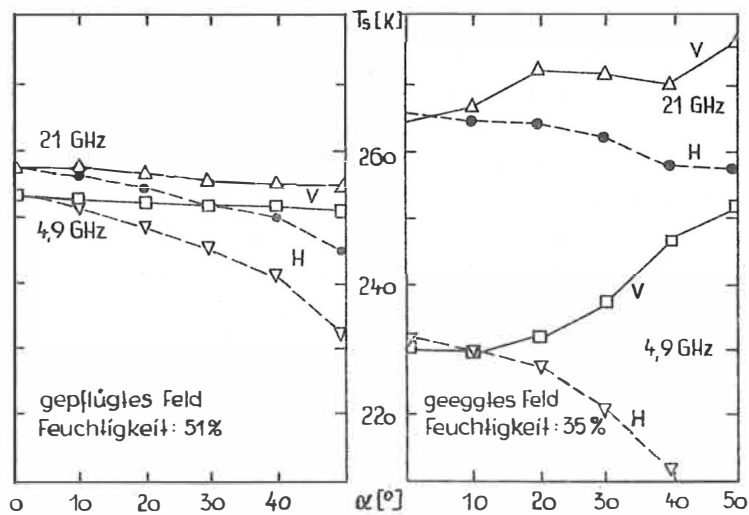


Abb. 23. Abhängigkeit der über verschiedenen Feldern gemessenen radiometrischen Temperaturen T_s vom Beobachtungswinkel (Nadirwinkel) α , der Bodenfeuchtigkeit, der Bodenrauhigkeit sowie der Frequenz und Polarisation der Mikrowellen (nach SCHANDA u. a. [20])

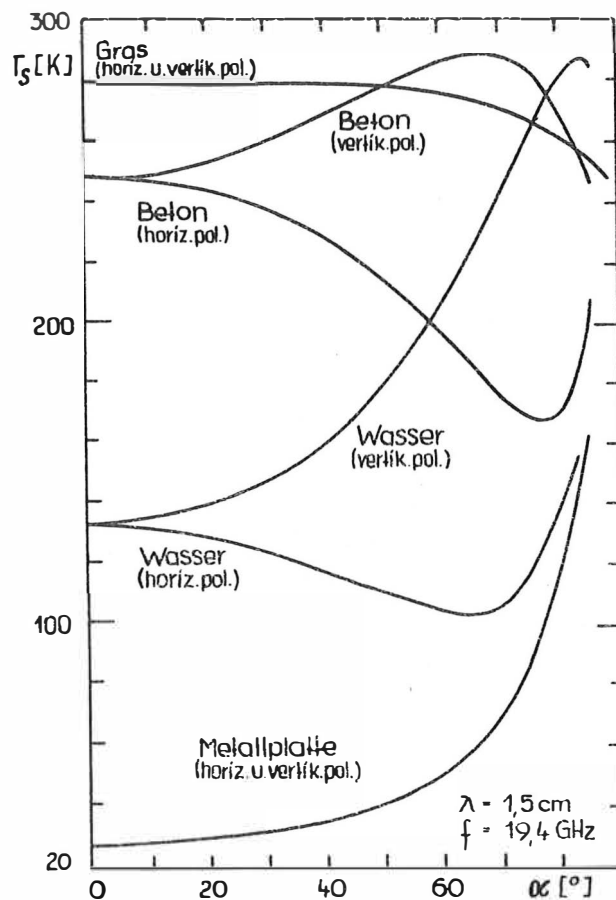


Abb. 24. Radiometrische Temperaturen T_s verschiedener Objekte in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel (Nadirwinkel) α und der Polarisation der Mikrowellen (nach FARROW [9])

Nicht geringer sind die Schwierigkeiten der Interpretation von Radarechos bei Verwendung aktiver Sensoren. Ihre Intensität hängt außer von den geometrischen und elektrischen Eigenschaften der Objekte ebenfalls in komplizierter Weise von λ , dem Polarisationswinkel sowie dem Beobachtungs- bzw. Beleuchtungswinkel ab. Sie enthalten neben Anteilen spiegelnder Reflexion ebenfalls diffuse Anteile, die bei natürlichen Oberflächen meist überwiegen. Die diffusen Anteile entstehen sowohl durch Streuung und multiple Reflexionen an Rauigkeiten und Welligkeiten der Oberfläche als auch durch Streuung an Dielektrizitätsinhomogenitäten im Bereich der Skintiefe (Volumenstreuung). Diese Effekte sind zugleich die wichtigsten Mechanismen zur Entpolarisierung der Radarsignale.

Die o. g. Beispiele sollten die naturwissenschaftlichen Grundlagen, Potenzen, Erfordernisse und Grenzen der Fernerkundung verständlich machen. Im folgenden sollen zunächst die wesentlichen Charakteristika von Fernerkundungsdaten besprochen und schließlich die Methoden und Techniken dargestellt werden, mit denen man diese Daten gewinnt, aufzeichnet, vorverarbeitet und an die Nutzer weiterleitet.

3. Technische Grundlagen sowie Stand und Entwicklungstendenzen der Fernerkundung

3.1. Fernerkundungssensoren

3.1.1. Generelle Bemerkungen zum Auflösungsvermögen von Fernerkundungssensoren

Aus obigen Darlegungen zum Reflexions- und Emissionsverhalten irdischer Objekte und Substanzen wird deutlich, daß ihre Identifizierung anhand spektraler Charakteristika in der Regel nur dann möglich ist, wenn diese über einen großen Wellenlängenbereich mit hoher spektraler (Wellenlängen-) und radiometrischer (Intensitäts-) Auflösung gewonnen werden. Bei breitbandigen Aufnahmecharakteristiken der Sensoren, die die einfallende Strahlungsenergie über einen großen Wellenlängenbereich integrieren, würden sich viele der oft auf schmale Bänder beschränkten typischen spektralen Merkmalsunterschiede der Objekte herausmitteln. Dies umso mehr, je geringer das radiometrische Auflösungsvermögen des Sensors ist. Andererseits werden die Vorteile hohen spektralen und radiometrischen Auflösungsvermögens nur dann voll wirksam, wenn das räumliche Auflösungsvermögen des Sensors gut genug ist, um die zu untersuchenden Objekte auch noch getrennt erfassen zu können. Anderenfalls entstehen gemischte spektrale Signaturen, die die Interpretation der Fernerkundungsaufnahmen zusätzlich erschweren (Abb. 25). Zwar können sich bei

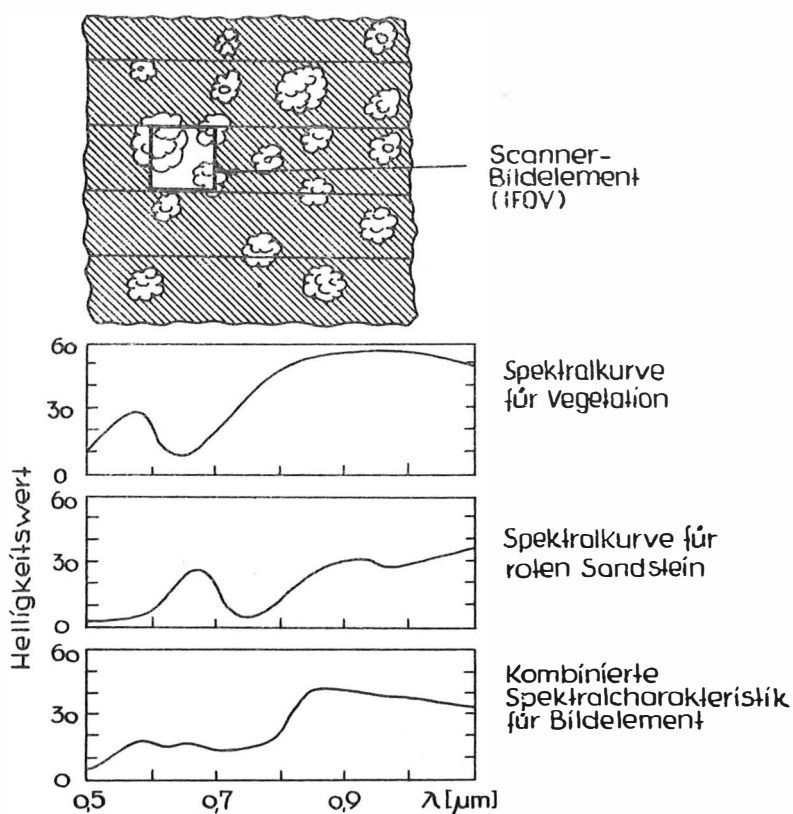


Abb. 25. Integration der spektralen Reaktion des Sensors innerhalb des unmittelbaren Blickfelds (IFOV) eines multispektralen Scanners. Der Dynamikbereich des Sensors ist in 64 Helligkeitsniveaus unterteilt (nach TARANIK [43])

bestimmten geomorphologischen, pedologischen, Bodenfeuchte- und Klimabedingungen typische Boden-Vegetations-Assoziationen herausbilden, die von einem gegebenen Sensortyp als typische spektrale Mischsignaturen aufgezeichnet werden, doch erfordert ihre richtige Klassifizierung unabhängige Zusatzinformationen über die tatsächlichen Bedingungen am Boden (überwachte Klassifizierung, engl.: supervised classification). Objektdetails wie Form, Struktur und Textur sind oft die sichersten Erkennungsmerkmale. Deshalb ist der Wunsch nach möglichst hoher Detailauflösung von Fernerkundungsdaten verständlich, doch kann er nur im Kompromiß mit den anderen Anforderungen und im Rahmen prinzipieller wissenschaftlich-technischer und oft auch ökonomischer Randbedingungen realisiert werden. Da diese Anforderungen stark von der Aufgabenstellung abhängen, gibt es keinen optimalen Universalsensor bzw. Sensorkomplex für Fernerkundungsbeobachtungen.

In den letzten Jahren hat sich zur komplexeren Beschreibung des Sensorsystems die Nutzung der in der Nachrichtentechnik angewandten Übertragungstheorie bewährt. Dabei macht man sich zunutze, daß die Beschreibung der Übertragungscharakteristiken der verschiedenen Teilkomponenten eines Sensorsystems mit Hilfe von Modulationsübertragungsfunktionen möglich ist, die bei Einhaltung bestimmter Voraussetzungen (Inkohärenz der Signale, Linearität der Übertragungscharakteristiken, Isoplanasiekriterium) multiplikativ verknüpft werden können. Unter Modulation wird die Intensitätsvariation des Signals verstanden. Die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) beschreibt die Reduzierung der Intensitätsvariationen des Objektsignals im Zuge seiner Ausbreitung und Registrierung. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis der Modulation des Objektbildes M_1 zur ursprünglichen Objektmodulation M_0 . Die wichtigsten Eigenschaften der MTF sind die Kontrastabschwächung infolge endlicher Wellenlänge der Strahlung (λ -abhängige Beugung, Streuung an atmosphärischen Partikeln), nicht idealer Abbildungseigenschaften der Sensoroptik, endlicher Auffangfläche der Strahlungsdetektorelemente, Luftmassenturbulenz etc. Die MTF nimmt mit der Ortsfrequenz k der Merkmalskontraste ab. Sie wirkt als ein Tiefpaßfilter, d. h. je kleiner die Objekte bzw. Objektabstände, um so stärker wird der von λ abhängige spektrale Kontrast der Objekte gegen ihre Umgebung durch das System Atmosphäre-Sensor reduziert und damit die Objekterkennbarkeit erschwert. Das zur Beschreibung optischer Systeme übliche, vom Objektkontrast abhängige fotografische Auflösungsvermögen entspricht nur einem Punkt der MTF und berücksichtigt nicht die ganze Komplexität des Übertragungsvorgangs.

Aus dem Gesagten wird klar, daß das tatsächlich erreichbare geometrische Auflösungsvermögen keine feststehende sensorinhärente Größe ist. Vielmehr hängt es außer von den geometrischen Abbildungseigenschaften des Sensors auch von den atmosphärischen Bedingungen, vom spektralen Objektkontrast und damit auch vom radiometrischen und spektralen Auflösungsvermögen des Sensors ab. Das Prinzip der MTF nebst Beispielen und Methoden ihrer Bestimmung für fotografische und Scannersysteme sind ausführlich in einem UNO-Dokument dargelegt [57], das von einer Expertengruppe des Ausschusses für Weltraumforschung (COSPAR) des Internationalen Rates wissenschaftlicher Unionen (ICSU) für den Unterausschuß Wissenschaft und Technik des COPUOS erstellt wurde.

Außer der MTF gibt es weitere Möglichkeiten zur Definition des Auflösungsvermögens eines Sensorsystems, z. B. das sogenannte fotografische Auflösungsvermögen (s. 3.1.2.1.), das unmittelbare Blickfeld eines Linienscanners (s. 3.1.2.2.), das Auflösungsvermögen von passiven und aktiven Mikrowellensensoren (s. 3.1.2.3., 3.1.3.1., 3.1.3.2.) u. a. Die Beziehungen zwischen diesen verschiedenen, nicht identischen Größen zur Charakterisierung des Auflösungsvermögens sind sehr komplex. Es wurde deshalb vom Unterausschuß

Wissenschaft und Technik des COPUOS auf seiner Sitzung 1979 empfohlen [61], ein neues Konzept des sogenannten effektiven Auflösungselements (ERE) zur einheitlichen Charakterisierung des geometrischen Auflösungsvermögens aller abbildenden Fernerkundungssensoren einschließlich Radarsystemen mit synthetischer Apertur auszuarbeiten. In dem inzwischen erschienenen Bericht [48] wird vorgeschlagen, zwischen dem effektiven radiometrischen Auflösungselement (ERRE - effective radiometric resolution element) und dem effektiven räumlichen Auflösungselement (SERE - spatial effective resolution element) zu unterscheiden. Während der Rahmen für eine Definition des ERRE bereits abgesteckt werden konnte, ist das Konzept des SERE noch nicht voll entwickelt und die prinzipielle Lösbarkeit des Problems noch unklar. Inzwischen hat der Unterausschuß Wissenschaft und Technik des COPUOS sich mit der Bitte an die Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie gewandt, die Konzepte des ERRE und SERE zu prüfen und, falls möglich, präzisere Definitionen vorzuschlagen [46].

Die verschiedenen Auflösungsparameter eines Sensorsystems gilt es aufgabenbezogen zu optimieren. Dabei muß u. a. beachtet werden, daß bei gleichbleibender Größe des pro Aufnahme abzubildenden Gebietes (Aufnahmeblickfeld) das Datenvolumen und damit bei Scannern auch die pro Zeiteinheit zu speichernde bzw. zu übertragende Datenrate quadratisch mit der Verbesserung der geometrischen Auflösung wächst. Zum anderen verringert sich bei Verkleinerung des unmittelbaren Blickfeldes der Detektorelemente von Scannern der einfallende Strahlungsstrom. Auch die Integrationszeit pro Bildelement muß verkürzt werden, wenn die Flächenüberdeckung pro Zeiteinheit konstant bleiben soll. Beides führt zur Reduzierung des Signal-Rausch-Verhältnisses der Detektoren und damit zur Verschlechterung des effektiven spektralen und radiometrischen Auflösungsvermögens. Das wiederum wirkt negativ auf das effektive geometrische Auflösungsvermögen des Sensors zurück, insbesondere bei Objekten mit geringem Spektralkontrast.

Der Verbesserung des geometrischen Auflösungsvermögens wird überall dort der Vorrang gegeben, wo der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Erkennung struktureller und textueller Objektdetails liegt, z. B. bei der geomorphologisch-tektonischen Erkundung oder der Identifizierung und großmaßstäbigen Kartierung antropogener, für zivile oder militärische Zwecke geschaffener Strukturen. Was aber letzten Endes im Interpretationsprozeß aus einem Bild an Details entnommen werden kann, hängt außer vom Auflösungsvermögen des Sensorsystems, den Milieubedingungen und der Art der Datenvorverarbeitung (z. B. Kontrastverstärkung, Korrektur des atmosphärischen Einflusses, Beseitigung der Scanlinien und der Bildpunktverschmierung in Scanrichtung durch Bildpunktkorrelation und -interpolation) auch wesentlich von den individuellen Beobachtungsfähigkeiten des Auswerters sowie davon ab, ob Stereobetrachtung oder nur ebene Betrachtung der Szene möglich ist. Diese Faktoren lassen sich aber z. T. nur schwer oder gar nicht quantifizieren.

Für viele Probleme der Ressourcenerkundung und Umweltüberwachung sind hohes spektrales und radiometrisches Auflösungsvermögen bei großem Signal-Rausch-Verhältnis der Fernerkundungssensoren und oft auch ein großes Aufnahmeblickfeld Voraussetzungen für die Erfassung und richtige Interpretation bestimmter Phänomene. Entsprechende Anforderungen an diese Parameter sind oft nur auf Kosten des geometrischen Auflösungsvermögens zu realisieren. Erfahrungen in Indien aus systematischen Vergleichen von mono- und multispektralen Luft- und Satellitenbildern unterschiedlicher Auflösungsparameter zeigten, daß für bestimmte Anwendungsarten der Fernerkundung wie der Klassifizierung großräumig

verteilter land- und forstwirtschaftlicher Ressourcen oder der Veränderungen von Landschaftsformen und Drainagemustern multispektrale Daten geringer geometrischer Auflösung die gleiche Informationsausbeute wie monochromatische Daten wesentlich höherer geometrischer Auflösung gestatteten (s. [57]).

Die Möglichkeit der Feststellung und Identifizierung kurzzeitiger oder schnell veränderlicher Umwelterscheinungen hängt entscheidend vom zeitlichen Auflösungsvermögen eines Fernerkundungssystems, d. h. der Zeitspanne T_w zwischen Wiederholungsüberdeckungen der gleichen Szene ab. Sie sollte klein sein gegenüber der Lebensdauer bzw. der Variationsperiode der zu beobachtenden Erscheinung. So erfordert beispielsweise die hohe Mobilität meteorologischer Phänomene tägliche bis stündliche Beobachtungen. Das läßt sich von Satellitenumlaufbahnen aus entweder nur durch Aufnahmestreifen von mehreren 1000 km Breite bei gleichzeitiger Vergrößerung der geometrischen Auflösung oder aber durch entsprechende zeitliche Staffelung der Umlaufbahnen mehrerer Satelliten mit geringerer Breite des Aufnahmestreifens erreichen. In Tab. 1 sind Anforderungen an das zeitliche und geometrische Auflösungsvermögen von Satelliten bzw. Satellitensystemen für die effektive Fernbeobachtung verschiedener Phänomene und Prozesse zusammengefaßt. Ein Vergleich mit den Angaben in Tab. 2 bis 5 zu 3.1.2. und 3.1.3. zeigt, daß die bisher eingesetzten und geplanten Satelliten diese Anforderungen nur z. T. zu erfüllen vermögen. Das gilt insbesondere für die operative Überwachung der Vegetationsbedingungen landwirtschaftlicher Ressourcen sowie für meteorologische und ozeanographisch-hydrologische Beobachtungen.

In [57] wird auf eine Studie zur Reaktion der Nutzer auf vorgesehene Veränderungen technischer und operativer Parameter für LANDSAT-D verwiesen. Die Befragungen wurden für vier Anwendungsgebiete (Erdöl- und Mineralerkundung, Inland-Wasserressourcen, Landinventarisierung und Landwirtschaft) getrennt durchgeführt. Trotz z. T. unterschiedlicher Bewertung der Nützlichkeit der vorgesehenen Veränderungen für die einzelnen Disziplinen wurde festgestellt, daß die Einführung von Sensoren mit besserer geometrischer, spektraler und radiometrischer Auflösung sowie großem Signal-Rausch-Verhältnis für praktisch alle Anwendungsarten nützlich ist. Dabei wurde der Nutzen der Verbesserung des geometrischen Auflösungsvermögens und des Signal-Rausch-Verhältnisses der Sensoren eindeutig am höchsten bewertet. In der Bewertungsskala folgen die Verkürzung der zeitlichen Auflösung von 18 auf 9 Tage, die Einführung zusätzlicher Spektralbänder im thermischen IR, im mittleren IR (1,6 und 2,2 μm -Band) und im sichtbaren Bereich (blau) sowie Verbesserungen in der präzisen geometrischen Korrektur und schnellen Bereitstellung digitaler Primärdaten. Als besonders günstig werden die vorgesehenen Veränderungen der Sensorparameter im Hinblick auf Untersuchungen der Vegetation eingeschätzt. Von der Einführung der neuen Spektralkanäle im 1,6 μm - und 2,2 μm -Band verspricht man sich vor allem eine wesentlich bessere Unterscheidbarkeit von Schnee- und Wolkenbedeckung sowie von mineralisierten Gesteinen.

In der Einschätzung dieser und vergleichbarer Studien durch die o. g. COSPAR-Expertengruppe wird allerdings festgestellt, daß "... es sehr schwierig ist, diese Verbesserungen zu quantifizieren. Es erscheint extrem schwierig, die infolge Änderungen eines jeden einzelnen dieser Parameter zu erwartenden Verbesserungen genau zu separieren. Darüber hinaus ist es nicht möglich, starre Grenzen für den Anwendungstyp zu definieren,

Tab. 1 Anforderungen an Daten von Satelliten-Fernerkundungssystemen für ausgewählte Anwendungsarten (ergänzt nach [17], [23], [63])

Anwendungsart	geforderte Genauigk.	geometr. Auflösung	zeitliche Auflösung	Spektralbereich	Bandbreite
Meteorologie					
Oberfläch. Temp.	± 1 - 2 K	30-500 km	≥ 4 mal tägl.	therm. IR, MW	schmal
Temp. Eis, Schnee	± 0,5 K			IR, MW	schmal
Windgeschw.	± 3 m/s	500 km		sichtb. Licht	breit
Relat. Feuchtigk.	± 30 %	500 km		IR	breit
Strahlungs- haushalt	↑ - 5 %	300 km	4 mal tägl. bis wöch.	sichtb., IR	breit
Wolkenbilder		1 - 8 km	1/2 h - 6 h	sichtb., IR	breit
Schneebedeckung		4 km	wöchentl.	sichtb., IR, MW	breit
Albedo	10 %	300 km	2 mal tägl.		breit
Niederschlag	10 %	300 km	4 mal tägl.	sichtb., IR, MW	schmal
Ozeanographie					
Globale T-Vert.	1 - 2 K	10 km	stündl. - täglich	IR, MW	breit
Therm. Fronten	0,2 K/km	100 m	täglich	therm. IR	schmal
Küstenzirkulation			täglich	sichtb., IR	schmal
Frischwasser und Verunreinigungen)	0,1 K	10 m	täglich	therm. IR	schmal
Ölverunreinig.		50 m	täglich	nahes therm. IR	mittel
Sedimentgehalt	20 mg/l	300 m		sichtb., IR	schmal
Chlorophyllgeh.	0,1 mg/m ³	300 m	monatl.	0,45 - 0,60 μm	schmal
Wassertiefe	0,5 m	2 m		0,5 - 0,6 μm	schmal
Landwirtschaft					
Pflanzenwacht. u. -schäden		10 - 80 m	wöchentl.	sichtb. nahes IR	schmal
Identifizierung u. Flächenanteil von Feldkulturen		10 - 80 m	monatl.	sichtbar nahes IR	schmal
Bodenbedingung.		10 - 80 m	monatl.	sichtb., IR	
Klassifiz. von Brach-, Weide- u. Kulturland		20 - 80 m	quartal	sichtb. nahes IR	schmal
Kartierung					
Fluß- und Drainagenetz	20 - 100 m (Erk. > 2-10m)	10 - 80 m	quartal.	sichtb. u. nahes IR	mittel
Straßen- und Wegeverlauf	20 - 100 m (Erk. > 2-10m)	10 - 80 m	jährl.	sichtb. u. nahes IR	breit
Generelle Landnutzungs- kartierung		30 - 100 m	1 - 10a	sichtb., nahes u. therm. IR	schmal
Topographie	10 - 100 m	10 - 100 m (mögl. Stereo)	mehrere a	sichtb.	breit
Forstwirtschaft					
	30 - 100 m	30 - 100 m	1 - 10a (versch. Jahresz.)	sichtb. u. nahes IR	schmal
Geologie/Geomorph.					
		10 - 100 m (mögl. Stereo)	1 - 10a (versch. Jahresz.)	sichtb. u. versch. IR- Bänder	schmal bis breit

der sich aus willkürlichen Grenzen bezüglich verschiedener Sensorparameter ergibt. Es scheint sich eher mit der graduellen Verbesserung eines jeden Sensorparameters eine graduelle Verbesserung in jedem Anwendungsgebiet zu ergeben."

Im folgenden sollen die wichtigsten Sensortypen kurz charakterisiert werden. Dabei wird zwischen passiven und aktiven Sensoren unterschieden. Erstere setzen ein natürliches Angebot reflektierter oder emittierter Strahlung voraus, während letztere zunächst selbst das Ausgangssignal liefern, um anschließend die Antwort des Objektes (Reflexion, Streuung, Fluoreszenzemission etc.) zu beobachten. Die wichtigsten Vorteile aktiver Sensoren sind ihre Einsatzmöglichkeit unabhängig von der Tageszeit sowie das durch Nutzung kohärenter Strahlungsquellen erreichbare wesentlich höhere geometrische Auflösungsvermögen. Nachteile sind der meist beschränkte Spektralbereich (oft nur 1 bis 2 Frequenzen genutzt), hoher Energiebedarf, großes Gewicht, technische Komplexität, große Datenraten, z. T. sehr aufwendige Datenvorverarbeitung und folglich relativ hohe Kosten.

3.1.2. Passive Sensoren

3.1.2.1. Fotografische Fernerkundungssysteme

Fotografische Systeme sind die ältesten technischen Systeme zur Fernerkundung im Sinne dieser Arbeit. Die ersten Luftaufnahmen mit Glasplattenkameras wurden 1858 während zweier unabhängiger Ballonflüge von den Franzosen TOURNACHON und LAUSSEDAT gemacht. Lufteerkundungen mit Kameras von Flugzeugen aus sind inzwischen in einigen Ländern bereits seit mehr als 50 Jahren verbreitet. Spezielle Luftbildkameras, wie sie für die Herstellung präziser großmaßstäbiger Karten mit Hilfe photogrammetrischer Auswertemethoden seit etwa 30 Jahren in Luftbefliegungen eingesetzt werden, zeichnen sich durch hohe Detailtreue und minimale Bildverzerrung im Blickfeld aus. Fotografische multispektrale Fernerkundungskameras wie die MKF-6 des VEB Carl Zeiss Jena (Abb. 26) verfügen zusätzlich über die Möglichkeit, die exakt gleiche Szene in verschiedenen Spektralbereichen getrennt auf Schwarz-Weiß-Film aufzunehmen (Multispektralfotografie). Das hat gegenüber der herkömmlichen Mehrschicht-Farbfilm- bzw. -Falschfarbfilmtechnik den großen Vorteil, daß die Anzahl, Lage und Bandbreite der Spektralbereiche durch die Wahl geeigneter Vorsatzfilter variiert und aufgabenbezogen optimiert werden kann (vgl. Abb. 27). Zum anderen ist die Belichtung von Schwarz-Weiß-Filmen wenig problematisch und deren Auflösungsvermögen wesentlich besser als das von Farbfilmen vergleichbarer Lichtempfindlichkeit. Dazu kommt, daß die für die verschiedenen Filterkanäle erhaltenen Schwarz-Weiß-Transparentbilder auf die unterschiedlichste Weise farblich kodiert und zu additiven oder subtraktiven Farbmischbildern kombiniert werden können, um größtmögliche Merkmalskontraste zu erzielen. Bei Mehrschicht-Farbfilmen und -Falschfarbfilmen ist dagegen die Farbdarstellung und relative Farbdichte der verschiedenen farbsensiblen Schichten weitgehend fixiert.

Ein ganz entscheidender Parameter eines abbildenden Fernerkundungssystems ist sein geometrisches Auflösungsvermögen A , oft auch als räumliches Auflösungsvermögen (engl.: spatial resolution) bezeichnet. A ist ein Maß für den geringsten Abstand d , den zwei benachbarte Beobachtungsobjekte haben müssen, damit sie noch als getrennte Gebilde wahrgenommen werden können. A hängt ab von der Form, Größe, Anordnung und dem spektralen Kontrast der Objekte. Fotografische Fernerkundungssysteme zeichnen sich durch ein hohes geometrisches Auflösungsvermögen aus.

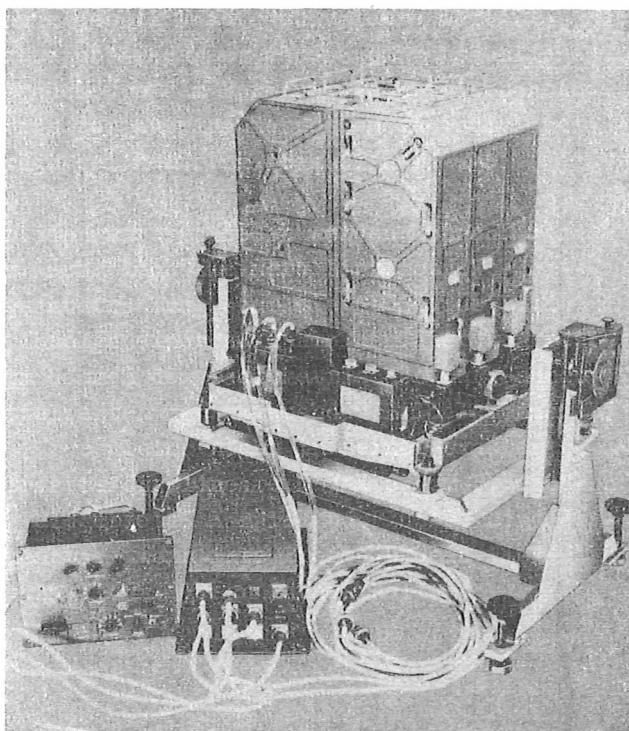


Abb. 26 Multispektralkamera MKF-6 des
VEB Carl Zeiss Jena, DDR

Für das optische Auflösungsvermögen von Kamera-Objektiven und Fernrohren gilt

$$(5) \quad d \approx \lambda \cdot f/D$$

mit λ - Wellenlänge des Lichtes, f - Brennweite des Objektivs und D - Objektivdurchmesser. Danach verringert sich d mit der Wellenlänge und ist dem Verhältnis von Objektivdurchmesser zur Brennweite, der sogenannten Apertur des Systems, umgekehrt proportional.

Das kombinierte geometrische Auflösungsvermögen des Systems Kamera-Film hängt außer von λ , f und D auch noch von der Korngröße der lichtempfindlichen Emulsion und der Dicke des Films ab. So ist das schlechtere Auflösungsvermögen bei Verwendung von Dreischichtfarbfilmen gegenüber Schwarz-Weiß-Filmen u. a. eine Folge der verstärkten Streuung des Lichts beim Durchgang durch die verschiedenen Schichten. Berücksichtigt man des weiteren die stärkere Streuung kurzwelliges Lichts beim Durchgang durch die Atmosphäre (s. 2.2.1.), dann führt dies zu einer Verschlechterung des realen Auflösungsvermögens im blau-grünen Spektralbereich gegenüber Fernbeobachtungen im gelb-roten Spektralbereich, obgleich vom Auflösungsvermögen des optischen Systems her nach obiger Beziehung eine umgekehrte Tendenz zu erwarten wäre.

Das kombinierte fotografische Auflösungsvermögen des Systems Kamera-Film wird entweder mittels der MTF beschrieben oder aus der Reaktion des Systems auf ein spezifisches geometrisches Zielobjekt bekannten Kontrasts bestimmt. Verbreitet ist die Ermittlung des geometrischen Auflösungsvermögens fotografischer Systeme unter Verwendung von

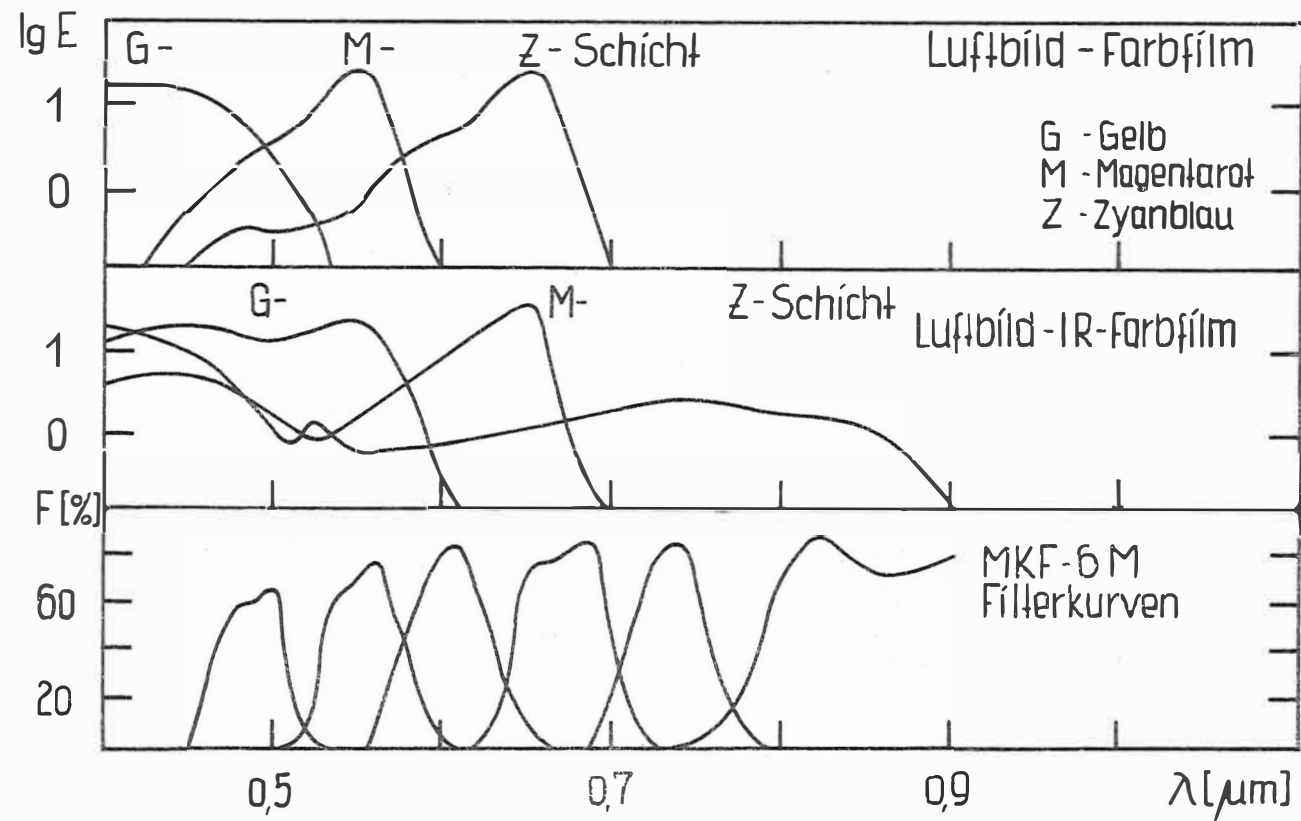


Abb. 27. Spektrale Empfindlichkeit E eines Luftbild-Farbfilms und Luftbild-IR-Farbfilms bzw. Filterdurchlässigkeit F der MKF-6M-Farbfiler (nach [4] und [68])

Streifenmustern. Üblich sind nach [57] Muster aus 2, 3 und 4 Streifen mit Kontrastverhältnissen $K = 1,6; 2$ und ∞ . Als geometrische Auflösung wird der kleinste noch auflösbare Abstand zwischen den Zentren benachbarter Streifen gleicher Farbe angegeben. Ein analoges Maß ist die Anzahl R der pro Millimeter Film noch unterscheidbaren Linien. Sie hängt außer von der MTF des Objektivs auch von der MTF des Films ab. Generell ist das geometrische Auflösungsvermögen von Farbfilmen und IR-Farbfilmen schlechter, das spezieller Schwarz-Weiß-Filme dagegen besser als das optische Auflösungsvermögen guter Objektive. In [57] werden für Objektive Werte zwischen etwa 30 und 100 Linien/mm für $K = 1,6$ und etwa doppelt so gut für $K = 1000$, für spezielle Schwarz-Weiß-Filme dagegen Werte bis etwa 600 Linien/mm für $K = 1000$ angegeben. Das Linienauflösungsvermögen der Kombination MKF-6 mit dem sowjetischen Spezialfilm T-18 beträgt nach [38] etwa 160 Linien/mm für kontrastreiche Objekte im sichtbaren Bereich des Spektrums für den größten Teil des Blickfeldes.

Bei einem gegebenen Linienauflösungsvermögen R des Kamera-Film-Systems hängt das tatsächliche, auf das Objekt bezogene fotografische Auflösungsvermögen A_f im wesentlichen nur vom Verhältnis des Objektabstands h zur Brennweite f ab, vorausgesetzt, daß die während der endlichen Belichtungszeit des Films durch die Bewegung der Sensorplattform verursachte Bewegungsunschärfe wie bei der MKF-6 durch eine entsprechende Kameranachführung kompensiert wird. Es gilt dann:

$$(6) \quad A_f[\text{m}] = \frac{h[\text{km}]}{f[\text{m}] \cdot R[\text{Linien/mm}]}$$

Das Blickfeld B der Kamera ergibt sich in analoger Weise aus der Beziehung

$$(7) \quad B[\text{km}] = \frac{h[\text{km}] \cdot k[\text{mm}]}{f[\text{mm}]}$$

mit k als der Kantenlänge der Filmaufnahme.

Nach (6) und (7) ergeben sich für MKF-6 ($f = 125 \text{ mm}$, Filmformat = $55 \times 81 \text{ mm}^2$) mit dem o. g. Linienauflösungsvermögen $R \approx 160 \text{ Linien/mm}$ von Bord der sowjetischen Weltraumstation SALJUT ($h \text{ ca. } 350 \text{ km}$) für $A_f \text{ ca. } 18 \text{ m}$ und für die Fläche des von einer Aufnahme überdeckten Gebietes etwa $150 \times 220 \text{ km}^2$. Bei Verwendung größerer Objektivbrennweiten könnten bei gleichzeitiger proportionaler Einschränkung des Blickfelds auch aus Erdumlaufbahnen Auflösungen im m-Bereich erzielt werden (Abb. 28). Beim Einsatz in Flugzeugen (Flughöhe $h = 7 \text{ km}$) wird nach [36] für die Kamera MKF-6 ein Auflösungsvermögen von ca. $0,5 \text{ m}$ für lineare und ca. 1 m für flächenhafte Objekte hohen Kontrasts angegeben. Das ist etwas schlechter als es nach (6) zu erwarten wäre und ist bedingt durch den auflösungsmindernden Einfluß der Flugzeugvibrationen. Für kürzere Wellenlängen wird das geometrische Auflösungsvermögen geringfügig schlechter infolge des Einflusses der atmosphärischen Lichtstreuung, für größere Wellenlängen verschlechtert es sich gemäß dem physikalischen Prinzip proportional mit λ , tatsächlich aber noch wesentlich stärker auf Grund der Grobkörnigkeit verfügbarer, im nahen IR empfindlicher Filmemulsionen.

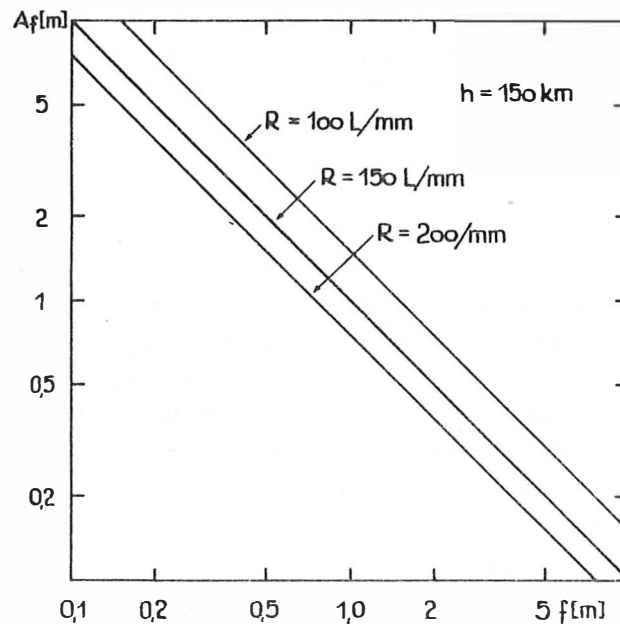


Abb. 28. Fotografisches Bodenaufklärungsvermögen A_f in Abhängigkeit von der Brennweite f des Objektivs und dem Linienaufklärungsvermögen R des Systems Kamera - Film

Vorteile fotografischer gegenüber den nachstehend beschriebenen Scannersystemen sind neben vergleichsweise geringen Kosten und technischer Einfachheit ihr hohes geometrisches Auflösungsvermögen und die kompakte Form der Primärdatendarstellung auf Film. Damit eignen sie sich in der Regel bestens für die visuelle Fotointerpretation und großmaßstäbige topographische und thematische Kartierungen. Das hohe Auflösungsvermögen erleichtert die Merkmalserkennung, insbesondere wenn stereoskopische Betrachtung sich überlappender Aufnahmeserien möglich ist. Dadurch entfällt für viele praktische Aufgaben die Notwendigkeit für eine aufwendige und kostspielige digitale Bearbeitung zur Erhöhung von Merkmalskontrasten. Auch der Umfang erforderlicher Geländebegehungen oder Überfliegungen zur Objektidentifizierung kann für einige Anwendungen reduziert werden. Das kommt einer schnellen Nutzung der Daten für operative Anwendungen entgegen, vorausgesetzt, daß die Zeitspanne zwischen Datengewinnung und -bereitstellung an die Nutzer klein genug gehalten werden kann.

Nachteile sind die Schwierigkeiten einer absoluten radiometrischen Eichung der einzelnen Bildelemente, ihrer exakten Reproduzierbarkeit im fotochemischen Entwicklungs-, Bearbeitungs- und Vervielfältigungsprozeß und Auflösungsverluste sowohl bei der fotografischen Vervielfältigung wie auch bei der Analog-Digital-Umwandlung der Daten zwecks Bearbeitung auf numerischen Rechnern. Dazu kommt, daß die Daten fotografischer Systeme nicht in Realzeit übertragen werden können, sondern physisch zur Erde zurückgebracht werden müssen. Sie stehen deshalb erst Tage, Wochen oder gar Monate nach dem Aufnahmezeitpunkt zur Nutzung zur Verfügung. Sie eignen sich deshalb nicht für Aufgaben der kontinuierlichen Überwachung relativ schnell veränderlicher Erscheinungen. Allerdings steht dem als ökonomischer Vorteil gegenüber, daß fotografische Systeme nicht die Errichtung kostspieliger und technisch komplizierter Bodenstationen für den Datendirekt-empfang erfordern (s. 3.2.).

3.1.2.2. Hochauflösende Scannersysteme für Erd- und Erdressourcenbeobachtungen

Während Kameras die gesamte Szene im Blickfeld ihres optischen Systems gleichzeitig aufnehmen, wird es von Scannern linienweise abgetastet. Dieses Prinzip wird sowohl im sichtbaren und nahen IR als auch im thermischen IR- und Mikrowellenbereich des Spektrums angewendet. Dabei unterscheidet man für hochauflösende Erd- und Erdressourcenbeobachtungen im wesentlichen drei verschiedene Systeme:

- a) Scanner, bei denen die Szene direkt über einen rotierenden oder oszillierenden Spiegel linienweise abgetastet und über eine Teleskopoptik plus Dispersionsoptik bei multispektralen Scannern auf Festkörperstrahlungsdetektoren fokussiert wird (Abb. 29). Die Öffnung einer Sichtfeldblende in der Brennebene des Teleskops bzw. die Größe und Konfiguration der in der Brennebene gelegenen Enden eines optischen Faserbündels für die Weiterleitung des Lichts zum Spektrometer und den Detektoren bestimmen das unmittelbare Blickfeld (engl.: IFOV - instantaneous field of view) des Sensors. Die in jedem Detektor in Abhängigkeit von der empfangenen Strahlungsintensität erzeugte Spannung wird über ein bestimmtes Zeitintervall τ integriert und in geeignet kodierter digitaler Form entweder auf Magnetband in der Sensorplattform zwischengespeichert oder aber im Echtzeitbetrieb direkt zu einer Bodenstation im Sichtbereich des Satelliten übertragen. Mittels Relaisatelliten im geostationären Orbit können die Daten auch zu weit entfernten Empfangsstationen außerhalb des Funksichtbereiches des Satelliten in Echtzeit übertragen werden. Die so gewonnenen digitalen Primärdaten können gemeinsam mit Eich- und Korrekturdaten auf rechnerkompatiblen Bändern (CDTs) gespeichert und ohne Auflösungsverluste einer automatischen Datenbearbeitung zugeführt werden (s. 3.2. und 4.3.). Gleiches gilt für die Primärdaten der nachstehend beschriebenen Scannersysteme.
- b) Während bei dem erstgenannten Scannertyp mit hoher Präzision bewegte Teile benötigt werden (Scannerspiegel, Blendscheibe zur Abdeckung des Spiegelnücklaufs, mechanische Modulatoren) gibt es in sogenannten "push-broom"-Scannern, die mit multiplen Linearanordnungen (MLA) von mehreren tausend CCD-(charge-coupled device) Detektoren arbeiten [53], keinerlei bewegte Teile. Das erhöht die Lebensdauer der Sensoren wesentlich und reduziert deren Störanfälligkeit und Kosten. Ein Nachteil ist, daß die CCD-Technologie bisher nur im sichtbaren und nahen IR-Bereich des Spektrums eingesetzt werden kann. An der Entwicklung von CCD-Detektoren für den Bereich des mittleren und thermischen IR wird jedoch z. Z. gearbeitet. Mit dem Einsatz von MLA-Detektoren an Bord von Fernerkundungssatelliten ist ab Mitte der 80er Jahre zu rechnen.

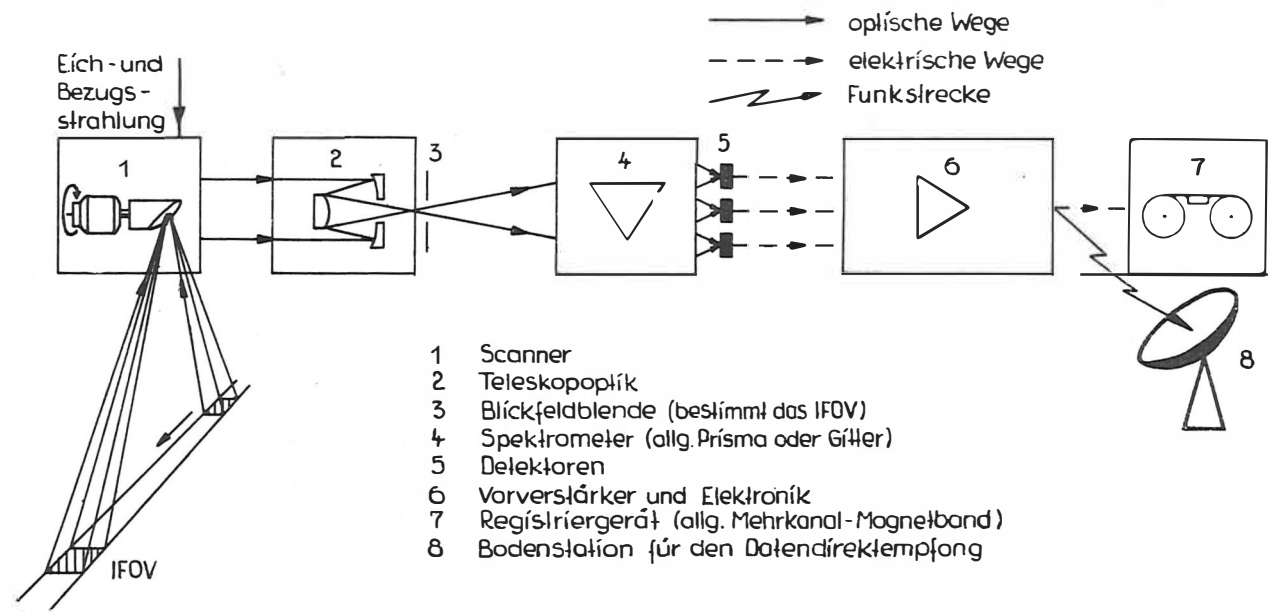


Abb. 29. Funktionsprinzip eines Scanners für die aerokosmische Fernerkundung

Durch die Linearanordnung der Detektoren entsteht eine Bildlinie aus Bildelementen entsprechend der Anzahl der Detektoren. Aufeinanderfolgende Linien werden durch die Vorwärtsbewegung des Satelliten erzeugt.

- c) Bei modifizierten Vidicon-Fernsehkameras (RBV - return beam vidicon) wird zunächst die einfallende Strahlung auf einen mit geeignetem Leuchtstoff überzogenen Bildschirm fokussiert, der dann durch einen Elektronenstrahl abgetastet wird. Die Helligkeitsunterschiede des Bildes werden dabei in Spannungsschwankungen umgesetzt. Die Dicke des Elektronenstrahls bestimmt die Bildauflösung. Sie kommt bei den modernsten dieser Systeme dem fotografischer Sensoren bereits sehr nahe.

Das IFOV bestimmt das geometrische Auflösungsvermögen von Scannern. Es wird entweder als ein feststehender Sensorparameter im Bogenmaß (rad bzw. mrad) oder aber in Abhängigkeit von der Flughöhe des Sensors als geometrische Auflösung im Niveau der Erdoberfläche in Metern angegeben. Oft wird das IFOV einfach als geometrisches Auflösungsvermögen des Scanner- bzw. RBV-Systems bezeichnet und von Laien zu Unrecht mit dem Auflösungsvermögen anderer, z. B. fotografischer Fernerkundungssysteme gleichgesetzt. Es bestehen jedoch einige prinzipielle Unterschiede. So fordert die Informationstheorie, daß ein kontinuierliches radiometrisches Signal, wie es durch den Detektor eines Scanners oder MLA-Sensors erzeugt wird, mindestens zweimal pro Bildelement "gesammelt" werden muß (d. h. 50%ige Überlappung aufeinanderfolgender Bildelemente), um das volle Auflösungsvermögen zu erreichen. Anderenfalls ist das effektive unmittelbare Blickfeld (EIFOV) größer als das IFOV. Beispielsweise wird für den geplanten "Thematischen Kartierer" in LANDSAT-D ein IFOV von 30 m angegeben. Nach [45] wird aber das radiometrische Signal nur einmal pro Bildelement "gesammelt", wodurch sich infolge der endlichen Signalintegrationszeit τ die effektive Bildelementgröße auf etwa $30 \times 52 \text{ m}^2$ vergrößert. Infolge der Bahngeschwindigkeit des Satelliten kommt es generell auch zu einer Streckung der Bildelemente in Flugrichtung. Sie ist jedoch wesentlich geringer als in Scanrichtung. Grundsätzlich aber führt der Scanprozeß zur Anisotropie der Bilddaten. Die MTF des Scanners wird folglich durch eine Vielzahl von Faktoren bestimmt [57]:

- Optik des Systems,
- elektrische Tiefpaßfilterung des Detektorausgangssignals u. a. zur Reduzierung von "aliasing"-Effekten,
- geometrischer Mittelungseffekt infolge endlicher Detektordimension und Integrationsdauer,
- Mittelungseffekt bei der Herstellung eines geometrisch unverzerrten Bildes aus individuellen Strahlungsmessungen an diskreten Punkten,
- Mittelungseffekt infolge endlicher Dicke des Lichtstrahls im Filmregistriergerät, das zur Umwandlung der digitalen Daten in eine bildliche Darstellung genutzt wird.

Ein einzelnes Bildelement hat keine Modulation. Sein Strahlungshelligkeitswert entspricht der über das EIFOV integrierten Strahlung. Um in Scannerdaten ein Objekt überhaupt als verschieden von seiner Umgebung erkennen zu können, braucht man mindestens zwei Bildelemente. Eine sorgfältige Analyse des Problems in [57] führte zusammenfassend zu folgender Aussage: In Aufnahmen des LANDSAT-MSS können Streifen eines 2-Streifen-Musters als voneinander getrennt erkannt werden, wenn der Abstand der Streifenzentren im Falle hohen Kontrasts ($K = \infty$) mindestens 1,6 mal und bei geringem Kontrast ($K = 2$) mindestens 2,4 mal größer als das IFOV ist, vorausgesetzt, daß die Helligkeit des Testobjekts einem

signifikanten Teil des radiometrischen Dynamikumfangs des Scanners entspricht. In der Praxis kann der Wert dieses Faktors zur Umrechnung des IFOV auf äquivalente Werte $A_{f\ddot{a}g}$ der fotografischen Auflösung von den o. g. Werten abweichen, da er außer vom tatsächlichen Kontrastverhältnis und der Helligkeit der Szene auch von der Form und geometrischen Anordnung der Objekte und dem Überlappungsverhältnis der aufeinanderfolgenden individuellen Strahlungsmessungen abhängt. Letzteres beträgt bei dem o. g. Sensor nur 1,4.

Ogleich Linienpaare in Scanneraufnahmen nur dann unterschieden werden können, wenn ihr Abstand $d \geq A_{f\ddot{a}g}$ ist, können andererseits wesentlich kleinere Einzelobjekte erkannt werden. Die Ursache dafür ist, daß die Gesamtstrahlung über die Größe des Bildelements gemittelt wird. Weicht der Mittelwert infolge eines zwar kleinen aber kontrastreichen Objektes innerhalb eines Bildelements im Rahmen des radiometrischen Auflösungsvermögens des Systems noch merklich von den Mittelwerten der umgebenden Bildelemente ab, dann wird das Objekt feststellbar, obgleich nicht in seiner exakten Größe ausmeßbar. Insbesondere kontrastreiche lineare Objekte (z. B. Brücken und Dämme über Wasser, Straßen durch Wald- und Feldgebiete, Kanäle und Flüsse) sind deshalb in Scanneraufnahmen auch dann noch gut erkennbar, wenn ihre Breite um ein Vielfaches kleiner als das IFOV ist. Abb. 30 veranschaulicht diesen Sachverhalt.

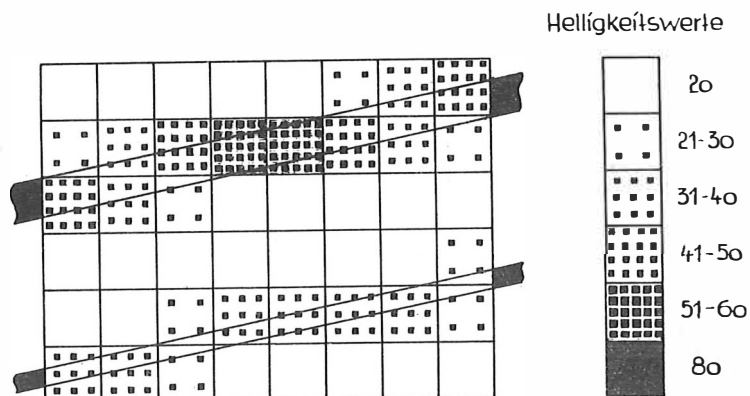


Abb. 30. Veranschaulichung der Feststellung kontrastreicher linearer Merkmale in Scanneraufnahmen. Jedes Kästchen repräsentiert ein Bildelement (nach TARANIK [43])

Auf technische Einzelheiten der Scannersysteme soll hier nicht näher eingegangen werden. Allerdings ist es notwendig, auf einige für die Anwendung wesentliche Unterschiede zwischen Flugzeug- und Satellitenscannern hinzuweisen. Ein Nachteil von Flugzeugscannern ist ihr meist sehr großer Blickwinkel. Das führt u. a. wegen der sehr starken Abhängigkeit der Reflexionscharakteristiken natürlicher Objekte, der Größe atmosphärischer Einflüsse wie auch der Bildelementgröße F vom Beobachtungswinkel α ($F \sim (\cos\alpha)^{-3}$) zu erheblichen Problemen bei der automatischen Bearbeitung multispektraler Scannerdaten und der Nutzung entsprechender Aufnahmen für Kartierungszwecke (s. auch [52]). Langfristig gesehen dürfte deshalb die Verwendung von Flugzeugscannern keine Perspektive für operative zivile Fernerkundungsanwendungen haben, kann aber in einer experimentellen Phase

für die Gewinnung von Erfahrungen, das Studium der naturwissenschaftlichen Grundlagen der Fernerkundung und die Entwicklung komplexer analytischer Auswertemethoden sehr nützlich sein. Demgegenüber hat der Einsatz multispektraler Scanner in Satelliten große Vorteile. Auf Grund der großen Bahnhöhen und demzufolge kleinen Scanwinkel (allgemein $< \pm 10^\circ$) treten kaum geometrische Verzerrungen der Bildelemente auf. Vom Blickwinkel abhängige radiometrische Korrekturen sind meist nicht erforderlich. Dazu kommen weitere entscheidende Vorteile bei geeigneter Wahl der Bahnparameter (z. B. sonnensynchrone Umlaufbahn konstanter Höhe) wie konstante Ortszeit der Aufnahmen und damit minimale Variation der Sonnenhöhe und des Sonnenazimuts sowie Konstanz des Bildmaßstabs und relativ hohes zeitliches Auflösungsvermögen. Das erleichtert wesentlich die automatische spektrale Klassifizierung der Daten, deren Nutzung zur Herstellung von Karten und Kartenmosaiken sowie die vergleichende Analyse und Synthese zeitlich aufeinanderfolgender Aufnahmen. Weitere Vorteile direktübertragender Scannersatelliten sind die Verfügbarkeit der Daten in nahezu Realzeit und das Vorliegen der Primärdaten in digitaler Form. Letzteres gestattet deren vielseitige, schnelle und quantitativ exakte, jederzeit reproduzierbare Bearbeitung unter Nutzung elektronischer Rechenautomaten. Das radiometrische Auflösungsvermögen von Scannersatelliten ist allgemein hoch (64 bzw. 256 Intensitätsniveaus). Ihr äquivalentes fotografisches Auflösungsvermögen liegt z. Z. aber noch deutlich unter dem fotografischer Systeme. In den 80er Jahren ist allerdings auch im zivilen Bereich mit Scannersystemen zu rechnen, die ein annähernd gutes räumliches Auflösungsvermögen besitzen (z. B. [50]). Allerdings erhöht sich die Datenrate proportional zum Quadrat des geometrischen Auflösungsvermögens. Die Gewinnung und Verarbeitung digitaler Primärdaten von multispektralen Satellitenscannern hoher Auflösung erfordert deshalb kostspielige technische Systeme höchster Präzision und Komplexität. Sie betreffen sowohl die Sensor-, Zwischenspeicher- und Übertragungskomponenten im Weltraum (Weltraumsegment) als auch die Empfangs-, Speicher- und Verarbeitungssysteme am Boden. Beispielsweise betrug für LANDSAT-Satelliten der 1. Generation (IFOV = 80 m) die Datenrate etwa 15 Mbit/s. Die Datenfernübertragung zu den Bodenstationen erfolgte im S-Band (2200 bis 2300 MHz). Für den geplanten LANDSAT-D (IFOV = 30 m) wird die Datenrate im Mittel bereits ca. 100 Mbit/s betragen [44] und in Westeuropa gibt es Konzeptionen für kombinierte Erdbeobachtungssatelliten mit hochauflösenden optischen als auch aktiven Mikrowellensensoren, die sogar Datenraten von etwa 200 Mbit/s vorsehen [47]. Das macht den Übergang zu höheren Übertragungsfrequenzen im X-Band (8 - 11 GHz) bzw. Ku-Band (ca. 11 - 18 GHz) erforderlich. Entsprechende Technologien sind noch stark monopolisiert und zwingen die meisten an einem Datendirekttempfang solcher Satelliten interessierten Länder zu kostspieligen Importen und Modifizierungen bereits vorhandener Bodenstationen. Dazu kommen die immensen Probleme der empfangs-, speicher- und bearbeitungsseitigen Bewältigung dieser riesigen Datenmengen. Deshalb häufen sich kritische Stimmen, die ernste Bedenken sowohl gegen das von den westlichen Weltraummächten verfolgte technologische wie auch inhaltliche Konzept anmelden. Letzteres gilt vor allem auch unter dem Gesichtspunkt einer weltweiten effektiven Nutzung der Potenzen der Satellitenfernerkundung durch Entwicklungsländer. Diese fordern u. a., Art und Häufigkeit von Änderungen der Satellitensysteme in Grenzen zu halten und mit den potentiellen Nutzern und Ländern, die Empfangsstationen bauen, abzustimmen. Länder, die im Hinblick auf ein operatives Satelliten-Fernerkundungssystem große Investitionen durchführen, sollten in die Programmentwicklung eingeweiht werden und die Gewißheit haben, daß das Programm über eine längere Zeitspanne in der festgelegten Form abläuft [70]. Auch in den USA selbst weisen namhafte Wissenschaftler darauf hin (s. [45]), daß die Änderung bewährter und erprobter Datenparameter mit Bemühungen um die Schaffung eines operativen Satelliten-Fernerkundungssystems unvereinbar ist.

Sie unterbricht jahrelange, mit bestimmten Datencharakteristiken gesammelte Erfahrungen und zwingt zu kostspieligen Modifikationen.

Verschiedene Vorschläge zur Bewältigung des Problems der hohen Datenraten sehen eine Datenkompression an Bord des Satelliten vor. Nach einem Bericht des UNO-Sekretariats [78] könnte bereits durch relativ einfache Techniken der Datenkodierung der Umfang der Satellitenscanner-Daten ohne signifikanten Informationsverlust um den Faktor 3 reduziert werden. Durch Hauptkomponententransformation wäre eine weitere Datenkompression in Abhängigkeit von der Anzahl der verwendeten Klassen theoretisch bis etwa zum Faktor 30 möglich [71]. Allerdings wird bereits in [78] darauf hingewiesen, daß die zur Erzielung optimaler Ergebnisse nötige Form der Datenkompression stark von der beabsichtigten Anwendung abhängt. Das würde nicht nur eine Vielzahl verschiedener Kompressionsalgorithmen erforderlich machen, sondern auch die Nutzbarkeit der in einer bestimmten Form komprimierten Daten einer gegebenen Szene für andere Anwendungen reduzieren. Die Rücktransformation der komprimierten Daten in ihre ursprüngliche Form ist sehr aufwendig und nicht eindeutig ohne Informationsverluste möglich. In den letzten Jahren wurden auch wiederholt Vorschläge unterbreitet [35], [62], durch den Bau kleinerer für spezielle Anwendungen optimierter Satelliten bzw. durch Entwicklung von Satelliten mit variablen Parametern die Nutzerforderungen nach hoher geometrischer, spektraler, radiometrischer und/oder auch zeitlicher Auflösung bei möglichst geringen Datenraten zu realisieren (etwa 5 - 8 Mbit/s). Verfasser hält die Realisierung solcher Konzeptionen, die dem Nutzer keinen Wettlauf mit der Entwicklung kompliziertester Techniken aufzwingen und die es gestatten, daß der Kampf mit Datenfluten nicht zum Hauptanliegen der Fernerkundung wird, entscheidend für eine anwendungsorientierte, effektive Entwicklung der Satellitenfernerkundung. Sie bietet im Rahmen vertretbarer Kosten und technischen Aufwands die Gewähr einer den aktuellen Nutzerbedürfnissen angepaßten Wahl der Sensorparameter.

Prinzipiell ist jedoch kein einzelner Fernerkundungssatellit ideal oder auch nur akzeptabel für alle relevanten Anwendungsarten, zumal wenn man die unterschiedlichen Bedingungen in verschiedenen Regionen der Erde berücksichtigt. Hochauflösende fotografische Systeme haben ihre Berechtigung bzw. spielen eine entscheidende ergänzende Rolle ebenso wie die nachfolgend beschriebenen Systeme geringer geometrischer Auflösung zur Überwachung großräumiger Umweltphänomene. Darüber hinaus ist die Entwicklung wolken-durchdringender hochauflösender aktiver Satellitensensoren (s. 3.1.3.) eine zwingende Notwendigkeit, wenn die Satellitenfernerkundung auch für Länder mit ständiger hochgradiger Wolkenbedeckung eine Zukunft haben soll (vgl. Abb. 6). Deshalb werden neben sonnensynchronen, nahezu polaren Umlaufbahnen für Erdressourcensatelliten u. a. auch äquatoriale Umlaufbahnen bzw. solche mit geringer Inklination in Erwägung gezogen werden müssen, um durch kurze Überdeckungszyklen (alle 3 bis 4 Tage) die Chancen für Fernbeobachtungen auch im sichtbaren Bereich des Spektrums zu erhöhen. Die komplexe Nutzung der Daten möglichst vieler komplementärer Fernerkundungssensoren/-satelliten ist prinzipiell anzustreben.

3.1.2.3. Passive Sensoren für Fernbeobachtungen der Atmosphäre, Ozeane und großräumiger Umweltphänomene

Die unter 3.1.2.1. und 3.1.2.2. behandelten passiven Fernerkundungssensoren dienen vor allem der Erkundung des Festlandes der Erde und seiner Ressourcen. Satelliten-Scannersysteme für meteorologische und verwandte globale Erdbeobachtungen arbeiten ebenfalls im sichtbaren, nahen IR- und thermischen IR- sowie zusätzlich im Mikrowellen-Bereich des Spektrums. Der Hauptunterschied ist ihr meist deutlich geringeres geometrisches, dafür aber oft wesentlich besseres zeitliches, radiometrisches und/oder spektrales Auflösungsvermögen. Die hohe Mobilität und Großräumigkeit insbesondere meteorologischer Prozesse erfordert wesentlich häufigere Wiederholungsüberdeckungen großregionaler bis globaler Gebiete. Zum anderen verlangt die quantitative Modellierung atmosphärischer und klimatischer Prozesse möglichst genaue Angaben zur horizontalen und vertikalen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsverteilung sowie zur Gaszusammensetzung der Atmosphäre. Daraus leiten sich die besonders hohen Anforderungen an das Strahlungstemperatur- und/oder spektrale Auflösungsvermögen der Sensoren ab. Das wiederum erfordert ausreichend hohe Strahlungsströme und Integrationszeiten pro Detektorelement und damit geringe geometrische Auflösung. Bodenstationen für den analogen Wetterbildempfang sind vergleichsweise einfach und billig. Das erleichtert entscheidend die weltweite Nutzung dieser Daten in Realzeit.

Als Sensoren in operativen und experimentellen Satelliten für meteorologische, klimatologische, ozeanographische und großräumige Umwelt-Fernbeobachtungen werden vorwiegend Scanner eingesetzt. Auch passive Mikrowellensensoren werden oft als Scanner-Radiometer betrieben, d. h. die parabolischen Empfangsantennen sind beweglich angeordnet und tasten die Szene streifenweise ab. Das geometrische Auflösungsvermögen am Boden A_r ist in erster Näherung bestimmt durch die Winkelöffnung des Antennenrichtstrahls und die Flughöhe der Sensorplattform. Es gilt

$$(8) \quad A_r \approx h \cdot \lambda/D .$$

Bei einem Durchmesser des Parabolspiegels von $D = 2 \text{ m}$ entspricht das für 3 cm -Wellen aus einer Bahnhöhe $h = 1000 \text{ km}$ einem Richtstrahldurchmesser am Boden von 15 km . Durch die endliche Integrationszeit τ des empfangenen Signals wird das kreisförmige Bildelement in Flugrichtung und bei Scanner-Radiometern vor allem in Scanrichtung gestreckt. Das Strahlungstemperatur-Auflösungsvermögen A_{T_S} folgt nach [51] aus der Beziehung

$$(9) \quad A_{T_S} = k \cdot T/\sqrt{\tau \cdot B} ,$$

mit B - Bandbreite des Sensors, T - kombinierte Antennen-(Strahlungs-) und Empfänger-(Rausch-)Temperatur und k - Gerätekonstante. Daraus folgt, daß bei Verringerung der Sensorbandbreite, d. h. bei Erhöhung des spektralen Auflösungsvermögens, die Integrationszeit erhöht und damit das räumliche Auflösungsvermögen des Sensors erniedrigt werden muß, um ein bestimmtes Temperaturauflösungsvermögen zu erreichen. Zum anderen verschlechtert sich letzteres bei hoher Rauschtemperatur des Empfängers. Deshalb werden extrem rauscharme Wellenleiter und Vorverstärker benötigt. Letztere werden, wie auch Sensoren für thermische IR-Strahlung, oft in Flüssiggasen tiefstgekühlt. Da der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf Fragen der Fernerkundung von Erdressourcen liegt, soll im

folgenden nicht näher auf Anwendungen von Sensoren in Wetter- und Umweltsatelliten eingegangen werden. Allerdings sind einige generelle Bemerkungen zu den Wechselbeziehungen verschiedener Fernerkundungsanwendungen erforderlich. Messungen zum Strahlungshaushalt der Erde sowie zur Gaszusammensetzung und Aerosolkonzentration der Atmosphäre, wie sie mit verschiedenen Experimenten an Bord von NIMBUS-7 aber auch von Satelliten der METEOR- und TIROS-Serie durchgeführt werden, sind nicht nur für die Meteorologen, Klimatologen und Hochatmosphärenforscher von Interesse. Sie liefern zugleich wichtige Daten für die Modellierung und Korrektur des Einflusses der Atmosphäre und der Strahlungsbilanz der Erde. Das war aber nach Darlegungen unter 2. eine der Voraussetzungen für die Verbesserung der quantitativen Interpretation multispektraler Daten für die Ressourcenerkundung. Sensoren dieser Satelliten liefern u. a. auch nützliche Daten über Wasserdampfkonzentration und Niederschlagspotential, über Oberflächentemperaturen und Bodenfeuchtigkeit. Angaben dieser Art sind ebenso wie auch andere aus Satellitenbeobachtungen ableitbare meteorologische Daten von ausschlaggebender Bedeutung für die Erstellung und Nutzung agrometeorologischer Modelle zur Ertragsprognose landwirtschaftlicher Ressourcen (4.4.5.). Von dem in NIMBUS-7 eingesetzten Küstenzonen-Farbscanner (CZCS) mit sehr hoher spektraler Auflösung werden Beiträge zur Identifizierung und Quantifizierung von Planktonkonzentrationen sowie von Suspensions-, Lösungs-, Öl- und thermischen Verschmutzungen der Küstengewässer erwartet.

Für die rechtzeitige Erkennung von und Warnung vor gefährlichen Naturerscheinungen wie Stürmen, Überflutungen, Waldbränden und Pflanzenkrankheiten, für operative Entscheidungen in der Landwirtschaft, im Hochseefischereiwesen oder bei der Abwendung von Gefahren aus driftenden Luft- und Wasserverschmutzungen sind Wiederholungsbeobachtungen in kurzen Zeitabständen erforderlich. Das hohe zeitliche Auflösungsvermögen meteorologischer Satelliten ist deshalb von kritischer Bedeutung. Dieser Vorteil überwiegt für viele Aufgabenstellungen den Nachteil der geringen geometrischen Auflösung oft deutlich.

Für die bessere Lösung zahlreicher Überwachungsaufgaben ist jedoch eine Kombination von hoher geometrischer und zeitlicher Auflösung unumgänglich. Diese technologisch widersprechenden Forderungen werden bisher weder von meteorologischen und Umweltsatelliten noch von Ressourcenerkundungssatelliten erfüllt. Es gibt Pläne, dafür geeignet modifizierte geostationäre Erdbeobachtungssatelliten zu nutzen. Deren Fähigkeit zur täglich mehrmaligen Beobachtung des Großteils einer Hemisphäre mit geringer geometrischer Auflösung (IFOV ca. 1 - 2 km) soll in der zweiten Hälfte der 80er Jahre ergänzt werden durch die Möglichkeit zur kommandogesteuerten hochauflösenden Feinabtastung ($3 \text{ m} < \text{IFOV} < 100 \text{ m}$) eines ausgewählten kleineren Bildausschnitts. Diese aufgabenbezogene flexible Wahl der Sensorparameter würde eine inhaltlich wie ökonomisch optimale Nutzung der Satellitenfernerkundung gestatten.

Auch Nutzungsmöglichkeiten von Satelliten für meteorologische und hydrologische Untersuchungen wurden anfangs zu optimistisch eingeschätzt. Wie die Analysen von JOHNSON und VETLOV [63] zeigen, können die Genauigkeitsanforderungen für viele hydrologische und meteorologische Parameter weder von den gegenwärtigen noch von Satellitensystemen der 80er Jahre erfüllt werden. Für die Bestimmung der Verdunstung gibt es bisher keine brauchbare aerokosmische Methode. Generell gilt auch für die o. g. Anwendungsgebiete, daß aerokosmische Methoden nur dann optimal genutzt werden können, wenn ein adäquates Netz von Bodenstationen hoher Qualität zur Verfügung steht. Meteorologische und Umweltsatelliten werden deshalb auch zunehmend für die gleichzeitige Sammlung und Übertragung der In-situ-Messungen automatischer Plattformen (DCPs) genutzt.

3.1.3. Aktive Sensoren

Auf einige grundsätzliche Besonderheiten aktiver Fernerkundungssensoren war bereits in 3.1.1. kurz hingewiesen worden. Zwei Grundtypen aktiver Sensoren müssen unterschieden werden: Radar- und Lidarsysteme. Radarsensoren (engl.: radio detecting and ranging) arbeiten im Mikrowellenbereich ($8 \text{ mm} < \lambda < 30 \text{ cm}$, $1 \text{ GHz} < f < 40 \text{ GHz}$). Auf Grund der in 2.2.2. beschriebenen Ausbreitungseigenschaften der Mikrowellen (s. Abb. 19 und 20) sind sie auch bei Dunst, Nebel und Wolkenbedeckung einsetzbar (Allwetterfähigkeit). Unter den Radarsystemen werden solche mit realer und synthetischer Apertur unterschieden. Ihre theoretischen Grundlagen wie auch technische Details sind ausführlich in [8] dargestellt. Nachfolgend soll deshalb nur das Prinzip verständlich gemacht werden. Lidarsensoren (engl.: light detection and ranging) arbeiten im Bereich optischer Wellenlängen (ultraviolette, sichtbares und infrarotes Licht). Gegenüber passiven Sensoren im Bereich optischer Wellenlängen haben sie den entscheidenden Vorteil, daß sie auch nachts eingesetzt werden können. Allerdings erfordern sie ebenfalls klaren Himmel. Für Erdressourcenerkundungen haben Lidarsensoren bisher keine Bedeutung erlangt. Deshalb wird auf sie hier nicht eingegangen.

3.1.3.1. Radarsensoren mit realer Apertur

Abb. 31 gibt ein Funktionsschema eines Radarsystems mit realer Apertur (engl.: SLR - Side-looking Radar). Die Szene wird seitwärts blickend quer zur Flugrichtung streifenweise durch das von der Antenne ausgestrahlte Radarsignal "beleuchtet". Auf Grund der unterschiedlichen, von der Flughöhe und dem Beleuchtungs- bzw. Depressionswinkel δ abhängigen Laufzeit der Radarechos ergibt sich ein räumliches Nacheinander der mittels einer synchrongesteuerten Kathodenstrahlröhre auf Film aufgezeichneten Reflexionselemente. Dabei hängt das in Querrichtung erreichte Auflösungsvermögen A_q entscheidend von der Dauer τ_{imp} des Radarimpulses ab. Kurze Impulsdauer bedeutet somit hohe Querauflösung (engl.: across-track resolution). Das erfordert aber eine große Bandbreite B des Senders und Empfängers ($B \approx 1/\tau_{\text{imp}}$). Bei ausreichend großem Abstrahlwinkel des Signals gegen die Vertikale (d. h. kleinem Depressionswinkel) gilt mit c als der Lichtgeschwindigkeit

$$(10) \quad A_q \approx \frac{c}{2} \cdot \tau_{\text{imp}} \cdot$$

In der Radarerkundung vom Flugzeug aus eingesetzte kommerzielle Systeme mit realer Apertur erreichen typische Werte für A_q zwischen etwa 10 m und 30 m (Abb. 32).

Die Größe des Radar-Bildelements wird außer von A_q noch durch die Breite des Radarstrahlstrahls bestimmt. Sie hängt ab vom Öffnungswinkel δ des Strahls und dem Abstand R zwischen Bodenobjekt und Antenne. δ seinerseits hängt ab von der realen Apertur der Radarantenne, d. h. vom Verhältnis der Radarwellenlänge λ zur Länge l der Antenne. Damit gilt für das azimutale Auflösungsvermögen in Flugrichtung (engl.: along-track resolution)

$$(11) \quad A_{\text{az}} \approx R \cdot \lambda / l \cdot$$

A_{az} verändert sich folglich innerhalb des Blickfelds proportional mit R (s. Abb. 32). Typische Werte für A_{az} für kommerzielle Flugzeug-Radarsysteme mit realer Apertur liegen derzeit zwischen 10 m und 50 m im Nahbereich und 20 m bis 100 m im Fernbereich des

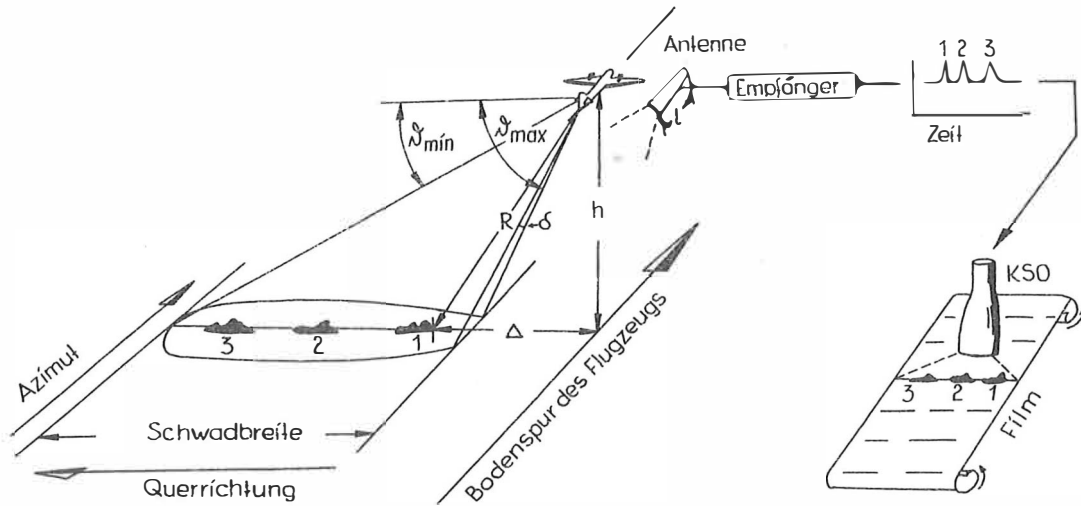


Abb. 31. Funktionsweise eines seitwärtsblickenden Flugzeugradars mit realer Apertur. KSO - Kathodenstrahlloszillograph (nach KOOPMANS [40])

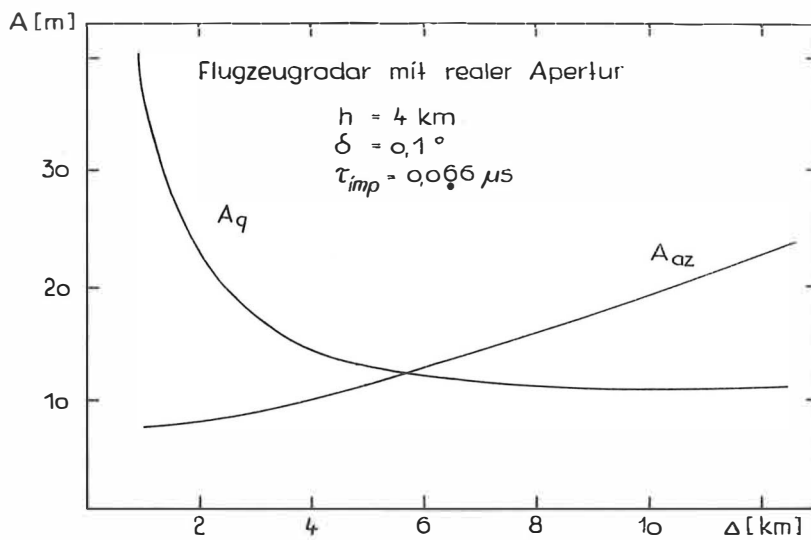


Abb. 32. Querauflösung A_q und azimutale Auflösung A_{az} eines seitwärtsblickenden Flugzeugradars mit realer Apertur als Funktion des Abstandes von der Bodenspur des Flugzeugs (nach KOOPMANS [40])

Blickfelds. Der Bildmaßstab von Flugzeug-Radaraufnahmen ist entsprechend klein (ca. 1:250 000 bis 1:500 000). Er ist vergleichbar mit dem hochauflösender Scanner- und RBV-Systeme in Erkundungssatelliten bei meist schmalere Aufnahmestreifen (ca. 10 bis 100 km). Natürlich ist der Radarrichtstrahl nicht scharf begrenzt sondern wird durch eine Energieverteilungsfunktion charakterisiert, die oft neben einem Hauptmaximum auch noch Nebenmaxima aufweist. Folglich ist auch das geometrische Auflösungsvermögen eines gegebenen Radarsensors keine quantitativ eindeutig fixierte Größe. Vielmehr gibt es ebensoviele Definitionen des geometrischen Auflösungsvermögens eines Radarsensors wie es Maßzahlen zur Charakterisierung der Breite einer Extremwertfunktion gibt. Am weitesten verbreitet ist die sogenannte 3dB-Definition. Danach wird als geometrisches Auflösungsvermögen die Entfernung zwischen zwei Punkten der Energiereaktionsfunktion (engl.: power response function) des Radarrichtstrahls angegeben, an denen die Signalstärke gegenüber dem Maximum um 3dB, d. h. auf die Hälfte des Maximalwertes abgesunken ist (Halbwertsbreite). Auch bei Radarsystemen sind geometrisches und radiometrisches Auflösungsvermögen eng miteinander verknüpft, wobei letzteres stark von der Sendeleistung des aktiven Sensors abhängt. Auf diese Fragen wie auch die verschiedenen exakten Definitionen des Auflösungsvermögens von Radarsensoren kann hier nicht im Detail eingegangen werden. Eine ausführliche und systematische Darstellung gibt ein von der UNO-Weltraumabteilung herausgegebener Bericht [49].

Obgleich die meisten Radarsysteme nur mit horizontalpolarisierten Signalen arbeiten (HH), gibt es auch solche, die sowohl horizontal- als auch vertikalpolarisierte Wellen senden und empfangen können (HH, HV, VH, VV). Die kartographische Nutzung von Radaraufnahmen und ihre Zusammensetzung zu Bildmosaiken wird erschwert durch die starke Abhängigkeit der Bildelementgröße vom Depressionswinkel. Dazu kommen starke Schattenbildung und Pseudo-Reliefverschiebungseffekte in Gelände mit ausgeprägter Morphologie. Die Radarschatten heben geologisch-geomorphologische Strukturen wie Verwerfungen, Rücken, Falten, Dome, Mulden etc. hervor und erleichtern somit ihre Erkennbarkeit auch wenn sie von Vegetation überdeckt oder durch Erosionseinflüsse verwischt sind. Andererseits gehen durch die Schlagschattenbildung Daten verloren. Die Pseudo-Reliefverschiebung ist bedingt durch die laufzeitproportionale ebene Abbildung der Radarechos auf dem Registrierfilm. Radarechos von "luvseitig" gelegenen Punkten einer topographischen Erhebung treffen früher als die von den korrespondierenden "Fußpunkten" (senkrechte Projektion der Geländepunkte auf die Kartenebene) theoretisch zu erwartenden Echos ein. Deshalb erscheinen im Radarbild die dem Sensor zugewandten Hänge steiler, bei großer Hangneigung u. U. sogar überkippt. Dementsprechend sind auch die Hangflächen verzerrt und die kartographischen Positionen von Gipfel und Graten verfälscht. Beide Effekte lassen sich durch Doppelbeobachtung des Geländes aus entgegengesetzten Richtungen weitgehend kompensieren. Solche Doppelbeobachtungen können am einfachsten und billigsten von Radarsystemen durchgeführt werden, die gleichzeitig in beide quer zur Flugrichtung gelegene Richtungen beobachten. Eine andere wichtige Eigenschaft moderner SLR-Systeme ist die Anpassung des Depressionswinkels bzw. der Flughöhe des Sensors an die Geländegegebenheiten ohne daß dabei die Schwadbreite oder der Bildmaßstab geändert wird (s. z. B. [41]).

Die Interpretation der Intensität von Radarechos wird wesentlich kompliziert durch deren starke Winkelabhängigkeit, die oftmals noch unzureichende Langzeitstabilität und damit im Vergleich zum (relativen) radiometrischen Auflösungsvermögen wesentlich schlechtere absolute radiometrische Genauigkeit der aktiven Radarsensoren sowie durch den Umstand, daß z. Z. für kommerzielle Zwecke meist nur Systeme zur Verfügung stehen, die in

ein bis zwei Frequenzbändern arbeiten. Gegenüber Beobachtungen im Bereich optischer Wellenlängen bieten die Eigenschaften der Radarwellen zur völligen oder teilweisen Durchdringung der Vegetationsbedeckung, ihre größere Eindringtiefe in den Boden sowie die starke Abhängigkeit der Radarechos von der Struktur, Textur und den dielektrischen Eigenschaften der reflektierenden Objekte für die Interpretation prinzipiell wichtige Zusatzinformationen. Die komplexe Wechselwirkung der verschiedenen Faktoren ist aber bis heute – vor allem quantitativ – noch zu wenig bekannt, um diese Eigenschaften voll nutzen zu können. Die richtige Deutung der Intensitätssignaturen von Radarreflexionen erfordert deshalb noch umfangreiche Grundlagenforschungen und aufwendige ergänzende Bodenbeobachtungen. Ein überzeugendes Beispiel, das die Schwierigkeiten der Interpretation von Radarbildern verdeutlicht, gibt BANYARD [37]. Vergleichende forstwirtschaftliche Auswertungen von Radarbildern und Luftbildfotos durch eine große Gruppe von Interpreta-toren ergaben, daß zwar in den Radaraufnahmen die Physiographie des Geländes deutlich erkennbar war, jedoch eindeutig weniger Forsttypen unterschieden werden konnten und die Ergebnisse stärker von subjektiven Faktoren abhingen.

Auf die Einheit der erkundeten Flächen bezogen sind die durch Radarbefliegungen gewonnenen Fernerkundungsdaten um etwa zwei Größenordnungen teurer als multispektrale Daten automatischer Scannersatelliten mit annähernd gleicher Auflösung (vgl. [54], [55]). Radarbefliegungen sind deshalb für operative zivile Anwendungen ökonomisch nur vertretbar bei Erkundungen sehr großer ($> 10^6 \text{ km}^2$) und vorwiegend flacher Territorien mit fast ständiger Wolkenbedeckung. Allerdings sind gelegentliche Radarbefliegungen über ausgewählten Testgebieten im Hinblick auf die Erarbeitung des notwendigen wissenschaftlich-methodischen Vorlaufs zur Nutzung zukünftiger Radarsatellitendaten auch für andere Länder wünschenswert. Das rechtfertigt aber, insbesondere für kleine Länder, in der Regel nicht die Anschaffung eigener spezieller Radarkerkundungsflugzeuge. Dagegen bieten sich komplexe Missionen in Kooperation mit Nachbarstaaten an, um diese aufwendige Technik auch kosteneffektiv zu nutzen.

Für die Satellitenfernerkundung sind Radarsensoren mit realer Apertur wegen des dann wesentlich schlechteren azimutalen Auflösungsvermögens nicht sinnvoll einsetzbar. Dagegen eröffnen Radarsysteme mit synthetischer Apertur völlig neue Möglichkeiten für die aktive Satellitenfernerkundung.

3.1.3.2. Radarsensoren mit synthetischer Apertur

Radarsensoren mit synthetischer Apertur (engl.: SAR – Synthetic Aperture Radar) nutzen relativ kurze Antennen mit entsprechend weitem Richtstrahl. Dadurch werden von einem bewegten Sensor vom gleichen Bodenobjekt eine Vielzahl von Radarechos aus verschiedenen Positionen empfangen. Sowohl die Amplitude als auch die Phase der zurückkommenden Signale wird elektronisch gespeichert und zwar für die Zeitdauer, in der die Objekte im Abstand R von der Antenne im Bereich des Antennenrichtstrahls liegen. Die während dieser Zeit zurückgelegte Flugstrecke AB entspricht der Länge L des synthetischen Arrays (Abb. 33). Es gilt folglich

$$(12) \quad L \approx R \cdot \lambda / l .$$

Die auf Grund der Relativbewegung zwischen Flugzeug und Objekt verursachte Dopplerverschiebung des zurückkommenden Signals wird mit der Frequenz und Phasenlage eines stabilen

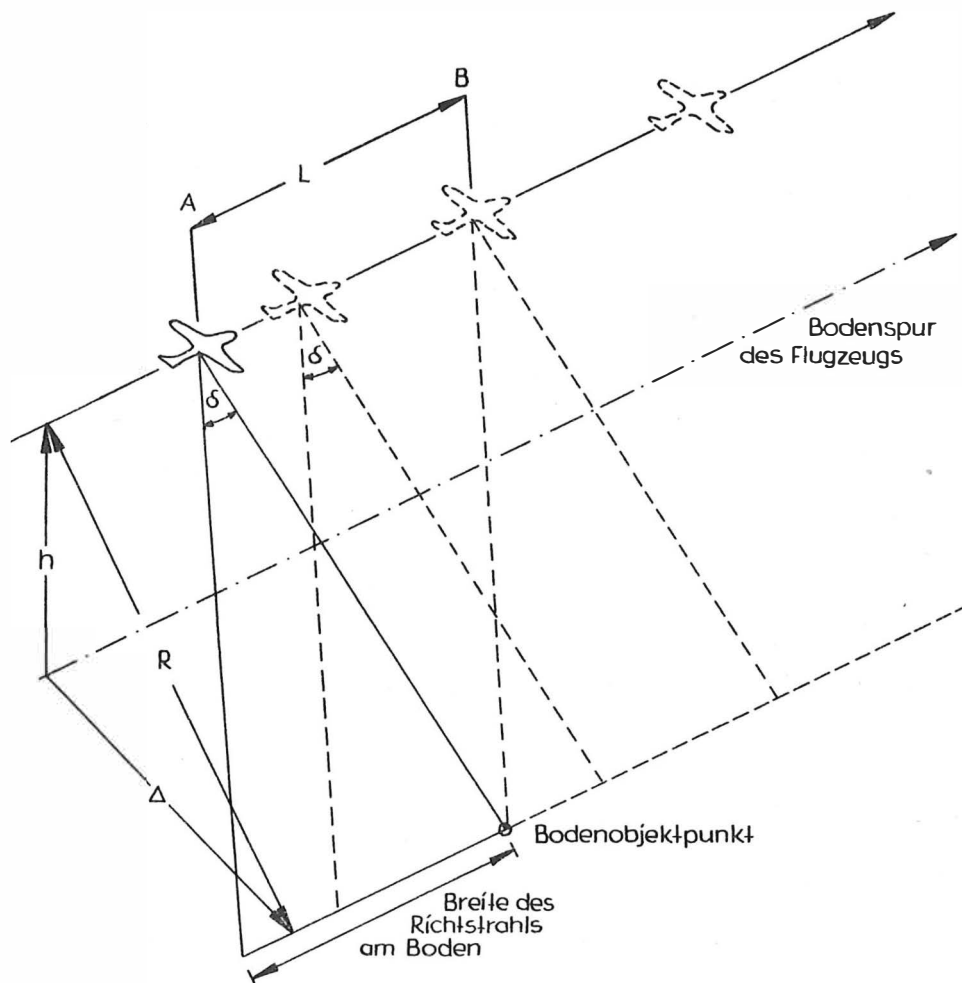


Abb. 33. Veranschaulichung der Formierung der synthetischen Arraylänge L

Oszillators verglichen. Das Interferenzsignal kann entweder in Form eines Hologramms auf Film oder auf Magnetband aufgezeichnet werden. Die Wiederherstellung des Bildes erfolgt mit Hilfe kohärenter optischer (Laser-)Prozessoren oder mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen. Im so bearbeiteten Radarbild ergibt sich somit ein Objektpunkt aus der kohärenten Summierung einer Vielzahl individueller Radarechos, wobei sich positive und negative Dopplerverschiebungen aufheben.

Die Querauflösung A_q von SAR- und SLR-Systemen ist in gleicher Weise von der Impulsdauer abhängig. Für das azimutale Auflösungsvermögen A'_{az} eines SAR-Sensors ergibt sich dagegen mit (12) analog zu Beziehung (11) in 3.1.3.1.

$$(13) \quad A'_{az} \approx R \cdot \lambda / L \approx R \cdot \lambda / (R \cdot \lambda / l) \approx l$$

Genauer gilt allerdings $A'_{az} \approx l/2$. Der Faktor $1/2$ trägt dem Unterschied zwischen dem synthetischen Radarrichtstrahl, der sowohl bei der Sendung als auch dem Empfang und dem realen Richtstrahl, der nur beim Empfang gebildet wird, Rechnung. Für den Fall, daß $L < R \cdot \lambda / l$ gewählt wird, ist $A'_{az} > l/2$. In jedem Falle aber gilt der überraschende Fakt, daß A'_{az} von der verwendeten Wellenlänge und der Entfernung Antenne-Objekt unabhängig ist. Sie wird ganz im Gegensatz zu SLR-Systemen umso besser, je kleiner die

Sendeantenne ist. Allerdings sind der Verwendung beliebig kleiner Antennen praktische Grenzen gesetzt, da sich mit wachsendem Blickfeld und damit L auch die Integrationszeit und Zahl der zu summierenden Radarechos und folglich die Anforderungen an die Datenspeicherung, -übertragung und -verarbeitung ebenfalls erhöhen. Durch geeignete Phasenverschiebungsfilterung kann zusätzlich der Einfluß der sphärischen Krümmung der Wellenfront eliminiert werden. Durch diese sogenannte Richtstrahlfokussierung wird eine weitere Verbesserung des azimutalen Auflösungsvermögens von SAR-Systemen erreicht. Allerdings verlangt ein sehr hohes Auflösungsvermögen eine extrem stabile räumliche Orientierung, Geschwindigkeit und gerade Flugrichtung der Sensorplattform. Damit ist offensichtlich, daß das Auflösungsvermögen von SAR-Systemen nicht nur durch sensorinhärente Parameter, sondern auch durch die Verfahren zur Datenspeicherung und -bearbeitung sowie zur Bahn- und Lagestabilisierung der Sensorplattform beeinflusst wird. Das geometrische Auflösungsvermögen kommerziell genutzter SAR-Lufterkundungssysteme ist in der Regel nicht besser als 8 - 10 m. Bezüglich der genauen Definitionen des geometrischen und radiometrischen Auflösungsvermögens sowie weiterer Leistungskriterien von SAR-Systemen sei auf [46] verwiesen.

SAR-Erkundungen sind, wenn man auch die Datenbearbeitungskosten berücksichtigt, um ein Vielfaches teurer als Erkundungen mit SLR. Ein großer Vorteil ist, daß sowohl die optische Bearbeitung analog registrierter Daten auf Hologrammfilmern als auch die numerische Bearbeitung digitaler SAR-Daten eine leichte Manipulation und Korrektur des Bildmaßstabs gestattet. Longitudinale Maßstabfehler können durch numerische Bearbeitungsverfahren beseitigt werden, so daß auch die Herstellung von Radarmosaiks möglich wird. Darüber hinaus gestatten holographische SAR-Daten die Verwendung einer abstimmbaren kohärenten Lichtquelle (Farbstofflaser) im optischen Prozessor (Korrelator). Das ermöglicht die Herstellung von Falschfarben-Radarbildern und eine entsprechende wesentliche Erweiterung des für die visuelle Auswertung nutzbaren radiometrischen Dynamikbereichs.

SAR-Sensoren an Bord von Satelliten vermögen vergleichbar gute oder sogar noch bessere geometrische Auflösung zu erzielen als von Flugzeugen aus. Der Grund dafür ist, daß sowohl A_q als auch A'_{az} von R unabhängig sind und die stabile Flugbahn des Satelliten die Signalintegration über relativ lange Bahnabschnitte von mehreren km ermöglicht. Dabei muß zur Rekonstruktion der Szene die Position der individuellen Elemente des synthetischen Arrays entlang des Integrationsweges auf $\lambda/4$ genau bekannt sein. Die Sicherung der hohen Bahnkonstanz erfordert häufige Bahnkorrekturen und damit einen hohen Treibstoffbedarf. Nach WHITE [56] wurden für einen im X-Band ($f \approx 10$ GHz) betriebenen SAR-Satelliten folgende theoretische Werte für die geometrische Auflösung berechnet:

- a) bei realer Apertur: 2,8 km
- b) bei nicht fokussierter synthetischer Apertur: 140 m und
- c) bei fokussierter synthetischer Apertur: 4 m.

Bereits erprobte bzw. geplante SAR-Satelliten erreichen im L- bzw. C-Band ($5 \text{ cm} < \lambda < 25 \text{ cm}$) ein geometrisches Auflösungsvermögen zwischen etwa 20 m und 50 m. Ebenso wie im Falle von Scanneraufnahmen können auch in Radarbildern noch wesentlich kleinere Objekte festgestellt werden. Voraussetzung ist, daß sie einen hohen Dielektrizitätskontrast gegenüber ihrer Umgebung aufweisen. Allerdings können zwei solcher Objekte nicht mehr unterschieden werden, falls sie in das gleiche Auflösungselement fallen. Von entscheidendem Vorteil gegenüber Flugzeugradarsystemen ist der nahezu konstante, relativ steile

Blickwinkel von SAR-Satelliten (z. B. für SEASAT $\alpha = 23^\circ \pm 3^\circ$). Dadurch verbessern sich wesentlich die Möglichkeiten zur quantitativen Auswertung der Intensität von Radarreflexionen sowie auf Grund der großen Flughöhe der Plattform auch die Nutzung von SAR-Satelliten für Kartierungszwecke im Gelände mit beliebiger Morphologie.

Im Sommer 1978 starteten die USA den Satelliten SEASAT. Er verfügte u. a. über ein kohärentes L-Band-Bildradar (Bodenauflösung ca. 25 m). Die geplante aktive Nutzungsdauer des Satelliten betrug 1 Jahr, doch bereits 15 Wochen nach dem Start brach das Übertragungs- und/oder Energieversorgungssystem des Satelliten infolge eines Kurzschlusses zusammen [58], [61]. Die Leistungsaufnahme aktiver Satellitensensoren ist sehr hoch (etwa 1 bis 2 kW). Deshalb konnte auch das kohärente Bildradar von SEASAT täglich nur etwa 1 Stunde eingeschaltet werden. Dennoch waren bei einer Datenrate von etwa 120 Mbit/s die zu bearbeitenden Datenmengen und die Vielzahl von Datenkorrekturen (z. B. für die Erdrotation, Erdkrümmung, Wellenbewegung etc.) so groß, daß trotz modernster Computertechnik täglich nur etwa 6 Aufnahmeminuten, d. h. etwa 10 % der täglich registrierten Datenmenge interpretationsgerecht aufbereitet werden konnte. Die Vergrößerung der Energiebereitstellung an Bord des Satelliten und die Lösung des Empfangs und der Bearbeitung extrem großer Datenströme sind somit entscheidend für die operative Nutzung von SAR-Satelliten. Für Vegetationsstudien werden Radardaten zudem erst dann ein effektives Hilfsmittel sein, wenn SAR-Sensoren mit mehreren Frequenzen und Polarisierungen zur Verfügung stehen. Im Falle nur einer Frequenz sind die Möglichkeiten für land- und forstwirtschaftliche Anwendungen sehr eingeschränkt und umfangreiche Bodenmessungen unumgänglich. Allerdings können durch wiederholte (von Wetter- und Beleuchtungsbedingungen unabhängige) SAR-Beobachtungen zeitliche Variationen von Vegetationstexturen erfaßt werden, die bis zu einem gewissen Grade auch deren Identifizierung gestatten. Generell wird die beste Unterscheidbarkeit von Objekten in Radaraufnahmen erreicht, wenn neben der Textur auch das radiometrische Niveau der Objekte berücksichtigt wird. Auch durch parallele Gewinnung von Fernerkundungsdaten mittels passiver Sensoren im optischen Bereich im Falle wolkenfreier bzw. -armer Tageslichtszenen wird die Objektidentifizierung wesentlich erleichtert.

Inwieweit mit Hilfe von SAR-Satelliten in Zukunft großräumige und wiederholte Erkundungen von Gebieten mit dominierender Wolkenbedeckung einfacher, schneller und billiger ausgeführt werden können als mit Flugzeugradar oder erdgebundenen Mitteln müssen zukünftige Experimente zeigen. Übertriebene Erwartungen auf kurze Sicht sind nicht berechtigt. Nach [160] bestehen selbst für die Realisierung und Nutzung von 1-Frequenz-Satelliten-SAR noch eine Vielzahl grundsätzlicher sowie technischer und administrativer Probleme. Neben dem bereits erwähnten hohen Energieverbrauch und den hohen Datenraten der Sensoren sowie dem erheblichen Aufwand für die fokussierte Datenbearbeitung ehe ein Radarbild verfügbar ist, werfen auch die hohen Anforderungen an die Antennengröße (ca. 10 m), deren Ebenmäßigkeit (auf wenige mm genau) und Orientierungsgenauigkeit schwierige technische Fragen auf. Dazu kommen noch zahlreiche ungelöste Fragen auf technologischem Gebiet, der Umstand, daß die Frequenzvorschriften der Internationalen Union für Rundfunkwesen (ITU) bisher keine Nutzung von SAR-Satelliten vorsehen sowie das Problem, daß eine Flugzeugtestung von Satelliten-SAR-Systemen auf Grund der unterschiedlichen Fluggeschwindigkeiten nicht möglich ist. Auch ist bisher noch nicht ganz klar wie groß die Fehler sind, die durch die vorausgesetzte Homogenität des Ausbreitungsmediums Ionosphäre-Troposphäre während der Integrationszeit von etwa 0,5 bis 1 Sekunde eingeführt werden.

3.2. Bodensysteme für den Empfang, die Vorverarbeitung und die Verteilung von Satellitendaten

Stationen für den Direktempfang analoger Daten automatischer Wettersatelliten, sogenannte APT- (Automatic Picture Transmission) oder WEFAX-Stationen (Weather Facsimile) sind relativ billig (einige 1000 US\$) und weit verbreitet. Nach [61] werden inzwischen über 220 APT-Stationen von nationalen meteorologischen Diensten betrieben. Es gibt Pläne für die Errichtung zusätzlicher Stationen. Des Weiteren verfügen zahlreiche Agenturen, Erkundungsbetriebe, Expeditionen, Schiffe etc. über entsprechende Empfangseinrichtungen. Außerdem existieren in einer Reihe von Ländern kostspieligere spezialisierte Einrichtungen für den Direktempfang und die Verarbeitung digitaler Daten mit vollem Auflösungsvermögen von geostationären und polnah umlaufenden meteorologischen Satelliten.

Man kann von der Existenz eines globalen operativen Wettersatellitendienstes sprechen. Zu seinen Daten haben prinzipiell alle Länder direkten Zugang. Die Weltraumsegmente sind Eigentum nationaler Institutionen. Gleiches gilt in der Regel auch für die Bodensegmente, obgleich auch zahlreiche private APT- oder WEFAX-Stationen existieren, insbesondere auf Schiffen privater Kompanien. Fragen der Nutzung der nationalen Weltraum- und Bodensegmente, der Standardisierung, Gewinnung, Archivierung und des weltweiten Austauschs der gewonnenen Daten sowie deren Nutzung im Rahmen weltweiter oder regionaler Forschungsprojekte werden in einer Spezialorganisation des UNO-Systems, der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) diskutiert und entsprechende Aktivitäten der Staaten z. B. im Rahmen der Weltwetterwacht (WWW) und des Globalen Atmosphärischen Forschungsprogramms (GARP) koordiniert. Detaillierte Vorstellungen zur Rolle von Satellitenbeobachtungen in den WMO-Programmen der 80er Jahre einschließlich der Aufgaben und Formen der Zusammenarbeit der globalen, regionalen, spezialisierten und nationalen Datenzentren sind in [63] dargestellt. Gegenwärtig unterstützen die UdSSR, die USA, Japan und die ESA mit ihren Wetter- bzw. Umwelt-Satellitenprogrammen aktiv das Globale Beobachtungssystem (GOS) der Weltwetterwacht.

Auf dem Gebiet der Erdressourcenfernerkundung aus dem Weltraum gibt es kein vergleichbares operatives und weltweit koordiniertes System. Außer einer Vielzahl kurzer Fernerkundungstestexperimente an Bord verschiedener bemannter sowjetischer und US-amerikanischer Weltraumflugkörper gibt es bisher nur zwei längerfristige, systematische Satelliten-Erderkundungsmissionen: LANDSAT (US) und SALJUT/MKF-6 M (UdSSR). Das seit 1972 laufende automatische LANDSAT-System hat trotz des ausdrücklich proklamierten experimentellen Charakters bereits quasi-operative Merkmale. Die Vorverarbeitung, Annotation und Repräsentation von LANDSAT-Daten ist weitgehend standardisiert und das System der Datenspeicherung, -katalogisierung, -bereitstellung und -verteilung entwickelt. 10 Stationen für den Direktempfang der Daten dieses Systems arbeiten inzwischen auf fünf Kontinenten. Einige Details sind [64] zu entnehmen. Weitere Länder planen die Errichtung nationaler bzw. regionaler Datenempfangsstationen. Ausführliche Darstellungen zur Technik und Organisation von Bodensegmenten für den Empfang, die Analyse und die Verteilung der Daten automatischer Erdressourcensatelliten werden in [65] und [66] gegeben. Abb. 34 illustriert die Grundelemente eines Bodensegments für ein mit digitalen Primärdaten gespeistes automatisches Erdressourcenerkundungssystem.

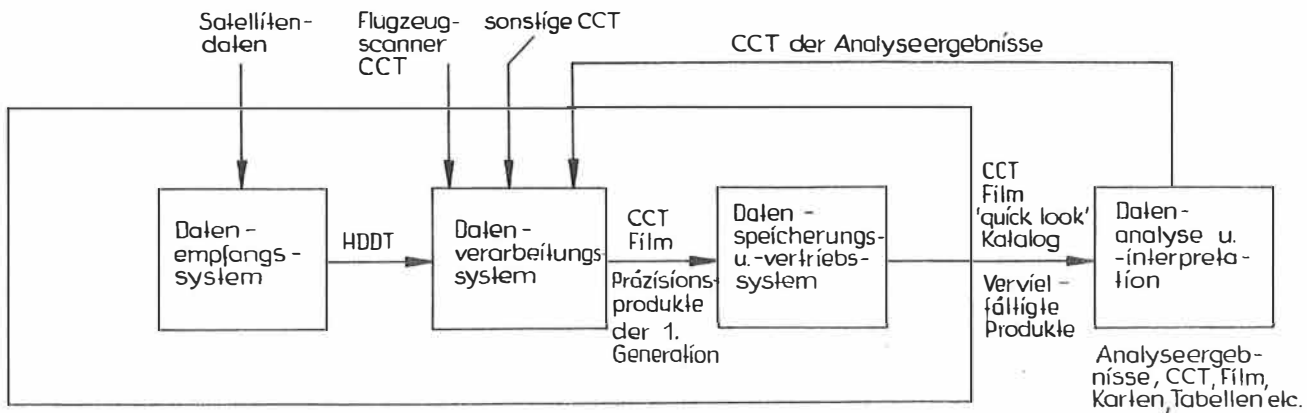


Abb. 34. Grundelemente eines Bodensegments für den Empfang und die Verarbeitung digitaler Fernerkundungsdaten. CCT - rechnerkompatible Datenbänder, HDDT - Datenbänder sehr hoher Belegungsichte (vereinfacht nach BEILOCK [66])

Zu den wichtigsten Aufgaben des Datenverarbeitungssystems eines kompletten Bodensegments der Satellitenfernerkundung gehört die Herstellung von Präzisionsprodukten der 1. Generation auf rechnerkompatiblen Magnetbändern bzw. Film. Durch radiometrische Korrektur der direkt empfangenen digitalen Daten werden Empfindlichkeits- und Niveauunterschiede der Sensoren sowie Fehler beseitigt, die aus dem Aufzeichnungs- und Bearbeitungsprozess resultieren. Die radiometrische Vergleichbarkeit der Daten ist eine entscheidende Voraussetzung für die Möglichkeit zur korrekten Nutzung von digitalen radiometrischen Klassifizierungsalgorithmen, der Bildung von Intensitätsverhältnissen verschiedener Spektralbänder etc. Die geometrische Korrektur der Daten beseitigt Maßstabsfehler infolge Schwankungen der Bahnhöhe, Geschwindigkeit und Orientierung des Satelliten sowie Bildverzerrungen infolge Erdrotation und mechanischer Scanfehler. Durch ergänzende digitale Bearbeitung können Bild- und Magnetband-Datenprodukte gewonnen werden, die bezüglich jeder beliebigen Standardkartenprojektion geometrisch korrigiert sind. Präzisionskorrigierte Daten gestatten die exakte geographische Zuordnung eines jeden Bildelements. Das ist u. a. wichtig beim bildpunktweisen Vergleich spektraler Veränderungen in multitemporalen Aufnahmeserien.

Anfangs verfolgten einige Länder das Konzept der räumlichen Trennung von Empfangs- und Registrierstation einerseits und Datenverarbeitungs-, -speicher- und -vertriebssystem andererseits. Anliegen einer solchen Trennung waren bezüglich der Empfangseinrichtungen oft Gesichtspunkte der Kostenreduzierung durch Nutzung bereits vorhandener Satelliten-Telemetriestationen in entfernt gelegenen Gebieten bzw. Realisierung eines maximalen Überdeckungsradius und Reduzierung von Radiointerferenzen. Letztere können in dichtbesiedelten und hochindustrialisierten Landesteilen sehr störend sein. Für das arbeitskräfte- und intelligenzaufwendige Datenverarbeitungs-, -speicher- und -vertriebssystem wurde dagegen eine zentrale Lage z. B. in einer großen Stadt bevorzugt, um auf ein großes Reservoir wissenschaftlich-technischer Kader zurückgreifen zu können. Die räumliche Trennung von Empfangs- und Bearbeitungseinrichtungen führte jedoch zu oft mehrwöchigen Zeit-

verzögerungen zwischen der Datengewinnung und der Datenbereitstellung für den Nutzer. Der entscheidende Vorteil der automatischen Gewinnung von Satelliten-Scannerdaten in Realzeit war damit für viele operative Aufgabenstellungen nicht mehr nutzbar. Es erwies sich deshalb als vorteilhaft, bereits an der Empfangsstation neben der Registrierung der Daten auf Video-Bändern hoher Belegungsdichten mit Hilfe eines Zusatzsystems auch fotografische Produkte reduzierter Auflösung, sog. "quick-look"-Aufnahmen, herzustellen. Diese Produkte können entweder bereits am Tage nach der Aufnahme auf dem Postwege verschickt oder als Faksimile bereits wenige Stunden nach dem Überflug des Satelliten an die Nutzer gesendet werden. Für viele Anwendungszwecke ist dieses schnelle Datenerstprodukt bereits ausreichend, so daß nur noch ein Teil der ursprünglich aufgezeichneten Daten mit voller Auflösung bearbeitet werden muß. Inzwischen geht der Trend zur Entwicklung transportabler vollintegrierter Bodenstationen geringer Abmessungen und Kosten, die sowohl Scannerdaten von meteorologischen als auch Erdrössourcensatelliten am gleichen Ort empfangen und bearbeiten können und die Herstellung wie auch Lieferung geometrisch korrigierter digitaler und fotografischer Produkte voller Auflösung übernehmen können. Durch hochflexible Modulbauweise wird nicht nur die schnelle Installation und Inbetriebnahme sondern auch die leichte Anpassung solcher Stationen an sich verändernde Technologien und Nutzerbedürfnisse gewährleistet.

Im Falle eines photographischen Satellitenfernerkundungssystems vereinfachen sich viele Probleme des Bodensegments entscheidend. Empfangsstationen werden nicht benötigt. Die Datenerfassung ist in jedem Falle zentralisiert. Die Rohdaten liegen in analoger Form mit maximaler Auflösung als latente Filmaufnahmen vor. Die Qualität und Effektivität des Filmentwicklungs-, Kopier- und Versandprozesses entscheidet wesentlich darüber, ob den Nutzern Aufnahmen rechtzeitig und in hoher Qualität zur Verfügung gestellt werden können. Die Lösung dieser Aufgabe ist vergleichsweise einfach und billig, insbesondere wenn man sie mit den unvergleichlich größeren Aufwendungen und Risiken des in der Regel damit direkt oder indirekt verbundenen bemannten Weltraumsegments vergleicht. Andererseits entscheidet die Qualität und Effektivität gerade des Bodensegments über den Nutzen der gesamten Mission. Die vorausschauende Planung und Entwicklung eines hocheffektiven Datenerfassungs-, -bearbeitungs- und -vervielfältigungskomplexes, der in seinen technischen und Qualitätsparametern denen des Aufnahme- und Interpretationskomplexes entspricht, muß deshalb integraler Bestandteil der Planung und Entwicklung fotografischer aerokosmischer Fernerkundungssysteme sein.

Für eine umfassende Nutzung hochauflösender fotografischer Satellitenaufnahmen großer Abbildungstreue anstelle von bzw. ergänzend zu digitalen Primärdaten direktübertragender Satelliten spricht auch, daß gegenwärtig für die meisten Entwicklungsländer Kartierungsanwendungen der Satellitenfernerkundung noch Vorrang haben vor Überwachungsaufgaben in Realzeit, die den Einsatz aufwendiger Empfangs- und Datenverarbeitungstechnik erfordern. Die in der UNO von Entwicklungsländern erhobene Forderung nach einem "minimum needs"-Programm [7] der Satellitenfernerkundung könnten auf der Grundlage des sowjetischen Systems bemannter und unbemannter fotografischer sowie automatischer meteorologischer Satelliten nach Ansicht des Verfassers im Prinzip besser befriedigt werden als auf der Grundlage der hochgezüchteten technologischen Konzepte, wie sie von den USA, Japan und

der (West-)Europäischen Weltraumbehörde (ESA) verfolgt werden. Nach [7] hat die UdSSR in Moskau zwei Zentren für die Sammlung, Bearbeitung und Verteilung von Satelliten-Fernerkundungsdaten an interessierte Länder eingerichtet. Nach [64, Add. 1] empfangen und bearbeiten diese Zentren täglich etwa 100 Aufnahmen von experimentellen aerokosmischen Fernerkundungssystemen sowie umfangreiches Material aus zahlreichen Testgebieten. Des Weiteren ist nach [64, Add. 1 und 5] die Errichtung verschiedener regionaler Zentren für den Empfang von Satellitendaten zur Überdeckung des gesamten Territoriums der UdSSR sowie die Schaffung eines Netzes vereinfachter Empfangsstationen vorgesehen. Dem Bericht der 16. Sitzung des STSC des COPUOS [61] ist zu entnehmen, daß die UdSSR kontinuierlich neben Aufnahmen grober Auflösung (IFOV ca. 1000 m) auch solche mittlerer Auflösung (IFOV ca. 100 m) von operativen METEOR-Satelliten empfängt bzw. empfangen wird. Fotografische Aufnahmen feiner Auflösung werden außer mit bemannten Raumschiffen auch von automatischen fotografischen Satelliten gewonnen.

3.3. Nutzerzentren für die Interpretation von Fernerkundungsdaten

Neben Zentren für den Empfang, die Vorverarbeitung, Speicherung und Verteilung von Fernerkundungsdaten und methodisch-diagnostischen Zentren an Forschungseinrichtungen zur Sicherung des methodischen und naturwissenschaftlichen Vorlaufs sind Interpretationslaboratorien für verschiedene Nutzerbereiche erforderlich. Ihre Ausrüstung muß der Spezifität oder Komplexität der zu lösenden Aufgaben sowie den personellen, materiellen, wissenschaftlich-technischen und organisatorisch-infrastrukturellen Randbedingungen des jeweiligen Landes angepaßt sein.

Die Vielzahl von Geräten, die für die Bearbeitung und Interpretation von Fernerkundungsdaten genutzt werden kann, wächst rapide. Sie reicht von einfachen billigen Geräten für die visuelle Interpretation bis zu großen, teuren und sehr schnellen Spezialrechnern für die vollautomatische oder interaktive Datenbearbeitung. Eine umfassende Einführung in Geräte und Ausrüstungen aller Kategorien für die Analyse von Fernerkundungsdaten gibt NDUAGUBA [87] in einem von der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der UNO (FAO) herausgegebenen Informationszirkular. Beispiele für preiswerte analoge und digitale Bildbearbeitungssysteme sind einem Informationspapier des UNO-Sekretariats an den Unterausschuß Wissenschaft und Technik des COPUOS zu entnehmen [79]. Interpretationsgeräte der Firma VEB Carl Zeiss Jena für die visuelle Bildauswertung sind in [77] zusammengestellt. Beispiele zeigen die Abbildungen 36 und 37. Allerdings erfordert die rapide technische Entwicklung auf diesem Gebiet laufende Marktrecherchen, da entsprechende Geräte moralisch schnell veralten.

Die visuelle Auswertung ist überall dort überlegen, wo es auf die Erkennung und Identifizierung von Struktur-, Textur-, Form-, Lage- und Assoziationsmerkmale ankommt (s. 4.2.), während sich Rechner bestens eignen für die optimale Bearbeitung und Bewertung leicht quantifizierbarer punktueller Daten, d. h. insbesondere für die Datenklassifizierung nach radiometrisch-spektralen Gesichtspunkten sowie für statistische Auswertungen, Flächenmessungen etc. Danach ist offensichtlich, daß Geräte für die visuelle Interpretation zur Grundausstattung eines jeden Nutzerlabors für die Auswertung von Fernerkundungsaufnahmen gehören. Vorschläge für ein solches Basislabor findet man in [80] und die generelle Philosophie der visuellen Bildauswertung ist sehr gut in [85]

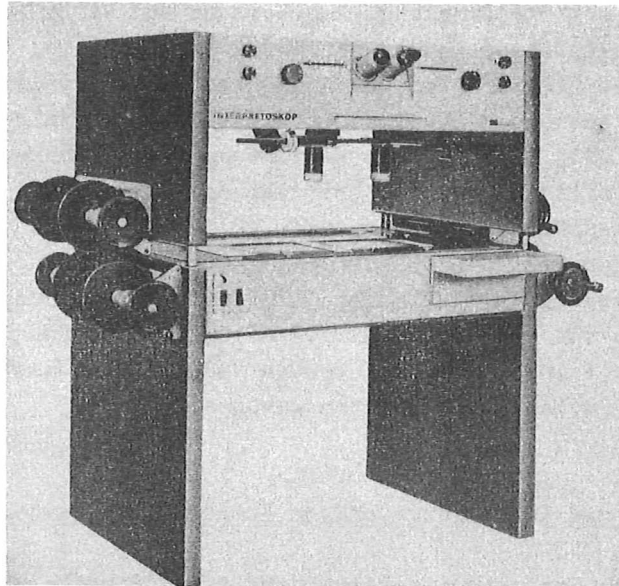


Abb. 35. Interpretoskop des VEB Carl Zeiss Jena, DDR

dargestellt. Zur Grundausstattung gehören Bildbetrachtungs- und -meßvorrichtungen sowie Geräte zur Herstellung von Farbmischbildern und zur Informationsübertragung auf andere Datenträger. Bildbetrachtungsgeräte werden für eine angemessene Vergrößerung, Be- bzw. Durchleuchtung und nach Möglichkeit auch stereoskopische Betrachtung der Aufnahmen benötigt. Sie sind Voraussetzung für eine bessere Feststellung und Identifizierung von Objektdetails. Bildmeßgeräte können je nach Aufgabenstellung, geforderter Präzision und der Häufigkeit bestimmter Meßvorgänge vom einfachen Maßstab bzw. einer Meßlupe bis zu photogrammetrischen Auswertegeräten und x-y-Komparatoren höchster Präzision reichen.

Durch Farbkodierung multispektraler Schwarz-Weiß-Aufnahmen wird die Anzahl der in einem Bild unterscheidbaren "Schattierungen" gegenüber der Schwarz-Weiß-Betrachtung mehr als verzehnfacht (s. 4.1.). Transparente Farbmischbilder können auf Film, dem Leuchtschirm eines additiven Farbmischprojektors (Abb. 36) oder durch Überlagerung farblich verschieden kodierter DIAZO-Folien hergestellt werden. Für die Anfertigung von Farbmisch-Papierkopien eignen sich übliche fotochemische oder auch das CROMALIN-Verfahren.

Die bei weitem billigste und einfachste und nach Erfahrungen auf UNO-Seminaren unter Nutzern wohl auch am weitesten verbreitete Technik zur Herstellung von transparenten Farbmischbildern ist die DIAZO-Technik [81]. Sie gestattet ebenfalls einfache Analogprozeduren zur Verstärkung radiometrischer und spektraler Merkmalskontraste wie Grauwertspreizung und Quotientenbildung. Ein DIAZO-Kopier- und Entwicklungsgerät ist um etwa zwei Größenordnungen billiger als ein Farbmischprojektor. Auch DIAZO-Folien sind wesentlich billiger als Farbfilm oder -fotopapier. Sie werden mit Tages- oder UV-Licht belichtet und in Ammoniakdampf entwickelt, was ohne Fotolaboreinrichtungen auch im Feldeinsatz möglich ist.

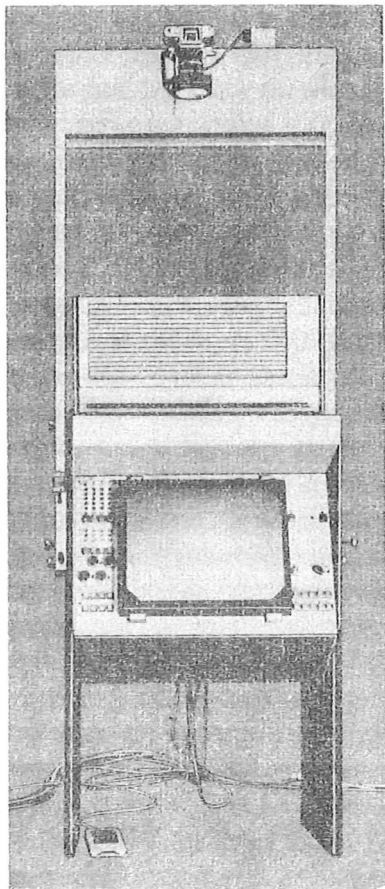


Abb. 36. Multispektralprojektor MSP-4 des VEB Carl Zeiss Jena, DDR

Die Herstellung von multispektralen Kontakt-Farbdrucken bis zu etwa 3 m^2 Fläche aus gleichformatigen multispektralen Schwarz-Weiß-Transparentvorlagen (Positive oder Negative) gestattet das CROMALIN-System der Firma Du Pont. Das Verfahren ist ungleich billiger als die Herstellung von Farbfoto-Papierabzügen und überall dort von großem Nutzen, wo die Herstellung vieler auch großformatiger Kopien multispektraler Fernerkundungsaufnahmen zwecks Verwendung als Fotokarten auch für den praktischen Gebrauch im Feldeinsatz erforderlich ist. Das trifft insbesondere für Entwicklungsländer zu, denen es an großmaßstäbigen Karten ($> 1 : 10^6$) mangelt. Im ERTS-Projekt Boliviens wurde diese Technik in großem Umfange mit bestem Erfolg genutzt.

Auch bezüglich der Übertragung von Informationen aus Fernerkundungsaufnahmen in Karten oder andere Bilder mit unterschiedlichem Maßstab gibt es eine Vielzahl von Geräten vom einfachen Pantographen bis zum Zoom-Stereo-Transferoskop. Eine sorgfältige Analyse der tatsächlichen Bedürfnisse kann dazu beitragen, Gerätebeschaffungskosten entscheidend zu reduzieren.

Eine maximale Informationsausbeute insbesondere auch für die fachspezifische Auswertung setzt die Wechselwirkung zwischen Interpretator und maschinellen Analysegeräten voraus (interaktive Systeme). In dieser Hinsicht bieten Analogrechner gegenüber rein digitalen Bildauswerteeinrichtungen einige Vorteile. Elektronische Analogsysteme sind sehr schnell und vergleichsweise billig. Sie gestatten interaktive Kontrastspreizung, Graustufenklassifizierung, Mehrkanalfarbmischungen, Quotientenbildung und ähnliche einfache Operationen. Nachteile sind geringe Präzision und schlechte Reproduzierbarkeit. In dieser Hinsicht, wie auch in der Vielfalt möglicher Operationen, sind Digitalrechner Analogrechnern deutlich überlegen. Optimal sind hybride Systeme, die beide Vorteile verbinden. Der Fachinterpretator kann unter Nutzung des schnellen interaktiven Analogsystems die für seine gegebene Aufgabenstellung und individuelle Veranlagung geeigneten Farbmischungen, Kontrastverstärkungs- und Klassifizierungsoperationen ausfindig machen und dem Digitalsystem dann die exakte Bearbeitung und Optimierung dieser ausgewählten Varianten überlassen.

In diesem Zusammenhang erscheint es wichtig, auf den prinzipiellen Unterschied zwischen einem methodisch-diagnostischen Zentrum für Fernerkundung und einem Nutzerzentrum hinzuweisen. Primäre Aufgabe eines methodisch-diagnostischen Zentrums ist neben der Durchführung von Labor-, Feldmeß- und Flugexperimenten zur Erforschung der naturwissenschaftlichen Grundlagen der Fernerkundung die Erarbeitung einer Vielzahl möglicher analoger (z. B. fotochemischer und optischer) sowie digitaler Bildbearbeitungsverfahren und die Testung ihrer Eignung für die Lösung verschiedenartigster Aufgabenstellungen. Erforderlich sind Präzisionsgeräte für die analoge Bildbearbeitung, Einrichtungen für die Analog-Digital- und Digital-Analog-Umwandlung der Bildinformation sowie Digitalrechner ausreichender Speicherkapazität nebst peripheren Einheiten.

Demgegenüber stehen für ein operatives Nutzerzentrum in der Regel Forderungen nach schnellen, einfachen, billigen und ausreichend genauen Methoden und Geräten im Vordergrund. Sie müssen die Bearbeitung großer Datenmengen und die interaktive Bedienung durch einen kompetenten Interpretator gestatten, der Fachmann auf dem zu untersuchenden Problemgebiet und vertraut im Umgang mit Fernerkundungsdaten ist. Fotochemische, optische und elektronische Analogverfahren sind dabei, insbesondere wenn es sich um operative Anwendungen der Fernerkundung zur Lösung von Überwachungsaufgaben für große Flächen, z. B. in der Land-, Forst- und Wasserwirtschaft handelt, meist ausreichend. Digitale Bearbeitungsmethoden brauchen dann nur für ausgewählte Testgebiete angewandt zu werden.

Die Anschaffung kostspieliger spezieller digitaler oder hybrider interaktiver Bildbearbeitungs- und -analysensysteme sollte komplexen Nutzerzentren vorbehalten sein, die auch Dienstleistungen für kleinere Auswertelabors mit übernehmen. Sie lohnt sich nur dort, wo umfangreiche operative Fernerkundungsprogramme existieren, bei denen in großem Umfang präzise, radiometrisch und geometrisch korrigierte bzw. korrigierbare digitale Daten anfallen, die für wohldefinierte Zwecke einer schnellen, vielseitigen und quantitativ exakten Bearbeitung zugeführt werden müssen. Auch muß gesichert sein, daß die notwendige Soft- und Hardware zur Unterstützung eines solchen Systems vorhanden ist. Für die nur gelegentliche digitale Bearbeitung kleiner Datenmengen ist es ökonomischer, Mehrzweckrechner zu nutzen oder Dienstleistungen kommerzieller Datenanalysezentren in Anspruch zu nehmen.

In jedem Falle muß die Auswahl geeigneter Geräte für ein Nutzer- wie auch ein methodisch-diagnostisches Forschungszentrum ausgehen von einer realistischen und verantwortungsbewußten Einschätzung der zu lösenden Aufgaben und der gegebenen Randbedingungen (z. B. Umfang und Art des anfallenden Datenmaterials, verfügbare Kader, finanzielle Ressourcen etc.). Die Anschaffung kostspieliger Geräte oder die Nutzung teurer digitaler Methoden ist nur gerechtfertigt, wenn die entsprechende Arbeit in der erforderlichen Qualität und Menge anders nicht bzw. mit ihrer Hilfe letztendlich billiger getan werden kann. Neben den Anschaffungskosten und der Art der zu zahlenden Währung müssen aber insbesondere bei teuren komplizierten Geräten auch Wartungs- und Reparaturkosten und der Zugriff zu hochqualifizierten Bedienungs-, Wartungs- und Reparaturpersonal einkalkuliert werden.

Falls Primärdaten in großen Mengen in digitaler Form direkt vom Satelliten empfangen werden, dann sind ohnehin leistungsfähige digitale Datenbearbeitungszentren in Verbindung mit den Empfangsstationen notwendig. Sie können in der Regel außer der Herstellung korrigierter rechnerkompatibler Bänder und hochauflösender Filmmuster und Kopien auch eine Vielzahl von Standard- und Spezialoperationen der Bildbearbeitung und Datenklassifizierung für die Nutzer übernehmen. Dadurch entfällt oft die Notwendigkeit für eine weitergehende eigene digitale Bearbeitung. So gibt es regionale Zentren, die neben den in 3.2. beschriebenen Standardoperationen zur radiometrischen und geometrischen Korrektur der Daten sowie zur Herstellung voll annotierter CCTs und Filmmuster der 1. Generation auch Spezialbearbeitungen wie digital vergrößerte Farbmischungen, Kontrastverstärkung, Äquidensitendarstellung, Pseudocolorierung, statistische Bildanalysen (Histogrammbestimmung, Bandkorrelation, Flächenmessungen, Ausdruck des Strahlungsniveaus etc.), Untersuchung einzelner Spektralsignaturen und ihrer Statistik, Hauptkomponentenanalysen sowie nichtüberwachte und überwachte Klassifizierungen (bis zu 9 Klassen) anbieten (z. B. [86])

Auf einige organisatorische Aspekte nationaler Fernerkundungsaktivitäten einschließlich der Organisation von Fernerkundungszentren wird in 5.4. eingegangen. Im folgenden Hauptabschnitt sollen die Grundlagen und die Methodik der Aufbereitung und Interpretation von Fernerkundungsdaten dargestellt werden.

4. Grundlagen und Methodik der Aufbereitung und Interpretation von Fernerkundungsdaten

4.1. Generelle Bemerkungen

Die Entwicklung der Fernerkundung, insbesondere der Satellitenfernerkundung, wurde im zurückliegenden Jahrzehnt vor allem durch die rapide technische Entwicklung geprägt. Vor allem auch der Umstand, daß das erste quasi-operative System der Satellitenfernerkundung, das LANDSAT-System, die digitale Datengewinnung und Übertragung benutzte, stellte außerordentlich hohe Anforderungen an die Gewinnung, Übertragung, Aufzeichnung, Vorverarbeitung, Speicherung, Katalogisierung, Vervielfältigung und Verteilung digitaler Massendaten und daraus abgeleiteter analoger Datenprodukte. Das erforderte die Entwicklung komplexer und oft sehr teurer Hardware. Die Betonung der z. T. neuartigen technischen und organisatorischen Probleme der Datengewinnung, -verarbeitung und -verwaltung führte zu einer relativen Vernachlässigung der Datenanalyse und Interpretation. Die gewonnenen synthetischen Farbmischbilder waren optisch sehr ansprechend. Sie weckten in Verbindung mit einer oft aufdringlichen Marktwerbung der Datenproduzenten, der Erkundungsfirmen und der Industrie für Bildauswertegeräte und Rechenanlagen westlicher Länder z. T. übertriebene Erwartungen bei den potentiellen Nutzern. Voreilige Investitionen in kostspielige Hardware brachten vielfach nicht die erhofften, praktisch nutzbaren Ergebnisse, da sowohl die personellen, wissenschaftlich-methodischen als auch organisatorischen Voraussetzungen für die effektive Nutzung der neuen Technologien fehlten. So wurden in den ersten drei Jahren seit dem Start von ERTS/LANDSAT-1 (1972) weit über eine Million LANDSAT-Szenen am EROS-Datenzentrum bearbeitet und gespeichert. Bereits in den ersten drei Jahren wurden davon mehr als 400 000 Szenen von Nutzern in den USA und im Ausland (ca. 12 %) angefordert [15]. Dennoch umfaßte die von der NASA zusammengestellte weltweite Sammlung bedeutsamer, aus der Analyse von LANDSAT-Daten abgeleiteter Ergebnisse bis Mitte 1978 erst gut 3000 Eintragungen [16]. Außer dem Mode-Problem spielen bei der Fernerkundung eine Reihe weiterer psychologischer Aspekte eine Rolle, die von vielen Interessenten und Nutzern nicht sofort verstanden werden. Zum einen ist es das Problem der Farbpsychologie. Es zeigte sich bald, daß die ansprechendsten und kontrastreichsten Farbmischungen keineswegs immer die geeignetsten waren, um die für eine gegebene Fragestellung relevanten Phänomene bestmöglich hervorzuheben. Vielfach gingen gerade sie in dem "Farbrauschen" unter. Diese Gefahr besteht vor allem dann, wenn die Interpretationsvorlagen nicht von dem mit der Auswertung beauftragten Fachspezialisten im "Dialog" mit dem Rechner oder Labortechniker, sondern von letzterem bzw. dem Software-Spezialisten nach ästhetischen oder allgemein methodischen Gesichtspunkten erarbeitet werden.

Ein weiteres psychologisches Problem ist verbunden mit der komplexen synoptischen Sicht der Erscheinungen auf und nahe der Erdoberfläche. Sie steigert sich bei Verwendung kleinmaßstäbiger Satellitenaufnahmen und -aufnahmemosaiken zu einer Synopsis regionaler und globaler Zusammenhänge. Sie waren zuvor in dieser Totalität und Einheit nicht erfaßbar und man hatte über sie auch nicht in dieser Einheit reflektiert. Unser Denken und Handeln hat sich über Jahrhunderte hinweg zunehmend arbeitsteilig, d. h. fachdisziplinär entwickelt. Der Geologe, Geograph, Hydrologe, Meteorologe, Biologe und Ozeanograph, sie alle hatten ihre Vorstellungen von der Erde. Sie hatten die irdischen Erscheinungen nach geometrischen, physikalischen, chemischen, phänomenologischen o. a. für erdgebundene Messungen und praktische Tätigkeiten zweckmäßigen Gesichtspunkten klassifiziert.

Fermerkundungsaufnahmen zeigen nun für jeden Fachspezialisten das gleiche geometrisch-radiometrische Abbild einer komplexen einheitlichen Erscheinung, aus denen die fachspezifischen Informationen erst geschlossen oder herausgefiltert werden müssen. Das wiederum erfordert in weit größerem Maße als bisher ein indisziplinäres Verständnis der verschiedenen Erscheinungsabbilder und ihrer wechselseitigen Bedingtheit. Die Erscheinungsabbilder aber sind ganz andere als die mit irdischen Beobachtungen erfaßten. Damit steht die Frage, ob aus den geometrisch-radiometrischen Daten der Fernerkundung die physikalischen, chemischen, strukturell-phänomenologischen u. a. Parameter der klassischen Disziplinen hinreichend vollständig geschlossen werden können. Das wiederum wäre die Voraussetzung dafür, um die Bodenobjekte im klassischen Sinne identifizieren, entsprechend den herkömmlichen Klassifizierungsschemata einordnen und in unsere traditionellen Planungen und Statistiken einbeziehen zu können. Die Integration der komplexen Bildinformationen der Fernerkundung in unsere klassischen Disziplinen, Denk- und Planungsstrukturen ist das eigentliche, noch längst nicht bewältigte Kernproblem für die effektive Nutzung dieser neuen Methodik, nicht so sehr deren technische Entwicklung. Das Problem ist vermutlich nicht vollständig im klassischen Sinne lösbar, d. h. in dem Versuch, aus den zur Verfügung stehenden Fernerkundungsdaten über ein aufwendiges Studium der physikalischen Grundlagen der Erscheinungsbilder schließlich zu einer exakten Beschreibung der Objekte im herkömmlichen Sinne zu gelangen. Bisherige Erfahrungen zeigen, daß für eine optimale Ausnutzung der Potenzen der Satellitenfernerkundung z. B. für das Studium der Landnutzung und -bedeckung in Abhängigkeit von den Datencharakteristiken des Satelliten wie den konkreten Bedingungen eines Landes bzw. einer Region neue Klassifizierungstypen definiert werden müssen (s. 4.4.6.). Sie können oft erheblich von den derzeit üblichen abweichen. Die Aufgabe besteht darin, solche Parameter zu finden, daß für praktische Belange (z.B. Landnutzungsplanungen) brauchbare Ergebnisse erhalten werden. In Verbindung damit mußte sich auch erst die Erkenntnis durchsetzen, daß Fernerkundungsdaten allein, ohne die Zuhilfenahme umfassender und sorgfältig ausgewählter unabhängiger Zusatzinformationen über die tatsächlichen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet, nur in Ausnahmefällen praktisch nutzbare Informationen liefern, die über bereits vorhandene Kenntnisse hinausgehen. Die bloße Feststellung bereits bekannter Tatsachen auch aus der Perspektive des Weltraums kann aber nicht Anliegen der Nutzung einer so kostenaufwendigen neuen Technologie sein. Auf das Anliegen und die Methodik der Sammlung unabhängiger Bodeninformationen wird in 4.4.2. eingegangen.

Damit wirft die Fernerkundung der Erde mit ihren völlig andersartigen Möglichkeiten und gegenüber klassischen Verfahren der Datengewinnung spezifischen Vorteilen prinzipielle Fragen auf. Einerseits muß das Problem der Massendatenbereitstellung und -verarbeitung wesentlich besser beherrscht werden als z. Z., um aus den gewonnenen Datenmengen ein Maximum an nützlichen Informationen in der für ihre sinnvolle Nutzung erforderlichen Zeit gewinnen zu können. Das erfordert einerseits die Anpassung herkömmlicher Klassifikationsschemata an die Bedingungen *o p e r a t i v e r*, in ihren wesentlichen Sensorparametern langfristig konstanter Fernerkundungssysteme, wo diese für praktische Belange brauchbare Informationen besser, schneller und/oder billiger als klassische erdgebundene Datenerfassungssysteme liefern. Zum anderen werden aber auch Wandlungen in den traditionellen Informations-, Planungs-, Organisations- und Entscheidungsstrukturen erforderlich sein, wenn man in Zukunft die Potenzen insbesondere der Satellitenfernerkundung für operative Überwachungsaufgaben voll nutzen will.

4.2. Grundlagen der visuellen Interpretation und Methoden der fotografisch-optischen Bildbearbeitung

Für die visuelle Interpretation liegen die Fernerkundungsdaten in Form einer zweidimensionalen analogen Bildfunktion vor. Sie ist bei multispektralen Aufnahmen mehrparametrig. Bilder sind somit komplexe Informationsspeicher. Ihre Qualität läßt sich durch prinzipiell meßbare Eigenschaften ausdrücken wie der Bildschärfe (Detailerkennbarkeit), der Grauwert- und Farbdifferenzierung und bei Stereobildpaaren auch der Güte der Parallaxe. Ziel der Bildbearbeitung ist die Erhöhung der Bildqualität durch determinierte Änderung der Bildfunktion. Sie dient der Verbesserung und Objektivierung der Auswertung der gespeicherten Information. Für die Bildbearbeitung werden sowohl analoge als auch digitale (4.3.) Methoden eingesetzt. Umfang, Güte und Objektivität des durch die visuelle Auswertung erzielbaren Ergebnisses hängen dabei stark von der gewählten Abbildungsform ab. Sie muß sowohl der Interpretationsthematik als auch den physiologischen und psychologischen Besonderheiten der Wahrnehmungskette des Komplexes Auge-Gehirn angepaßt sein.

Das Datenvolumen in einem Fernerkundungsbild richtet sich nach seiner Größe und dem geometrischen und radiometrischen Auflösungsvermögen des Sensorsystems. Es kann bei hochauflösenden Satellitenfernerkundungsaufnahmen 10^9 bit pro Szene übersteigen. Elektronische Rechner gestatten eine schnelle und exakte punktweise Abfrage und Bearbeitung solch riesiger Datenmengen. Dagegen kommt es im visuellen Wahrnehmungsprozeß zu einer drastischen Datenreduzierung. Die erste Schicht der Netzhaut des Auges ist der Empfänger für optische Reize in Form elektromagnetischer Strahlung. Sie enthält etwa 10^8 lichtempfindliche Rezeptoren. Bei der optischen Reizaufnahme werden zunächst durch das Auge pro Sekunde etwa 10^6 bis 10^7 bit aufgenommen. Durch Verknüpfung dieser Erregungszustände werden schließlich nur noch 25 bis 10^0 bit/s an das zentrale Nervensystem weitergeleitet und dort zu einem internen Abbild verarbeitet. Die Abspeicherrate von Informationen im Gehirn beträgt sogar nur etwa 1 bit/s [82], [83]. Auf Grund der spezifischen Kopplung der einzelnen Neuronen und Neuronenschichten, deren Funktionsweise mit den aus der Informationstheorie bekannten linearen zweidimensionalen Hochpaßfiltern verglichen werden kann [59], [60], ist das Auge nicht geeignet für die genaue Bestimmung absoluter Strahlungsintensitäten oder den exakten Vergleich von Helligkeitskontrasten. Bekannt sind beispielsweise die durch die sogenannte Simultankontrast- bzw. die Match-Band-Illusion bewirkte scheinbare Kontrasterhöhung bzw. Konturverschärfung. Bei multispektraler Betrachtungsweise können Simultankontrasterscheinungen zu Farbillusionen führen. Sie machen es dem Beobachter unmöglich zu entscheiden, ob winzige Farbänderungen einer Struktur auf tatsächlichen Änderungen des Reflexionsvermögens beruhen oder nur auf Änderungen des farbigen Hintergrundes zurückzuführen sind [76]. Farbschwache Beobachter sind für solche Effekte besonders anfällig.

Andererseits ist der Auge-Gehirn-Komplex eines kompetenten Bildinterpretators jedem elektronischen Rechner weit überlegen in der Fähigkeit der Erkennung räumlicher Muster und in der komplexen integrativen Auswertung des Bildinhaltes unter bestimmten Fragestellungen. Das erfordert ein kompliziertes System von Entscheidungsfindungen. In diesem durch ständige Reizauswahl, -integration und -kombination charakterisierten Wahrnehmungsprozeß spielen Erfahrungen und Kenntnisse neben subjektiven Momenten wie Aufmerksamkeit, Interessen und Erwartung eine große Rolle.

Ausschlaggebend für die Leistungsfähigkeit der visuellen Bildinterpretation ist die spezielle Fähigkeit des Menschen, Bildqualitäten und -merkmale wie Form, Größe, Lage, Höhe, Schatten, Helligkeit, Farbe, Textur¹⁾ und Assoziation automatisch zu integrieren und mit unabhängigen Kontextinformationen und Erfahrungen zu verbinden. Das macht die visuelle Interpretation durch einen erfahrenen Bildauswerter für viele Anwendungen unentbehrlich und wesentlich kosteneffektiver als eine reine automatische Datenbearbeitung. Ausführlich gehen SÖLLNER [76] sowie KAUTZLEBEN und BANKWITZ [111] auf die physiologisch-psychologischen Besonderheiten dieses Prozesses von Sehen und Wahrnehmen im Zusammenhang mit der visuellen Auswertung von Fernerkundungsaufnahmen ein. Generell eignen sich Schwarz-Weiß-Aufnahmen besonders für die Analyse der räumlichen Gliederung einer Szene (Strukturinformation) während die stofflich-flächenhafte Gliederung in Multispektralaufnahmen am besten zur Geltung kommt.

Interpretationsschlüssel und Merkmalskataloge sind außerordentlich wichtige Hilfsmittel insbesondere für schwierige Fälle der visuellen Auswertung. Sie können beschreibender Natur sein oder auch eine Sammlung bildlicher Darstellungen typischer Merkmale umfassen. Sie gestatten es weniger erfahrenen Interpretatoren, die Detailkenntnisse erfahrener Auswerter zu nutzen. Allerdings ist es praktisch unmöglich, universell anwendbare Interpretationsschlüssel auszuarbeiten. In der Regel beschreiben sie die für ein bestimmtes Gebiet und u. U. auch für bestimmte Jahreszeiten typischen Objektmerkmale. Sie müssen deshalb von Leuten angefertigt werden, die die lokalen Verhältnisse genau kennen. Ein Nachteil der visuellen Bildauswertung liegt darin, daß das menschliche Auge in monochromatischen Bildern Objekte nur zu erkennen vermag, wenn sie sich in ihrem Helligkeitswert vom unmittelbaren Hintergrund um mindestens etwa 3 - 5 % abheben. In Verbindung mit dem begrenzten dynamischen Bereich fotografischer Emulsionen bedeutet dies, daß ein Interpretator in einer Schwarz-Weiß-Aufnahme nicht mehr als 15 bis 25 Grautönen zuverlässig zu unterscheiden vermag. Das gilt für alle Bilddarstellungen von Fernerkundungsdaten unabhängig vom Sensortyp und seiner radiometrischen Empfindlichkeit. Das heißt aber, daß beispielsweise der gesamte Variationsbereich der reflektierten Sonnenenergie, der für ein durchschnittliches Gelände zwischen etwa 2 % und 70 % der einfallenden Energie liegt, auf 15 bis 25 Graustufen komprimiert oder aber beschnitten werden muß. Die Komprimierung des Gesamtbereichs reduziert den Kontrast zwischen den Objekten und damit ihre Unterscheidbarkeit, während die Beschneidung des Bereiches gleichbedeutend ist mit einer Kontrastverstärkung zwischen bestimmten Objekten. Letzteres verbessert die Auswertbarkeit von Teilen der Szene auf Kosten anderer Helligkeitsbereiche des Bildes. Da für spezifische Interpretationsbelange des öfteren nur bestimmte Helligkeitsteilbereiche von Interesse sind, ist die Kontrastverstärkung eine häufig praktizierte Methode der Bildbearbeitung zur Verbesserung der Interpretierbarkeit.

Durch Verwendung von Farbe werden die Schwellen der Feststellbarkeit reduziert. Nach [85] vermag der Mensch gemäß der Dreifachreiztheorie in einem Bild über 300 Kombinationen von Farbtönung, -sättigung und -helligkeit zu unterscheiden. Damit erweitert das Farbsehen die Fähigkeit des Menschen zur visuellen Unterscheidung um mehr als das 10fache. Prinzipiell sind noch wesentlich mehr Farbnuancen unterscheidbar, nach Angaben in [111] einige 10^4 .

¹⁾ Als Textur bezeichnet man eine Mikrostruktur (Muster), die im Bild durch nicht mehr getrennt wahrnehmbare Objekte hervorgerufen wird. Letztlich setzen sich auch große Strukturen aus Texturen zusammen.

Die analoge fotografisch-optische und zum wesentlichen Teil auch die digitale Bearbeitung von Fernerkundungsdaten hat zum Ziel, diese so zu behandeln und darzustellen, daß sie sich optimal für die visuelle Auswertung eignen. Multispektrale Aufnahmen verschiedener Kanäle liegen zunächst als getrennte Schwarz-Weiß-Aufnahmen vor. Für sie gelten die o. g. Einschränkungen in der Graustufenunterscheidbarkeit. Sie ist noch wesentlich schlechter, wenn die Grauwerte weit voneinander liegender Flächen in den Aufnahmen verschiedener Kanäle verglichen werden sollen. Zudem ist es für einen Interpretator kaum möglich, mehr als zwei Bilder gleichzeitig zu betrachten und zu vergleichen.

Eine bessere Ausschöpfung des Informationsgehaltes multispektraler Daten ist durch ihre Verdichtung in einem einzigen Bild möglich. Um die spektralen Teilinformationen trennen zu können, ist die unterschiedliche Farbkodierung der Einzelaufnahmen erforderlich. Die Superposition kann additiv im Farbmischprojektor oder auch subtraktiv nach fotografischen oder DIAZO-Techniken erfolgen. Neben gewissen Standardmischungen gibt es Spezialmischungen zur Optimierung bestimmter Merkmalskontraste für ausgewählte Interpretationsaufgaben. Generell sollten interpretationsgerechte Spezialbearbeitungen nach Möglichkeit vom Fachinterpretator selbst bzw. in enger Konsultation mit ihm angefertigt werden. Durch Überlagerung von Positiven bestimmter Kanäle mit Negativen anderer Kanäle sind Quotientenbildungen möglich. Dadurch werden Merkmalskontraste verstärkt und gleichartige Phänomene in verschiedenen Kanälen, z. B. Schattenwurf von Wolken bzw. im gebirgigen Gelände, lassen sich eliminieren. Kombiniert man in analoger Weise Positiv- und Negativaufnahmen der gleichen Szene des gleichen Kanals, die aber zu verschiedenen Zeiten aufgenommen wurden, dann heben sich in einer solchen Kombination alle gegenüber dem vorherigen Zustand eingetretenen Veränderungen klar hervor.

Farbkodierung ist aber nicht nur bei der Kombination verschiedener Aufnahmen der gleichen Szene, sondern oft auch für ein einzelnes Schwarz-Weiß-Bild angebracht, um den vollen Dynamikbereich des Films für die visuelle Interpretation übersichtlich zu erschließen. Üblich ist dabei zunächst eine Graustufenklassifizierung. Die Farbkodierung solcher Äquidensitendarstellungen ist sowohl auf fotochemischem Wege als auch mit Hilfe eines Rechners und Farbplotters möglich. In der Kombination mit Digitalrechnern sind auch stufenlose Farbkodierungen mit unterschiedlicher Übertragungscharakteristik für verschiedene Grauwertbereiche möglich. Auf weitere Verfahren der digitalen Bearbeitung von Fernerkundungsdaten wird im nächsten Abschnitt kurz eingegangen.

4.3. Methoden der digitalen Datenbearbeitung

4.3.1. Generelle Übersicht

Die Bildbearbeitung umfaßt drei Hauptkomplexe:

- Bildrestaurierung zur Eliminierung systematischer Fehler des Aufnahmesystems, die die primäre Bildfunktion verfälschen;
- Bildverbesserung für die visuelle Auswertung;
- automatische Bildauswertung.

Zur Bildrestaurierung gehören radiometrische und geometrische Korrekturen, auf die bereits in 3.2. kurz eingegangen wurde. Letztere können auch auf die Korrektur von Bildverzerrungen infolge der Erdkrümmung und andere systematische wie statische Abbildungs-

fehler ausgedehnt werden. Ein übliches Verfahren der geometrischen Präzisionskorrektur digitaler Fernerkundungsdaten ist die rechnerische Bildentzerrung durch Anpassung identifizierbarer Bilddetails an korrespondierende, genau vermessene Gelände- bzw. Kartendetails (z. B. [75], [116]). Eine solche digitale Bildbearbeitung mit Hilfe eines Netzes von Kontrollpunkten sichert auch die Deckungsgleichheit multitemporaler Aufnahmen. Das ist für die Feststellung und präzise kartographische Darstellung auch kleinräumiger zeitlicher Veränderungen von großer Bedeutung (Revision topographischer Karten, s. [132]). Erwähnt wurden auch bereits die Möglichkeiten zur Korrektur des Kontrast- und auflösungsmindernden Einflusses der Erdatmosphäre [14], [67] und der Beseitigung der Scanlinien durch Bildpunktkorrelation und -extrapolation. Beides trägt entscheidend zur Erhöhung des effektiven Auflösungsvermögens bei.

Gegenwärtig werden die meisten Fernerkundungsdaten noch visuell ausgewertet. Die automatische Bildauswertung ist nur dort sinnvoll, wo es gelingt, den Interpretationsvorgang einschließlich der Darstellungsform der gesuchten Aussagen vollständig zu formalisieren. Das ist nur in Ausnahmefällen möglich (s. 4.3.2.). In der Regel überwiegt, insbesondere bei komplexen Bildinhalten, der schöpferische Vorgang ihrer Analyse und Beschreibung. Die Vorverarbeitung multispektraler Fernerkundungsdaten dient deshalb vor allem der Transformation der Primärdaten in eine Abbildungsform, die dem Interpretationsziel und dem menschlichen Wahrnehmungsvermögen optimal angepaßt ist. Die in 4.2. beschriebenen konventionellen Methoden der analogen Datenaufbereitung können diesem Anliegen nicht voll gerecht werden. Demgegenüber gestattet die digitale Bildbearbeitung eine praktisch unbegrenzte Vielfalt determinierter Änderungen der primären Bildfunktion.

Die Güte multispektraler Farbbilder für die visuelle Interpretation wird wesentlich durch die Farbdifferenzierung der Szene bzw. (in Abhängigkeit von der Interpretationsthematik) vom mittleren Farbabstand benachbarter repräsentativer Objekte bestimmt. Die Erzielung einer optimalen Farbdifferenzierung bzw. Farbentropie der Bilder ist deshalb ein Hauptanliegen der digitalen Bearbeitung multispektraler Fernerkundungsdaten. Durch eine solche Bearbeitung wird gleichzeitig eine gewisse thematische Informationsauslese erreicht, da die flächenhafte Gliederung des Bildes als Träger der multispektralen Information hervorgehoben und die vor allem durch Licht-Schatten-Effekte manifestierte strukturelle Gliederung unterdrückt wird.

Bisher gibt es nur wenige fundierte Erkenntnisse zur interpretationsgerechten Aufbereitung von Multispektralaufnahmen. Noch überwiegt die intuitive Einstellung von Farbmischungen und Kontrastverstärkungen durch die Interpretatoren. Entsprechend dem Bildfunktionstyp und dem Interpretationsziel wird im Rahmen der z. Z. noch nicht vollständig bekannten und nur z. T. formalisierbaren Gesetze der visuellen Bildinterpretation angestrebt, jeder konkreten Interpretationsaufgabe geeignete Algorithmen zuzuordnen. Ausgehend von den physikalischen Eigenschaften der Fernerkundungsdaten und den physiologischen Eigenschaften des Auges bei der Wahrnehmung von Farbbildern wurden im Zentralinstitut für Physik der Erde von SÖLLNER [76] solche Algorithmen zur Optimierung der Darstellung von Aufnahmen des Gerätesystems MKF-6 für die visuelle Interpretation abgeleitet. Dazu gehören Algorithmen

- zur linearen Grauwerttransformation im zweidimensionalen Merkmalsraum,
- zur Optimierung der Farbdifferenzierung unter Berücksichtigung der empfindungsgemäßen Farbmatrik,

- zur unüberwachten Klassifizierung nach repräsentativen Objektklassen und
- zur interpretationsgerechten Aufbereitung von Multispektralaufnahmen mit inhomogener bzw. relativ homogener Bildfunktion.

Alle von SÖLLNER erprobten und in [76] ausführlich beschriebenen Verfahren liefern aber nur eine rein qualitative Bildverbesserung. Die Filtercharakteristiken sind so kompliziert, daß es kaum möglich ist, aus dem verbesserten Sekundärbild Rückschlüsse auf die spektralen Objekteigenschaften zu ziehen (s. 4.3.2.). SÖLLNER weist deshalb ausdrücklich darauf hin, daß ihre Verwendung nur für überwachte Klassifizierungen unter Hinzuziehung der Ausgangsdaten bzw. konventioneller Farbsynthesen sinnvoll ist. Die bearbeiteten Bilder erleichtern aber wesentlich die Wahrnehmung und Rayonierung von qualitativen (stofflichen) Merkmalsunterschieden. Das trägt indirekt auch zur umfassenden objektiven Bildauswertung bei.

Die bei der analogen Bildbearbeitung üblichen Methoden der Grauwertspreizung und Äquidensitendarstellung, der Bestimmung von Spektralbandquotienten und der Farbkodierung (s. 4.2.) sind auch bei der digitalen Bildbearbeitung üblich. Zusätzlich gestatten digitale Verfahren die Anwendung verschiedenartigster Grauwertübertragungsfunktionen, die Egalisierung von Histogrammen der Grau- bzw. Farbwertanteile, Hoch- und Tiefpaßfilterung der räumlichen Grauwertänderungen, Laplace-Transformation des Originalbildes zwecks Eliminierung konstanter Grauwerte und linearer Grauwertänderungen und Hervorhebung höherer Ableitungen (s. Abb. 37), Kantenverstärkung durch Addition des Originalbildes mit seiner Laplace-Transformierten, Richtungsfilterung (d. h. das Hervorheben von Lineationen in bestimmten Richtungen insbesondere für die geologische Interpretation), gewichtete Mittelung verschiedener Kanäle (Linearkombinationen), Korrelation zwischen verschiedenen Spektralkanälen (Kovarianzmatrix), Fouriertransformation, Klassenbildung, Hauptachsentransformation etc. Zu allen genannten Verfahren wurden im Methodisch-diagnostischen Zentrum (MdZ) des Zentralinstituts für Physik der Erde der AdW der DDR (ZIPE) Programmpakete entwickelt und erprobt (s. z. B. [156], [157], [158], [159]). Auf eine nähere Erläuterung wird deshalb hier verzichtet. Lediglich auf die sehr häufig angewandten Methoden der automatischen Datenklassifizierung und Flächenmessung soll kurz eingegangen werden.

4.3.2. Zur automatischen Klassifizierung und Hauptachsentransformation multispektraler Bilddaten

Besondere Bedeutung kommt der sogenannten "cluster"-Analyse und Hauptachsentransformation im Hinblick auf die automatische Klassifizierung von Fernerkundungsdaten nach ihren Spektralcharakteristiken sowie zur Reduzierung des Datenumfangs zu [71], [76], [88], [89].

Das Konzept der "cluster"-Analyse im mehrdimensionalen Farbraum geht aus von der Verfügbarkeit von Registrierungen in mehreren Spektralbändern und der Tatsache, daß die Reflexionsspektren natürlicher Objekte mehr oder weniger starke Schwankungen aufweisen. Stellt man beispielsweise für jedes Bildelement verschiedener Objekt-Testgebiete die zugehörigen spektralen Intensitätswerte in Kombinationen von je 2 Kanälen in x-y-Diagrammen dar, dann formen diese mehr oder weniger große, sich z. T. überlappende Punktwolken (Abb. 38) bzw. im Falle der gemeinsamen Analyse aller n Spektralkanäle Punktwolkenfiguren im n-dimensionalen Raum. Sie können mit Hilfe von Digitalrechnern bestimmt und als Grundlage für eine automatische Merkmalsklassifizierung genutzt werden.

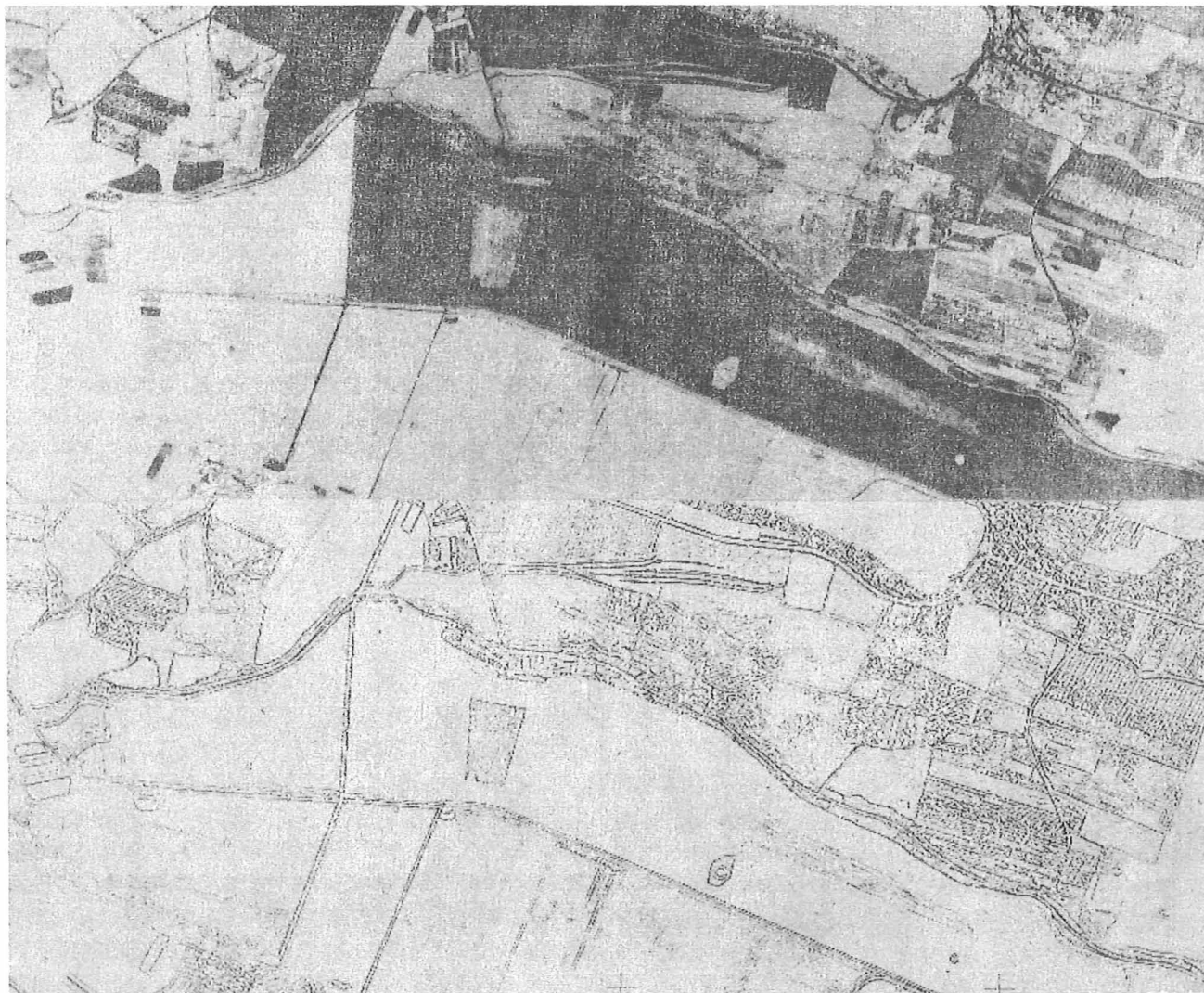


Abb. 37. Oben: MKF-6 Luftbildaufnahme des Gebietes Süßer See im Bezirk Halle
(Kanal 4, LFB-Nr. 205/76)
Unten: Ergebnis der Hochpaßfilterung der obigen Aufnahme mit dem
Laplace-Operator

Die Möglichkeit der Unterscheidung von Objekten auf der Grundlage ihrer Spektralsignaturen im Farbraum hängt ab von der Separierbarkeit dieser "cluster". Sie kann verbessert und vereinfacht werden durch Ausführung der sogenannten Hauptachsentransformation. Letztere ist möglich, da die Intensitätswerte korrespondierender Bildelemente in den verschiedenen Spektralkanälen z. T. hochgradig korreliert sind. Der mittlere Korrelationskoeffizient zwischen Aufnahmen der MKF-6 in benachbarten Spektralbereichen beträgt z. B. 0,6 bis 0,8. Durch die Hauptachsentransformation läßt sich die Dimensionalität des Multivariablensystems reduzieren, indem man die ursprünglichen Merkmale als Funktion einer kleineren Anzahl unkorrelierter Variabler darstellt, die Linearkombinationen der ursprünglichen Variablen sind. SÖLLNER [76] führte am Methodisch-diagnostischen Zentrum des ZIPE solche Hauptachsentransformationen durch. Beispielsweise berechnete er aus den 6 ursprünglichen MKF-6-Aufnahmen einer Szene vom Nordteil der DDR 6 neue als Linearkombinationen der Originale. Lediglich 2 der synthetischen Bilder waren

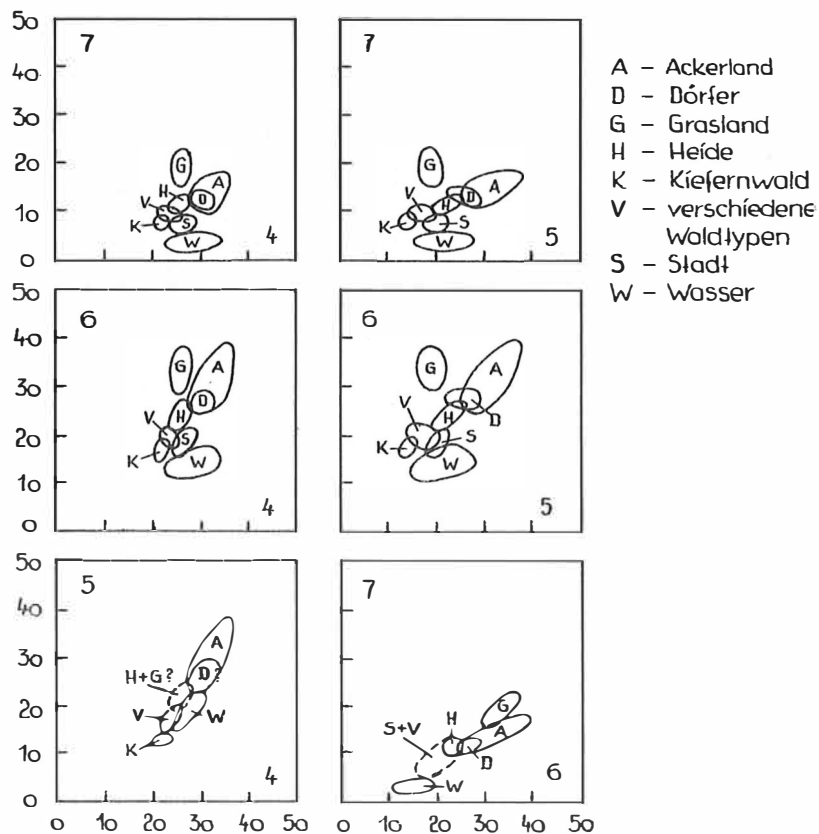


Abb. 38. "Cluster"-Analyse: Einhüllende der Punktwolken verschiedener Objektklassen für alle 6 möglichen Kombinationen von je 2 der 4 LANDSAT-MSS-Kanäle (nach DONKER und MULDER [88])

von guter Qualität. Rechnungen ergaben, daß diese beiden "Hauptachsenbilder" 92,5 % der nützlichen Information aus den Ursprungsbildern enthielten. Die restlichen vier Bilder stellten praktisch nur Rauschen dar. Auf diese Weise konnte die Anzahl der für die Interpretation benutzten Aufnahmen von sechs auf zwei und damit der Datenumfang wesentlich reduziert werden.

Die Transformation auf Hauptkomponenten entspricht einer synthetischen Filterung mit Filtern, die den gesamten registrierten Spektralbereich überdecken, aber in den verschiedenen Spektralbändern unterschiedliche Durchlässigkeit (Filterkoeffizienten) besitzen. Man könnte somit die Hauptkomponenten direkt registrieren, wenn es gelänge, entsprechende physikalische Filter zu entwickeln. Das ist allerdings nicht exakt realisierbar, da physikalische Filter mit negativer Durchlässigkeit in bestimmten Spektralbändern nicht möglich sind. Die aus der Hauptachsentransformation der Primärdaten für den Praktiker erwachsenden Interpretationsprobleme sowie die Untersuchung der Möglichkeiten zur Wiedergewinnung der Ursprungsdaten aus den Hauptachsenbildern bedürfen noch gründlicher Studien.

Die Verteilung der Punkte im n-dimensionalen Farbraum folgt in der Regel keiner bekannten statistischen Verteilung und kann deshalb auch nicht sinnvoll mit den üblichen statistischen Standardmethoden bearbeitet werden. Merkmalspunkte, die in den Überlappungsbereich der "cluster" fallen, müssen deshalb entweder als "nicht klassifizierbar" eingestuft werden oder man legt eine Entscheidungsfläche durch den Überlappungsbereich und läßt nur einfache Alternativen zu. Letzteres schließt die Möglichkeit von Fehlklassifizierungen bei Überlappung der "cluster" ein.

Diese Merkmalserkennungstechnik mag unter günstigen Bedingungen ausgezeichnete Ergebnisse bei der Identifizierung eines gegebenen Ensembles von Objekten liefern, die zeitlich und räumlich eng benachbart sind und kann andererseits für das gleiche Objektensemble unter anderen Bedingungen völlig versagen. Erfahrungen mit der rechnergestützten Klassifizierung land- und forstwirtschaftlicher Ressourcen zeigen, daß die "cluster"-Analyse anhand sogenannter Trainings- oder Testgebiete für j e d e Satellitenaufnahme, ja oft sogar für jede homogene "Merkmalsschicht" (s. 4.4.3. und 4.4.4.) innerhalb der Aufnahme neu bestimmt werden muß, wenn die Klassifizierung erfolgreich sein soll (WIGTON und BORMANN [89]). Das aber bedeutet, daß die Hoffnung auf feststehende automatische Klassifizierungsalgorithmen digitaler Fernerkundungsdaten, die jeweils innerhalb eines breiten Bereichs von Bedingungen anwendbar sind, aufgegeben werden muß. Allerdings kann ein Mustererkennungsalgorithmus leicht verändert werden, wenn neue Bodeninformationen vorliegen. Deren Verfügbarkeit aber ist eine Grundvoraussetzung für den Erfolg einer Objektklassifizierung anhand von Spektralcharakteristiken.

In diesem Zusammenhang muß beachtet werden, daß die Spektralcharakteristiken einiger Objekte, z. B. von Pflanzen, eine deutliche Zeitabhängigkeit besitzen. Die zeitlich veränderliche Position ihrer entsprechenden "cluster" im Merkmalsraum während der Vegetationsperiode bildet die sogenannte "Lebenslinie" [69]. Die Lebenslinien verschiedener Pflanzen und ihr gegenseitiger Abstand im Merkmalsraum sind ebenfalls variabel. Perioden maximalen Abstands der "cluster" sind am besten für eine Identifizierung und Unterscheidung der jeweiligen Pflanzen geeignet. Diese kritischen Zeitperioden werden als "biologische Fenster" bezeichnet. Sie können z. B. durch wöchentliche Sammlung von Fernerkundungsdaten zu einer festgesetzten Tageszeit über Feldern mit unterschiedlichen Kulturen ermittelt werden. Für diesen Zweck können einfache und billige Plattformen wie Drachen und verankerte Ballone verwendet werden. Liegen die multitemporalen Daten in digitaler Form vor, dann kann das Prinzip der Hauptachsentransformation in analoger Weise angewandt werden. Nach ABOTTEEN [103] beschreiben die so gewonnenen ersten und zweiten Komponenten des sogenannten "Grün-Eigenvektors" die zeitlichen Trajektorien (Lebenslinien) für kleinkörnige (Weizen, Hafer, Roggen etc.) und großkörnige Getreidearten (Mais), was deren zuverlässige Trennung gestattet.

In der Regel sollte eine rechnergestützte Klassifizierung mit einer nicht überwachten Klassifizierung, d. h. der einfachen "cluster"-Bildung beginnen, um zu sehen, wie die Szene anhand der Spektralcharakteristiken differenzierbar ist. Dann sollte man die Statistik der Klassen untersuchen und nicht separierbare Klassen verschmelzen. Erst danach sollte anhand von ausgewählten Trainingsgebieten, aus denen unabhängige Informationen über die Bodenobjekte vorliegen, eine kontrollierte Klassifizierung vorgenommen werden. Auf Modifizierungen der hier beschriebenen Verfahren zur Klassifizierung von Fernerkundungsdaten (Mehrelementklassifizierung, 'grid approach', Matrixklassifizierung etc.) wird im Zusammenhang mit konkreten Anwendungsbeispielen in 4.4.6. eingegangen.

4.4.3. Zur Flächenbestimmung mit Hilfe klassifizierter digitaler Bilddat: n

Neben der richtigen Identifizierung von Bodenobjekten anhand ihrer Spektralcharakteristiken besitzt auch die exakte Bestimmung der von den Objekten eingenommenen Fläche meist große praktische Bedeutung. Dabei ist die relative Genauigkeit von Flächenabschätzungen eng mit der erreichbaren Klassifizierungsgenauigkeit verknüpft. Beide hängen u. a. vom Verhältnis der Flächengröße der jeweiligen Objekte zum IFOV ab. Während für die Erkennbarkeit flächenhafter Objekte diese (in Abhängigkeit vom Spektralkontrast) mindestens vier Bildelemente umfassen müssen, erfordert deren richtige Klassifizierung allgemein Flächengrößen von mehr als 9 bis 16 Bildelementen. Aber auch dann ist der Fehler der Flächenabschätzungen für diese Objekte auf Grund des hohen Anteils gemischter Bildelemente aus dem Grenzbereich der Objekte noch sehr groß. Unter Annahme quadratischer Felder beträgt nach HEMPENIUS [93] der Prozentsatz gemischter Bildelemente $200 \cdot (n - 1)/n^2$, mit n^2 als der Anzahl der zur Überdeckung des jeweiligen Feldes erforderlichen Bildelemente. Ist die Feldfläche 25 mal bzw. 400 mal größer als das IFOV, dann sind immer noch 32 % bzw. 10 % gemischte Bildelemente zu erwarten. Diese sind oft Anlaß für unbestimmte oder Fehlklassifizierungen. Bei irregulären, insbesondere langgestreckten Feldformen ist dieser Anteil noch höher. Bei ausgedehnten Flächen mit wenigen wechselnden Kulturen bzw. Bedeckungsarten sind allerdings bessere praktische Ergebnisse z. T. dadurch möglich, daß sich unter bestimmten Bedingungen in Abhängigkeit von der konkreten Flächen- und Häufigkeitsverteilung Klassifizierungsfehler und damit Fehler in der Flächenbestimmung herausmitteln können. Eine wesentliche Verbesserung von Flächenbestimmungen mittels digitaler Fernerkundungsdaten wird erreicht durch Aufstellung empirischer Korrelationsbeziehungen zwischen der Anzahl klassifizierter Bildelemente und tatsächlichen Flächenmessungen in den gleichen Testgebieten, die zur Bestimmung der Spektralsignaturen ausgewählt wurden. Diese Korrelationsbeziehungen müssen für jede Feldkultur bzw. Bedeckungsart getrennt ermittelt werden (s. WIGTON und BORMANN [89]). Ausführlich ist diese Methode in [97] und [98] dargestellt. Sie gestattet selbst im Falle relativ geringer Genauigkeit in der rechnergestützten Klassifizierung der Anbaukulturen ziemlich genaue Schätzungen der jeweiligen Anbauflächen, wenn qualitativ hochwertige digitale Satellitenfernerkundungsdaten genutzt werden.

Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Verfahrens ist nach o. g., daß die Flächen der individuellen Felder in ihrer überwiegenden Mehrzahl wesentlich größer als das IFOV sind. Nach Abb. 39 ist aber z. B. in Indien über die Hälfte der Felder kleiner als 5 ha. Das gilt ebenso für die meisten Entwicklungsländer, insbesondere solche mit Reisanbau, wie auch für die Mehrzahl der europäischen Länder. Daten des LANDSAT-MSS sind dann für genaue Flächenbestimmungen und Klassifizierungen nicht geeignet. Das begründet den Wunsch insbesondere von Entwicklungsländern aber auch von Nutzern aus Westeuropa nach digitalen Satellitenfernerkundungsdaten hoher geometrischer Auflösung (IFOV ca. 10 bis 40 m). Dabei muß diese hohe Auflösung keinesfalls in allen Spektralkanälen realisiert sein. Kombinationen von multispektralen Daten geringerer geometrischer Auflösung mit denen eines geometrisch besser auflösenden panchromatischen Sensors sind oft ausreichend.

Im Vergleich zu den dominierenden Verhältnissen in Europa und Asien müßte bei den zu meist riesigen Feldern in der UdSSR die Kopplung von Daten der Sensoren MSU-S (IFOV = 250 m) und MSU-M (IFOV ca. 1 km) in vielen Gebieten eine bereits aus-

reichend genaue Klassifizierung und Flächenbestimmung landwirtschaftlicher Ressourcen ermöglichen, auf jeden Fall aber die Nutzung multispektraler digitaler Daten mit einem IFOV von ca. 100 m, wie sie nach [61] inzwischen von operativen METEOR-Satelliten gewonnen werden. Dagegen ist in Kanada nach [124] trotz der überwiegend großen Felder (meist > 40 ha, s. Abb. 39) die Genauigkeit der automatischen Flächenbestimmung und Klassifizierung und damit auch die Zuverlässigkeit der Ertragsprognosen anhand von LANDSAT- und Wettersatellitendaten gering, da schmale langgestreckte Felder dominieren.

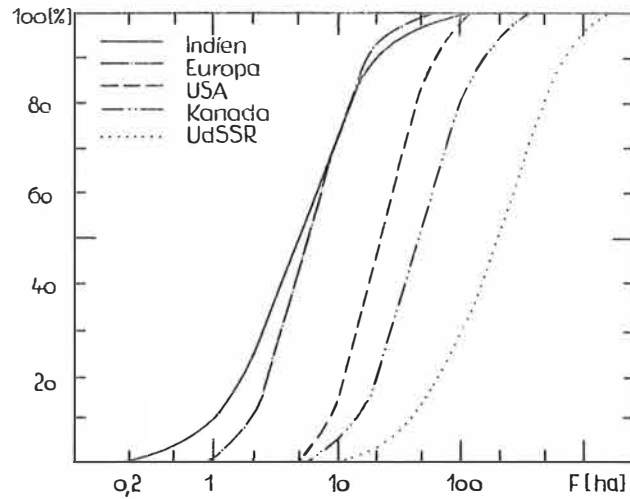


Abb. 39. Kumulative Häufigkeitsverteilung von Feldgrößen (aus CAZENAVE [123])

Nachfolgend sollen einige der wichtigsten Methoden der Sammlung und Auswertung von Fernerkundungsdaten dargestellt und deren spezifische Besonderheiten herausgearbeitet werden.

4.4. Methoden der Datensammlung, Interpretation und Verifikation

4.4.1. Sammlung von Daten in verschiedenen Niveaus und ihre gemeinsame Auswertung

Daten der Satellitenfernerkundung haben für sich allein bereits drei entscheidende Vorteile gegenüber Verfahren der Flugzeug- und bodengebundenen Erkundung. Zum ersten ist es der synoptische Überblick über große Gebiete unter gleichen Aufnahmebedingungen. Mit einer einzigen Aufnahme wird ein Territorium erfaßt, für das ansonsten ein Mosaik aus einigen 100 bis einigen 1000 Luftaufnahmen erforderlich wäre. Die Überdeckung sehr großer Gebiete mit Luftaufnahmen ist zeitaufwendig und teuer und die Herstellung entsprechend großer Mosaiks kompliziert und langwierig. Deren Aussagefähigkeit bezüglich großräumiger Phänomene wird stark reduziert durch den Umstand, daß es praktisch meist nicht möglich ist, für alle Teilaufnahmen gleiche Aufnahmebedingungen (Sonnenstand, atmosphärische Bedingungen etc.) und paßfähige Schwärzungsverteilungen zu erzielen. Dadurch wird die Erkennbarkeit großräumiger Strukturen und ihres inneren Zusammenhanges gegenüber Satellitenaufnahmen oft wesentlich erschwert. Großregionale Mosaiks sind praktisch nur mit Satellitenaufnahmen möglich. Dabei ist es vorteilhaft, daß die verschiedenen Aufnahmen bei geeigneten Bahnparametern sonnensynchron, d. h. stets zur gleichen Ortszeit gewonnen werden.

Auf den zweiten entscheidenden Vorteil, die Möglichkeit von regelmäßigen Wiederholungsbeobachtungen in kurzen Zeitabständen, war bereits in 3.1. wiederholt verwiesen worden. Solche Wiederholungsbeobachtungen wären für große Gebiete mit Flugzeugbefliegungen weder technisch realisierbar noch ökonomisch vertretbar. Drittens gestatten Satelliten auch die regelmäßige Gewinnung von Daten aus riesigen unzugänglichen Festlands- und Meeresgebieten, für die Erkundungen mit konventionellen Methoden nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich sind.

Trotz der genannten prinzipiellen Vorteile der Satellitenfernerkundung für die regionale Aufklärungserkundung, kleinmaßstäbige Kartierung, Kartenrevision und Überwachung dynamischer Phänomene ist sie auch bei Nutzung hochauflösender ziviler Sensorsysteme kein Ersatz, sondern nur eine bedeutsame Ergänzung für entsprechende Flugzeugerkundungen. Letztere gestatten nach wie vor wesentlich detailliertere Aussagen. Um diese in kurzer Zeit auch für große Gebiete kosteneffektiv gewinnen zu können, ist die Sammlung von Daten in verschiedenen Niveaus und ihre gemeinsame Auswertung zusammen mit weiteren unabhängigen Daten und Informationen erforderlich. Dieses Herangehen wird in der englischen Literatur allgemein als "multi-stage sampling" und "integrated survey" bezeichnet. Das Konzept wird aus Abb. 40 deutlich.

Zwecks Gewinnung detaillierter und zuverlässiger Aussagen über große Gebiete werden die interessierenden Parameter lediglich für eine begrenzte Anzahl repräsentativer Punkte bzw. Teilgebiete mit der erforderlichen Genauigkeit ermittelt. Diese Teilgebiete werden nach strategischen Gesichtspunkten der statistischen Stichprobennahme aus größeren Gebieten ausgewählt, die bezüglich der untersuchten Merkmale (z. B. Landnutzungstypen) als homogen angesehen werden können. Homogene Merkmalsgebiete des gleichen Typs formen eine Schicht. Dabei wird das Auswahlverfahren so gewählt, daß die Wahrscheinlichkeit für die Auswahl von Teilgebieten aus den verschiedenen Schichten proportional zur Konzentration der interessierenden Ressourcen (z. B. Wasser, Wald, Feldfrüchte etc.) in

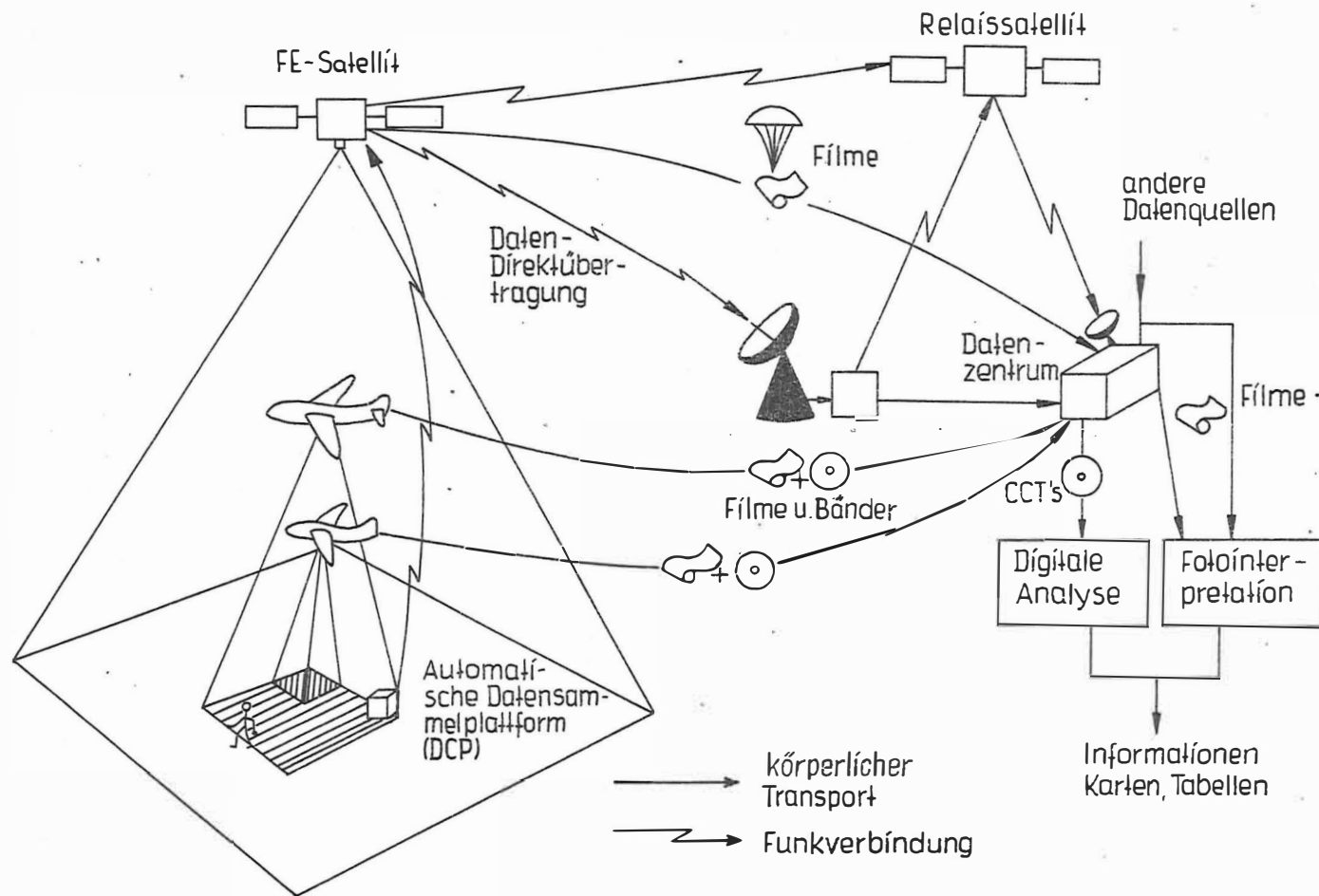


Abb. 40. Struktur eines integrierten Systems der Erdfernerkundung

den Schichten ist. Die für die Teilgebiete ermittelten repräsentativen Stichprobenergebnisse werden dann auf die entsprechenden Schichten ausgedehnt (s. 4.4.3. und 4.4.4., WIGTON und BORMANN [89]).

Satellitenaufnahmen eignen sich wegen ihres synoptischen Überblicks bestens für die Unterteilung ganzer Länder/Regionen in homogene Merkmalsgebiete. Flugzeugaufnahmen gestatten dann die Detailerkundung der ausgewählten repräsentativen Teilgebiete, während durch Bodenmessungen jene Größen und Merkmale bestimmt werden, die nicht oder nicht genau genug direkt aus den Daten der Flugzeug- und Satellitenfernerkundung ableitbar sind. Dabei müssen die gesuchten Parameter zumindest mit der Genauigkeit gemessen werden, wie sie von der Auswertung der Fernerkundungsdaten erwartet wird. Die Bestimmung des Streubereichs der Parameter ist ebenfalls wünschenswert (s. 4.3.2.). Als ein spezielles Beispiel für die Anwendung dieser Methode wird in 4.4.4. die Konstruktion des Flächenrahmens für die Sammlung landwirtschaftsstatistischer Daten ausführlicher dargestellt. Zur Illustrierung kann auch ein Beispiel aus der Forstwirtschaft dienen. Erkundet werden soll z. B. das Nutzholzvolumen verschiedener Baumarten in den Waldgebieten einer Region. Durch Satellitenaufnahmen können die Waldregionen lokalisiert, grob klassifiziert, die Flächen der Bestände ermittelt und geeignete Teilgebiete für die Flugzeugüberfliegungen und Bodenmessungen festgelegt werden. Durch Bodenmessungen kann die Höhe und Dicke einer repräsentativen Auswahl von Bäumen der verschiedenen Arten ermittelt werden. Von niedrig fliegenden Flugzeugen aus ist es möglich, mittels Stereopaaren die Baumhöhen zu ermitteln und oft auch noch die Baumarten zu identifizieren. Von höher fliegenden Flugzeugen aus können dann individuelle Bäume im Waldbestand meist nicht mehr unterschieden werden, doch ist es immer noch möglich, die Arten des Baumbestandes mit ausreichender Genauigkeit einzuschätzen und den Anschluß an die Satellitenaufnahmen und die dort abgegrenzten homogenen Merkmalschichten herzustellen. In analoger Weise bewährt sich die Datensammlung in mehreren Niveaus für alle Arten der Landnutzungserkundung, der Bewertung des Landpotentials (Bodenqualität, Bodenfeuchtigkeit, Baugrundverhältnisse, oberflächennahe Massenrohstoffe etc.), aber auch für geomorphologische und strukturgeologische Untersuchungen. Die Identifizierung der Bodenobjekte wird dabei in vielen Fällen erleichtert, wenn die Datensammlung in mehreren Niveaus durch die Datensammlung zu verschiedenen Zeitpunkten ergänzt wird.

4.4.2. Methodik der Sammlung und Nutzung unabhängiger Bodeninformationen

Die Sammlung unabhängiger Bodeninformationen ist eine entscheidende Voraussetzung für die Ausschöpfung der Informationspotenzen der Fernerkundung und damit für den Erfolg der meisten Fernerkundungsprojekte. Die Ursache dafür ist, daß (von wenigen Ausnahmen abgesehen) die vom Fernerkundungssensor aufgezeichneten Daten (spektrale Strahlungsintensitäten, Polarisationscharakteristiken) nicht direkt den Parametern entsprechen bzw. zugeordnet werden können, die den Nutzer interessieren. Der Zweck der Sammlung unabhängiger Informationen bezüglich der Bodenobjekte besteht somit darin, die Fernerkundungsdaten auf die gesuchten Merkmale und Bedingungen zu beziehen. Die Genauigkeit der Interpretation hängt davon ab, wie genau diese Beziehungen bekannt sind. Die Kosteneffektivität der Fernerkundung wird deshalb entscheidend mit beeinflußt durch den Aufwand, den die Aufstellung dieser Beziehungen erfordert. Ziel einer rationellen

Strategie für die Sammlung der dazu benötigten unabhängigen Zusatzinformationen ist es, diese in dem zur Erfüllung der Aufgabe erforderlichen Umfang mit minimalem Aufwand zu gewinnen.

Umfang und Art der benötigten Bodeninformationen hängen nicht nur ab von der Zielstellung des Projekts, sondern auch vom verwendeten Sensortyp, dem Zeitpunkt der Messungen und den genutzten Methoden der Datenanalyse. Um sowohl die erforderlichen Boden- als auch ergänzenden Fernmessungen (z. B. vom Flugzeug aus) vernünftig zu konzipieren, ist ein Modell erforderlich, das die vom Nutzer gesuchten Parameter auf die Fernerkundungsdaten bezieht. Dabei kann es sich je nach Problem und Kenntnisstand sowohl um rein gedankliche qualitative Modelle im Kopf des Nutzers aber auch um explizite mathematische Formulierungen handeln, die die Beziehungen zwischen den Schlüsselparametern präzise formulieren (WAGNER und LOWE [92]). Das Minimalmodell muß die vom Sensor gemessenen Strahlungsbeiträge in Beziehung bringen zur beobachteten Szene und ihrer Umwelt. Dazu müssen wir u. a. die Wechselwirkung zwischen der elektromagnetischen Wellenstrahlung und der Oberfläche verstehen (s. 2.2.) und für den Fall, daß der gesuchte Parameter selbst kein Oberflächenphänomen ist, wissen, in welcher Beziehung dieser Parameter zu den physikalischen und geometrischen Eigenschaften der Oberfläche steht. Bodeninformationen sind der Schlüssel sowohl für die Entwicklung als auch für die Nutzung des Modells.

Nach der Formulierung des Modells muß dieses geeicht werden, d. h. es müssen die für den Ort und den Zeitpunkt der Sammlung der Fernerkundungsdaten (Satelliten- oder Flugzeugüberfliegung) gültigen Bedingungen identifiziert werden. Als weitere Stufe in diesem Prozeß folgt dann die Verifizierung des Modells und schließlich die der gewonnenen Ergebnisse (Genauigkeitstest).

Es gibt zwei verschiedene Arten von Bodeninformationen:

- a) "historische", d. h. früher gesammelte Informationen über das Gebiet, dargestellt in Karten, Berichten, Aufzeichnungen oder Beobachtungen, wenn vorhanden auch frühere Lufterkundungs- oder Satellitenaufnahmen;
- b) gegenwärtige Beobachtungen oder Feldmessungen.

Historische Informationen sollten sowohl im Planungsstadium eines Fernerkundungsexperiments als auch bei der Datenauswertung benutzt werden. Art, Umfang und Qualität historischer Daten und Informationen bestimmen wesentlich, wieviel neue Fernerkundungs- und Bodendaten gesammelt und bis zu welchem Detailliertheitsgrad diese ausgewertet werden müssen. Das wiederum beeinflußt die Kosten eines Fernerkundungsprojektes. Für die Fernerkundung sehr dynamischer Phänomene, z. B. der Wachstumsbedingungen von Feldkulturen, muß die Sammlung aktueller Bodeninformationen zur (oder etwa zur) Zeit des Satelliten- und/oder Flugzeugüberfluges erfolgen, um repräsentativ zu sein. Dagegen kann sie für die Untersuchung langsam veränderlicher Objekte (z. B. Wälder, Böden, Gesteinstypen) auch noch in größeren Zeitabständen danach stattfinden.

Art und Weise der zu sammelnden Bodeninformationen sind im Detail in [92] beschrieben. Sie umfassen Informationen über den Ort und erforderlichenfalls auch die Zeit, über spezifische Umwelt- und Objektparameter, die Gegenstand der Untersuchungen im Rahmen des Fernerkundungsprojektes sind (wie Bodentyp und -feuchtigkeit, Pflanzentyp und

-reifegrad, Gesteinstyp), Informationen bezüglich des Geländes (wie Textur und Rauigkeit der Oberfläche, Hangneigung, Oberflächenbedeckung) sowie der Strahlungsverhältnisse (Strahlungshaushalt in Bodennähe, spektrale Reflexions- und Emissionscharakteristiken) und der atmosphärischen Bedingungen. Da sich die atmosphärischen Bedingungen und Strahlungsverhältnisse sehr schnell ändern können, sollten Strahlungsmessungen in Bodennähe möglichst zum Zeitpunkt der Fernbeobachtung oder zumindest in vergleichbaren repräsentativen Situationen durchgeführt werden.

Feldbeobachtungen der Spektralcharakteristiken der zu unterscheidenden Objekte sind aber nicht nur wichtig für die Interpretation von vorhandenen Fernerkundungsdaten. Sie gestatten auch die optimale Filterauswahl für geplante Fernerkundungsbefliegungen. Zusätzliche Kosten solcher Bodenmessungen müssen deshalb abgewogen werden gegen die Wichtigkeit der Aufgabenstellung und das Risiko, daß die zu beobachtenden Merkmale bei nicht optimierter Filterkombination nicht sicher feststellbar sind.

Auf die Repräsentativität der gesammelten Daten- und Informationen und damit die Richtigkeit der Auswertung der Fernerkundungsdaten hat die befolgte Sammelstrategie großen Einfluß. Bereits existierende Meßplätze an Observatorien oder automatisch arbeitenden unbemannten Meßstationen/-bojen mit laufenden und z. T. umfangreichen historischen Aufzeichnungen liefern oft wertvolle punktuelle Daten und Informationen. Sie erfordern ein Minimum an zusätzlichen Aufwendungen. Die so erhaltenen Stichproben sind aber nicht unbedingt repräsentativ für größere Gebiete. Ähnliches gilt für speziell ausgewählte Meßgebiete. Sie eignen sich zwar meist gut für die Eichung von Fernerkundungsdaten aber nicht immer für eine zuverlässige Bewertung der Genauigkeit der Ergebnisse. Weitverbreitet ist auch das Sammeln von Bodeninformationen entlang von Traversen senkrecht zum generellen Trend zonaler Merkmale.

Die beste wenngleich auch aufwendigste Methode der Sammlung von Bodeninformationen ist die Methode der "geschichteten" Stichprobennahme in Verbindung mit der Datensammlung in mehreren Niveaus. Sie liefert relativ unverfälschte Stichproben, die sich sowohl für die Eichung der Daten als auch für die Verifizierung der Interpretation eignen. Allerdings hängt die Prozedur von der ursprünglichen Auswahl der Schichten ab. Bei der Datensammlung in mehreren Stufen bzw. Niveaus wird das Untersuchungsgebiet in immer kleinere homogene Gebiete unterteilt, aus denen repräsentative Stichproben mit wachsendem Grad an Detail entnommen werden. Die Stichprobenergebnisse können dann schrittweise auf die ausgesonderten homogenen Merkmalschichten des ganzen Untersuchungsgebietes extrapoliert werden.

Für einige einfache Überwachungsaufgaben wie beispielsweise die Bestimmung der Größe der angebauten Weizenflächen oder der Fläche von Kahlschlägen kann der Umfang der zur Verifizierung benötigten Bodeninformationen mit wachsender Anzahl von Satellitenüberflügen und zunehmender Vertrautheit mit den typischen Datenmerkmalen schrittweise verringert werden. Im folgenden soll die Methode der Aussonderung von homogenen Merkmalschichten näher beschrieben werden.

4.4.3. Zur Abgrenzung homogener Merkmalsschichten in Fernerkundungsaufnahmen

Während in hochauflösenden Aufnahmen von Flugzeugbefliegungen noch viele Details erkennbar und auf Grund ihrer Form, Struktur, Textur, Farbe etc. oft sofort identifizierbar sind, verschmelzen kleinere Objekte in gröber auflösenden Satellitenfernerkundungsaufnahmen zu mehr oder weniger deutlich strukturierten geometrisch-spektralen Mustern. Struktur, Helligkeit und Färbung der Muster sind in der Regel typisch für bestimmte Objektassoziationen. Zur Konzipierung einer sinnvollen Strategie zur Sammlung von Bodeninformationen zwecks Identifizierung der Bodenobjekte und Quantifizierung der gesuchten Merkmalsparameter ist es zunächst erforderlich, Gebiete mit unterschiedlichen Mustern gegeneinander abzugrenzen. Alle Gebiete vom gleichen Mustertyp formen eine homogene Merkmalsschicht.

Noch vor Beginn der "Schichtung" des Bildes und der Sammlung von Bodeninformationen ist es wünschenswert, alle bereits vorhandenen Informationen über das Gebiet zusammenzustellen und daraus eine Arbeitshypothese über die Entwicklung der Landschaft und ihrer Oberflächenbedeckung in Raum und Zeit abzuleiten. Sie hilft uns, die im Bild beobachteten Muster in vernünftiger Weise Foto-Landschaftsregionen zuzuordnen und von den Mustern auf die Natur der Formen in den entsprechenden geomorphologischen Einheiten in ihrer Beziehung zu den Gesteins- und Bodentypen, dem Drainagesystem, der Lage des Grundwasserspiegels und der Vegetationsbedeckung zu schließen. Dieses Herangehen sichert zugleich die Auswahl repräsentativer Traversen und Testgebiete für die Sammlung der erforderlichen Bodeninformationen zur Verifizierung des Modells. Dabei kommt es darauf an, die Beziehung der Oberflächenformen und -objekte und ihrer Reflexions- und Emissionscharakteristiken zur Geologie, Pedologie, Hydrologie, Pflanzenbedeckung u. a. herauszuarbeiten.

Für die Klassifizierung der Landschaft eines ausgedehnten Gebietes anhand der in Fernerkundungsaufnahmen beobachteten Muster erweist sich auch ein phyto-geomorphologisches Klassifikationsystem der Landeinheiten als sehr nützlich [94], [136]. Dabei wird das Land entsprechend seiner biologischen Produktivität klassifiziert. Eine solche Einteilung liefert gleichzeitig wichtige Informationen für die Planung, Bewirtschaftung und Entwicklung seiner biologischen Ressourcen. Als Beispiel für eine Landklassifizierung auf der Grundlage von Landform und Vegetation kann eine umfangreiche Studie in der Arusha-Region von Tansania dienen [15]. Anhand von LANDSAT-Daten war es möglich, 550 verschiedene Landschaftseinheiten und 14 Weidelandtypen mit unterschiedlicher Eignung für die Futterproduktion abzugrenzen. In Verbindung mit detaillierteren Informationen aus Luftaufnahmen und Bodenbegehungen konnten vielversprechende Gebiete für Land- und Weidewirtschaft sowie für die Grundwassererschließung identifiziert werden.

Ein ähnliches Herangehen für die Erkundung natürlicher Ressourcen ist auch in ariden und semiariden Zonen möglich, wobei dann für die Klassifizierung der Landeinheiten die Betonung auf geomorphologischen und pedologischen Kriterien liegt [95]. In beiden Fällen wird das Land in immer kleinere und zunehmend homogenere Teile (Landzonen, -provinzen, -regionen, -systeme, -ketten, -facetten und -elemente) unterteilt. Landfacetten und -elemente sind normalerweise nur in großmaßstäbigen Luft- und Satellitenaufnahmen identifizierbar.

4.4.4. Konstruktion eines Flächenrahmens für die Datensammlung

Nach WIGTON und BORMANN [89] ist die Nutzung eines Flächenrahmens (engl.: area frame sampling) eine grundlegende Methode der Datensammlung für ein schnelles und umfassendes landwirtschaftliches Informationssystem (s. auch [90]). Sie gestattet die Schätzung aller Arten landwirtschaftlicher Produkte wie auch ökonomischer Parameter für das laufende Jahr. Die Schätzungen können auch für sehr große Gebiete bereits wenige Wochen nach Beginn der Datensammlung vorliegen. Sie beruhen auf einer objektiven statistischen Methode der Datensammlung und Auswertung. Übungs- und Anschauungsmaterial zur Konstruktion des Gebietsrahmens enthalten [89], [99], [101].

Nur für homogene Grundgesamtheiten geben Zufallsstichproben zuverlässige Schätzungen der Parameter der Grundgesamtheit. Landwirtschaftliche Parameter sind aber über große Gebiete hinweg meist nicht gleichmäßig verteilt. Variationen in der Topographie, den Bodenverhältnissen, der Temperatur, der Niederschlagsmenge, der Besiedlungsdichte etc. bedingen Unterschiede der Landnutzung. Der erste Schritt in der Konstruktion des Flächenrahmens ist deshalb die Abgrenzung größerer Gebiete homogener Landnutzung bzw. -bedeckung, z. B. eine Unterteilung in Wald, Wasser, intensiv kultiviertes Land, extensiv kultiviertes Land, nicht landwirtschaftlich genutztes Land (wie hohe Berge, Wüsten, Industrie- und Erholungsgebiete), Stadtkerne und Vorort-Siedlungsgebiete. Neben aktuellen topographischen und Landnutzungskarten eignen sich dafür wegen ihres synoptischen Überblicks vorzüglich Satelliten- und kleinmaßstäbige Lufterkundungsaufnahmen. Sie müssen nicht unbedingt neuesten Datums sein, da sich Landnutzungsformen größerer Gebiete von Jahr zu Jahr nur geringfügig verändern. Ein Flächenrahmen kann deshalb in der Regel auch für mehrere Jahre verwendet werden.

Die Abgrenzung homogener Landbedeckungs- und -nutzungsgebiete oder sogenannter Schichten sollte in Satellitenaufnahmen zunächst ohne Beachtung physikalischer Grenzen auf dem Boden bei voller Konzentration des Interpretators auf die Erkennung und Unterscheidung der entsprechenden Fotomuster erfolgen. Bei der Übertragung der Schichten auf großmaßstäbige Karten (Maßstäbe zwischen 1 : 20 000 und 1 : 50 000 sind am besten geeignet) müssen ihre anfänglichen Grenzen geringfügig so verändert werden, daß sie mit physikalischen Grenzen am Boden wie Landstraßen, Fußwegen, Eisenbahnen und Flüssen zusammenfallen, die leicht erkannt und im Gelände verfolgt werden können. Sind keine genauen aktuellen Karten vorhanden, dann sind Luftaufnahmen ein unentbehrliches Hilfsmittel. Stehen hochauflösende fotografische Satellitenaufnahmen ($A_f < 20$ m) zur Verfügung, dann können sie notfalls auch für diesen Zweck als Kartenbasis dienen.

Anschließend werden im Hinblick auf die Datensammlung homogene Schichten zunächst in primäre Einheiten (auch Rahmeneinheiten genannt) unterteilt. Aus diesen wird eine kleine Anzahl nach einem Zufallsverfahren ausgewählt und weiter in etwa 6 bis 20 sogenannte Segmente untergliedert. Sowohl die primären Einheiten als auch die Segmente müssen eindeutig feststellbare physikalische Grenzen haben. Nur so können die Bodeninformationen im Gelände von dem mit der statistischen Zählung Beauftragten korrekt erfaßt und zugeordnet werden. Für die genaue Abgrenzung der primären Einheiten und Segmente sind ebenfalls großmaßstäbige Karten oder Luftaufnahmen erforderlich.

Die Größe der Segmente hängt von den Bedingungen in jeder Schicht, der Art der Landnutzung und der Bevölkerungsdichte ab und variiert zwischen etwa 0,25 bis 0,5 km² in Städten, 1 bis 5 km² in landwirtschaftlich genutzten und 10 bis 50 km² in nicht landwirtschaftlich genutzten Gebieten. Die meisten Segmente werden den intensiv kultivierten Schichten zugeordnet, um die sichersten Schätzungen aus den Gebieten zu erhalten, die den größten Anteil an der landwirtschaftlichen Gesamtproduktion haben. Aus jeder in Segmente unterteilten primären Einheit wird dann ein Segment für die statistische Zählung ausgewählt. In den ausgewählten Segmenten werden dann die Bauern befragt, die Feldgrößen und der Fruchtbestand bestimmt und Feldfruchtproben zur Ertragsabschätzung entnommen. Die Interviews sollten etwa monatlich in der Hauptwachstumssaison (Juni bis September) durchgeführt werden. Jedes Segment innerhalb einer Schicht ist für diese Schicht im statistischen Sinne repräsentativ, wenn alle Bedingungen der Unterteilung und Auswahl korrekt befolgt werden. Deshalb können die durch die statistische Zählung in den Segmenten erfaßten Angaben auf das Gesamtgebiet der jeweiligen Schichten durch einfache Multiplikation mit dem Flächenverhältnissfaktor ausgedehnt werden.

Als Beispiel möge die USA dienen, die in etwa 3 Millionen Segmente unterteilt ist, von denen 16 OCO durch die statistische Zählung erfaßt werden. Folglich werden die notwendigen Bodeninformationen nur von etwa 0,5 % der Gesamtfläche eingeholt. Trotzdem liegen bei sorgfältiger Konstruktion des Flächenrahmens und zuverlässigen Zählungsverfahren in den Segmenten bereits wenige Wochen nach Beginn der Zählungen ausreichend genaue Schätzungen der landwirtschaftlichen Gesamtproduktion vor. Während bei der Konstruktion der Flächenrahmen ursprünglich nur von verfügbaren Karten und Luftaufnahmen ausgegangen wurde, werden jetzt auch planmäßig LANDSAT-Daten einbezogen. Das gilt sowohl für die Schichtung unter Nutzung von Satellitenbildern als auch für die Schätzung der Anbauflächen unter Verwendung digitaler Daten in Verbindung mit Bodeninformationen. Die Varianz der Flächenschätzungen wird dadurch für Kulturen mit signifikant verschiedenen Spektralsignaturen wesentlich reduziert. Aus dem Gesagten wird deutlich, daß das methodische Herangehen bei der Konstruktion des Flächenrahmens dem einer komplexen Mehrstufenerkundung (s. 4.4.1.) sehr ähnelt. Satelliten-Fernerkundungsdaten, auch solche hoher Auflösung, sind nur eine zusätzliche, wenn auch sehr nützliche Datenquelle. Durch ihre Verwendung kann die Konstruktion der Flächenrahmen insbesondere für große Territorien wesentlich beschleunigt und die statistische Repräsentativität der Stichprobenzählungen verbessert werden. Letztendlich aber hängt die Brauchbarkeit des Ergebnisses von der sorgfältigen gezielten Sammlung und Aufbereitung der Bodeninformationen ab.

4.4.5. Agro-meteorologische Methode der Abschätzung von Ernteerträgen

Die Identifizierung von Anbaukulturen und die Bestimmung der Anbauflächen sind nur erste notwendige Schritte für eine Vorhersage des Ernteaufkommens. Sie müssen ergänzt werden durch eine Prognose der Hektarerträge. Das ist bis zu einem gewissen Grade mit Hilfe agrometeorologischer (bzw. richtiger: agroklimatologischer) Modelle möglich, d. h. durch eine numerische Beschreibung der Wechselwirkung der Feldkulturen mit ihrer Umwelt (Boden, Bodenfeuchtigkeit, Atmosphäre, Sonneneinstrahlung) in verschiedenen Wachstumsstadien. Zwei Modelle werden in den letzten Jahren wiederholt diskutiert:

- a) das EARTHSAT-Modell;
- b) das LACIE-Modell (engl.: Large Area Crop Inventory Experiment).

Die Anwendung des EARTHSAT-Modells umfaßt die folgenden Stadien (s. BARRITT in [101]):

- Erstellung einer Ökozonenkarte des Untersuchungsgebietes;
- Zusammenstellung der phänologischen Kalender für jede Kultur und Ökozone;
- Bewertung des Trends der Hektarerträge in jeder Ökozone;
- Gewinnung und Auswahl der meteorologischen Daten bzw. daraus abgeleiteter Größen, die das Pflanzenwachstum beeinflussen;
- Gewinnung und Analyse von Wettersatellitendaten für die Verbesserung der in das Wachstumsmodell eingehenden Niederschlagswerte;
- Gewinnung und Bearbeitung von Satellitendaten für die Aktualisierung der Angaben zu den Anbauflächen der Hauptkulturen;
- Bewertung des Produktionspotentials im Untersuchungsgebiet für jede Teilfläche eines Gitternetzes (s. auch 4.4.6., "grid approach");
- Berechnung täglicher Ertragsabschätzungen für jedes Gitterelement.

Ein ähnliches Szenarium, das u. a. den Beitrag von FE- und Wettersatelliten auf den verschiedenen Stufen der Modellbildung und laufenden späteren Modellrevision ausweist, gibt HOWARD in [137] an. Aus beiden Ablaufschemata ist offensichtlich, daß ein solches Modell nur dann brauchbare Ergebnisse liefert, wenn neben Satellitendaten und daraus abgeleiteten Größen auch Daten aus unabhängigen Bodenkontrollmessungen eingehen.

Während des großangelegten LACIE-Experiments der NASA (1974-1977) wurde die Möglichkeit der Vorhersage der Weizenproduktion unter Nutzung von LANDSAT-Daten in Verbindung mit agro-meteorologischen Informationen untersucht. LANDSAT-Daten dienten dabei der Ermittlung der Größe der Weizenanbauflächen und Daten meteorologischer Satelliten der Gewinnung von Informationen über monatliche Durchschnittstemperaturen, Niederschläge und in einigen Fällen auch der potentiellen Evapotranspiration als ein Maß des Belastungsgrades der Pflanzen. Entsprechende Informationen werden in digitale Modelle eingegeben, die aus der Korrelation entsprechender meteorologisch-klimatologischer Daten mit Erntertragsdaten zurückliegender Jahre abgeleitet wurden. Dabei müssen für verschiedene Weizenanbaugebiete verschiedene Modelle benutzt und auch nichtmeteorologische Faktoren der Beeinflussung der Erträge, wie z. B. die Einführung neuer Weizensorten bzw. stärkere Düngung, berücksichtigt werden. Der Einfluß abnormaler Wetterepisoden, wie Stürme, Hagelschlag oder Fröste muß von Fall zu Fall durch Schätzwerte korrigiert werden. Vorläufige Ergebnisse des LACIE-Experiments werden in [124] mitgeteilt. Das Genauigkeitsziel konnte nur z. T. erreicht werden.

Nach [15] besteht nur zurückhaltender Optimismus bezüglich der Eignung von LANDSAT-MSS- und Wettersatellitendaten für Weizen-ertragsprognosen in Entwicklungsländern. Völlig unklar sei auch ihre Eignung für Anbauflächen- und Ertragsabschätzungen anderer Kulturen, obgleich Pläne der FAO für ein globales landwirtschaftliches Informationssystem befriedigende Prognosen auch für Mais, Sojabohnen und Reis nach mehrjähriger Erprobungszeit versprechen. Ausreichend zuverlässige Ertragsprognosen müssen generell als ein Langzeitziel angesehen werden. Dabei ist zu erwarten, daß zukünftige automatische Satellitensysteme mit verbesserter geometrischer, spektraler und radiometrischer Auflösung geeignetere Daten sowohl für die Ermittlung der Anbauflächen als auch die Identifizierung von Kulturen liefern werden, so daß auch in Ländern mit kleineren Feldgrößen und heterogenen Kulturen Ertragsprognosen mit Hilfe von Satellitendaten Erfolgsaussichten haben.

Aber selbst bei vollem Zugang zu notwendigen Bodenkontrollinformationen und tatsächlichen Produktionsziffern aus den untersuchten Gebieten ist das Problem der agrometeorologischen Ertragsprognose offensichtlich kompliziert. Unter Verwendung von Daten bodengebundener Wetterstationen werden z. B. in der BRD seit 1972 routinemäßige Vorhersagen gemacht [101]. Die Fehler liegen in der Regel um 4 bis 5 %. Wesentlich größer war der Fehler für 1976, einem Jahr extremer Witterung. Die Genauigkeit hängt entscheidend davon ab, ob genügend zuverlässige historische Angaben über Ertragsziffern und die Variation der kritischen meteorologischen Parameter vorliegen. Datenreihen von 10 bis 20 Jahren sind in der Regel noch zu kurz, um alle möglichen Variationen der Wetterbedingungen zu enthalten. Längere Datenreihen sind meist inhomogen bedingt durch Verwendung unterschiedlicher Sorten, sich verändernder Anbau-, Pflege- und Erntetechniken oder unvollständige meteorologische Datenreihen. Nach HANUS ist generell die Varianz tatsächlicher Vorhersagen etwa doppelt so groß wie die Varianz retrospektiver Ertragsberechnungen innerhalb der Datenreihen und die Streuung der tatsächlichen Erträge größer als die der Prognoseergebnisse. Das aber bedeutet in der Regel eine Unterschätzung in Jahren hoher und Überschätzung in Jahren geringer Erträge. Systematische Fehler dieser Art könnten durch Korrekturen reduziert werden.

4.4.6. Klassifizierung von Landbedeckung und -nutzung

Bereits in der Problembestimmung zu Beginn der Arbeit war darauf hingewiesen worden, daß eine Klassifizierung der Fernerkundungsdaten nach den Ordnungsschemata der traditionellen bodengebundenen Fachdisziplinen nicht generell möglich ist. Gründe dafür wurden aus den Darlegungen der naturwissenschaftlichen Grundlagen der Fernerkundung deutlich. Cluster-Analysen der über komplexen Landnutzungsgebieten gemessenen Spektralintensitäten zeigen, daß auch bei Verwendung mehrerer Spektralkanäle die Punktwolken für verschiedene traditionelle Objektklassen statistisch nicht separierbar sind. In solchen Fällen macht sich eine Verschmelzung von Klassen erforderlich, um zu neuen, mit Methoden der Fernerkundung unterscheidbaren Objektklassen zu kommen.

Leider gibt es keine universellen fernerkundungsrelevanten Objektklassen. Welche traditionellen Objektklassen zusammengefaßt werden müssen, hängt sowohl von den lokalen Bedingungen als auch von den Sensorparametern ab. Klassifizierungsschemata müssen deshalb auf regionaler Grundlage erarbeitet werden und auf bestimmte Sensorcharakteristiken bezogen sein. Die letztgenannte Forderung macht die Dringlichkeit langfristig standardisierter Parameter für operative Fernerkundungssysteme offensichtlich. Bei der visuellen Klassifizierung der Landbedeckung und -nutzung ergeben sich wiederum neue Gesichtspunkte, da die radiometrische Differenzierbarkeit gegenüber der Verwendung digitaler Daten eingeschränkt ist, andererseits aber zusätzlich geometrisch-texturelle Informationen für die Klassifizierung genutzt werden können.

Das von der UNO-Organisation für Erziehung, Wissenschaft und Kultur (UNESCO) erstellte internationale Schema zur Vegetationsklassifikation wurde in Gemeinschaftsarbeit von FAO, UNESCO und dem UNO-Umweltprogramm UNEP modifiziert, um es für Zwecke der Überwachung von Veränderungen tropischer Urwaldgebiete und Weideländereien in Afrika unter Einbeziehung von Fernerkundungsdaten nutzen zu können. In Bolivien wurde in Zusammenarbeit von Agronomen, Bodenkundlern, Forstwirtschaftlern, Geologen, Geomorphologen und

Geographen nach gründlichen Felderkundungen ein neues System zur Klassifizierung von Landbedeckungs- und -nutzungstypen entwickelt. Es gestattete die umfassende Erkundung und thematische Kartierung des Landes im Maßstab 1 : 4 000 000, 1 : 1 000 000 und 1 : 250 000 unter Nutzung von LANDSAT-Aufnahmen [54], [125]. Die Legende für die Landbedeckungs-/Landnutzungskartierung im Maßstab 1 : 4 000 000 (Basisniveau 1) umfaßte folgende acht Kategorien:

- Gras- und Buschland
- Waldland
- Landwirtschaftlich genutztes Land
- Feuchtes oder überflutetes Land
- Unfruchtbares Land
- Wasserkörper
- Schnee und ewiges Eis
- Städtische Gebiete.

Im 2. Niveau der Landbedeckungs-/Landnutzungserkundung im Maßstab 1 : 2 000 000 wurde die Höhe als zusätzlicher Parameter einbezogen, womit sich 24 Unterkategorien ergaben. Im 3. Niveau (Maßstab 1 : 1 000 000) wurden die Feuchtigkeit und inhärente Merkmale der Kategorien berücksichtigt. Das führte zu 66 deutlich identifizierbaren und separierbaren Unterkategorien. Infolge der Flexibilität der erarbeiteten Legende war es möglich, auch die Morphologie als einen neuen Parameter einzubeziehen (4. Niveau, Maßstab 1 : 250 000) bzw. bei Verwendung digitaler Satelliten-Daten auch im Maßstab 1 : 50 000 zu arbeiten (5. Niveau).

Unter Nutzung dieser Legende war es möglich, die ersten komplexen Landbedeckungs-/Landnutzungskarten Boliviens im Maßstab 1 : 4 000 000 und 1 : 1 000 000 zu erstellen. Einschließlich der Arbeiten zur Definition der Legende, der visuellen Interpretation der Satellitenaufnahmen, der Feldarbeiten und der Zusammenfassung und kartographischen Darstellung aller Informationen wurden dafür ganze 6-Mann-Jahre benötigt.

Eine ähnlich umfassende Untersuchung der gegenwärtigen Landnutzung, des Bodenpotentials und der Bodenerosionsgefährdung wurde in Mexiko durchgeführt. Für diesen Zweck wurden zwei Aufnahmeserien verwendet, von denen die eine in der Trocken-, die andere in der Regenzeit gewonnen wurde. Die gesamte Studie, bei der fast $2 \cdot 10^6$ km² im Maßstab 1 : 10^6 kartiert wurden, nahm lediglich zwei Jahre in Anspruch und kostete ca. 200 000 \$. Kartiert wurden 9 Landnutzungskategorien mit einer Genauigkeit von 90 % [102].

Das sind hervorragende Beispiele für die zielstrebige Nutzung von Satellitenfernerkundungsdaten in der Phase der aufklärenden Erkundung großer Territorien. Diese Erkundungsphase ist für die meisten Entwicklungsländer typisch und als Voraussetzung für eine detailliertere Erkundung und solide Entwicklungsplanung überaus wichtig. Sie kann unter Nutzung preiswert erworbener oder bereitgestellter Satellitenaufnahmen mit einem Minimum an Investitionen von Kadern mittlerer technischer Qualifizierung in kürzestmöglicher Zeit bewältigt werden. Gleiches gilt für die notwendige wiederholte Landinventarisierung in Zeitabständen von wenigen Jahren zur Feststellung von Veränderungen in der Landnutzung, zumal diese oft dramatische großräumige Veränderungen im Landpotential zur Folge haben (z. B. Bodenerosion und Verwüstung durch unkontrollierte Ab-

holzung und Abgrasung). Die umfassende und rechtzeitige Gewinnung dieser notwendigen Daten durch konventionelle Mittel ist für viele Entwicklungsländer noch unerschwinglich.

Die Klassifizierungsergebnisse, insbesondere für Vegetationsbedeckung, werden auch bei qualitativer visueller Auswertung wesentlich besser, wenn multitemporale Aufnahmen zur Verfügung stehen. Wichtige Voraussetzungen für den Erfolg sind die genaue Kenntnis des phänologischen Kalenders für die verschiedenen Anbaukulturen im Untersuchungsgebiet, multispektrale Aufnahmen zu günstigen Zeitpunkten bezüglich der verschiedenen Wachstumsphasen (phänologische Fenster) sowie Regressionsbeziehungen für die Flächenanteile solcher Kulturen, die sich anhand ihrer Wachstumsphasen und photosynthetischen Aktivität (Chlorophyllgehalt) nicht deutlich unterscheiden [101]. Da keine Möglichkeit besteht, Kulturen der letztgenannten Art anhand multispektraler und multitemporaler Fernerkundungsaufnahmen zu unterscheiden, hat man den generalisierten Begriff der landwirtschaftlichen Systeme eingeführt, der den Möglichkeiten der Fernerkundung besser angepaßt ist. Landwirtschaftliche Systeme umfassen Komplexe von Kulturpflanzen und andere Formen der Vegetationsbedeckung. So unterscheiden z. B. NEARY und COINER [104] zwischen einem Gemüsesystem und einem Mais-Sojabohnen-Weizen-System anhand der zeitlichen Veränderung des Intensitätsverhältnisses in den LANDSAT-Spektralbändern 5 und 7 ($0,6 - 0,7 \mu\text{m}$ bzw. $0,8 - 1,1 \mu\text{m}$). Auch diese Unterscheidung beruht auf unterschiedlichen Wachstumskalendern und Erntepraktiken für beide Systeme und den entsprechenden Unterschieden in der Vegetationsbedeckung und photosynthetischen Aktivität im Laufe des Jahres. Genauere Aussagen bezüglich der Artenzusammensetzung und Ertragsanteile sind wiederum nur durch zusätzliche Bodeninformationen möglich.

DANJOY und SADOWSKI [110] berichten über eine sehr erfolgreiche forstwirtschaftliche Klassifizierung unzugänglicher Gebiete im peruanischen Urwald unter Nutzung digitaler LANDSAT-Daten (s. auch [54]). Obgleich bereits durch visuelle Interpretation der Aufnahmen größere Gebiete mit ökonomisch besonders interessierendem Palmenbestand gegenüber anderen Forstassoziationen recht klar ausgesondert und in ihrer engen Beziehung zu den vorherrschenden Drainagebedingungen studiert werden konnten, erwies sich die zuverlässige Abgrenzung und Kartierung in komplexen Gebieten mit graduellen Übergängen als unzuverlässig. Hier konnten durch automatische digitale Klassifizierung bessere Ergebnisse erzielt werden, insbesondere bei Anwendung der Mehrelementklassifizierung (MEK). Während sich bei der bildpunktweisen (Einzelelement-)Klassifizierung auf Grund der komplexen Zusammensetzung des tropischen Mischwaldes ein oft sehr fleckiges Bild ergab, führte die Anwendung der MEK, bei der die Klassifizierung eines jeden Bildelements unter Berücksichtigung der spektralen Strahlungswerte seiner unmittelbaren Nachbarn erfolgt, zu einer geglätteten Aussage. Sie spiegelte die tatsächlichen Verhältnisse der heterogenen Vegetationsverteilung wesentlich genauer wider. Das erlaubte eine zuverlässige Abgrenzung der verschiedenen Forstassoziationen im regionalen Maßstab sowie deren Zuordnung zu unterschiedlichen morphologischen Drainage- und Sedimentationsbedingungen.

Die besten Ergebnisse wurden bei einer Mittelung von 9 Bildelementen und deren Klassifizierung im vierdimensionalen Farbraum erzielt. Bereits eine nichtkontrollierte Klassifizierung ergab eine nahezu eindeutige Unterscheidung von Baumbeständen in ständig überflutetem, zeitweilig überflutetem, nicht überflutetem alluvialem sowie hügeligem Gelände. Bereits eine solche Grobklassifizierung ist für die forstwirtschaftliche Er-

schließung und Nutzung der Waldbestände von großer Bedeutung. Fehlklassifizierungen in einigen Teilen des Testgebietes hatten ihre Ursache in der Verzerrung der Spektralmerkmale infolge atmosphärischer Einflüsse, z. B. extrem hoher Luftfeuchtigkeit und Wolken-schleier. Sie konnten durch Einholung entsprechender unabhängiger Bodeninformationen korrigiert werden. Profilbegehungen durch die ausgesonderten Gebiete homogener Forst-assoziatonen ermöglichte die Feststellung und Extrapolation der Zusammensetzung der Baumarten und Nutzholzmengen in diesen Gebieten.

In der UdSSR nutzt man digitale Daten von METEOR-Satelliten, um aus dem Helligkeits-verhältnis in verschiedenen Spektralkanälen die Produktion pflanzlicher Biomasse für Wüsten-Weideland-Vegetation abzuleiten (KLESHCHENKO in [101]). Allerdings können nur durch die Eliminierung des Einflusses der Atmosphäre auf die Helligkeitswerte brauch-bare Ergebnisse erzielt werden. Das erfordert jedoch die Eichung der Satellitenaufnah-men. Zu diesem Zweck werden Testgebiete von $50 \times 50 \text{ km}^2$ ausgewählt und die pflanzliche Biomasse innerhalb dieser Gebiete mittels Fernerkundung von tieffliegenden Flugzeugen aus unter Nutzung der gleichen Spektralkanäle wie im Satelliten bestimmt. Der relative mittlere quadratische Fehler der Abschätzungen pflanzlicher Biomasse aus so geeichten Satellitendaten beträgt ca. 20 %. Die Berechnung der Produktivität der Wüsten-Weideland-Vegetation wird zweimal jährlich (Frühjahr und Herbst) durchgeführt. Sie wird nicht bildpunktweise berechnet, sondern als Durchschnittswert für Gitterflächen von $50 \times 50 \text{ km}^2$ (engl.: grid approach). Auf diese Weise ist es möglich, bereits 1 bis 2 Tage nach der Datengewinnung entsprechende Karten für riesige Gebiete (ca. 30 - 50 Millionen ha) zu erstellen und den zuständigen Landwirtschaftsbehörden für die Planung des Herdauftriebs zuzuleiten.

Generell eignet sich ein solcher generalisierender "grid approach" gut für die Über-wachung zeitlicher Veränderungen flächenhafter Phänomene in größeren Gebieten. Er wird u. a. von der FAO genutzt zur Überwachung von meteorologischen und Vegetationsfaktoren, die für die Entstehung von Wüstenheuschreckenplagen verantwortlich sind und auch empfo-hlen für die Überwachung ökologischer Veränderungen, z. B. im Zusammenhang mit der fort-schreitenden Verwüstung ganzer Landstriche [102]. Für solche Aufgaben eignen sich rech-nergestützte geographische Informationssysteme (z. B. [126]). In sie können Daten und Informationen aus verschiedensten Quellen, unterschiedlichen Maßstabs und unterschied-licher Genauigkeit eingegeben werden, darunter auch digitale Fernerkundungsdaten bzw. daraus abgeleitete verallgemeinerte Daten. Zwecks leichter Nutzung bezieht man sie auf ein geographisches oder anderes geeignetes Koordinatensystem, das das jeweilige Gebiet in Elemente geeigneter Größe unterteilt. Die Charakteristiken eines jeden Flächenele-ments bezüglich Klima, Bodenbeschaffenheit, Vegetationsbedeckung, Bodenfeuchtigkeit etc. können auf der Grundlage historischer und aktueller Daten von Bodenbeobachtungen, Luft- und Satellitenbildauswertungen u. a. Erkundungsmethoden klassifiziert und laufend aktua-lisiert werden. Die Charakteristiken der Flächenelemente lassen sich einzeln, kombiniert oder auf der Grundlage von Modellen über die Beziehungen der verschiedenen Faktoren auch unter bestimmten Gesichtspunkten ausgewertet abfragen. Dabei kann sie der Rechner sofort in Form geeigneter Kartendarstellungen ausdrucken.

Eine Methode zur generalisierenden Aufbereitung digitaler Fernerkundungsdaten im Zu-sammenhang mit der Schaffung solcher Informationssysteme wird von COINER und BRUCE [105]

beschrieben. Für Bildpunktmatrizen aus je 5 x 7 LANDSAT-Bildelementen (ca. 15 ha) werden die ersten und zweiten Momente sowie weitere Merkmale bestimmt. Sie gestatten eine generalisierte Charakterisierung und Unterscheidung der Flächenelemente und die Feststellung zeitlicher Veränderungen in ihnen. Auch für dieses Klassifizierungsverfahren gilt, daß es nur dann praktisch nutzbare Ergebnisse liefert, wenn die Korrelationsbeziehungen zwischen den generalisierten Bildparametern und den gesuchten Merkmalsassoziationen am Boden bekannt und separierbar sind.

Die Genauigkeit automatischer Klassifizierungen der Landnutzung und -bedeckung liegt etwa zwischen 60 und 95 %. Sie hängt außer von den Sensorparametern, dem angewandten Auswerteverfahren und der Anzahl und Art der unterschiedenen Merkmalsklassen auch von einer Vielzahl natürlich gegebener Faktoren ab. Dazu zählen insbesondere die jeweiligen meteorologischen Bedingungen, die Verfügbarkeit unabhängiger Bodeninformationen, die Komplexität der Szene und die Spektralcharakteristiken der untersuchten Objekte. Die Klassifizierungsgenauigkeit ist generell höher bei Verwendung multitemporaler Aufnahmen (ca. 95 % und besser in einfachen, relativ homogenen Gebieten mit wenigen Merkmalsklassen und ca. 75 - 80 % in komplexen Gebieten [69]).

4.4.7. Zur Feststellung und Überwachung von Umweltverunreinigungen

In Meinungsäußerungen von UNO-Mitgliedstaaten (siehe Anhänge zu [23]) zu einer den Problemkreis betreffenden Note des UNO-Sekretariats wird festgestellt, daß In-situ-Messungen von Umweltverunreinigungen nicht durch Satellitenfernerkundungssysteme ersetzt, sondern nur ergänzt werden können. Dabei ist die Satellitenfernerkundung vor allem nützlich für das Studium der Dynamik von Verunreinigungen, insbesondere für die Lokalisierung von Verunreinigungsquellen und -senken, die Untersuchung der Dispersion von Verunreinigungen sowie die Feststellung von Umweltschädigungen größeren Ausmaßes, vor allem, wenn sie krankhafte Veränderungen der Vegetation betreffen. Die Satellitenfernerkundung ist besonders dort geeignet, wo bodengebundene Systeme auf Grund der Größe und Unerschlossenheit der zu überwachenden Gebiete ökonomisch nicht vertretbar sind. In beschränktem Umfange sind auch direkte qualitative Aussagen z. B. zum Reinheitsgrad von Wasser und Luft möglich. Sensoren im thermischen IR- und Mikrowellenbereich gestatten mit unterschiedlichem Auflösungsvermögen und Genauigkeitsgrad auch Bestimmungen der Wassertemperatur und des Salzgehaltes im Bereich der unmittelbaren Wasseroberfläche. Beide Parameter sind zwar nur indirekte, doch sehr empfindliche Indikatoren für die Wasserqualität.

Um jedoch Oberflächengewässer differenziert beurteilen und auch quantitativ bewerten zu können (z. B. Bestimmung der Secchi-Tiefe, bathymetrische Sondierung im Flachwasserbereich, Schwebstoffkonzentration und Partikelgröße, Entrophierungsgrad, Planktongehalt, Art der Schweb- und Schadstoffe) sind neben der eingehenden Analyse digitaler, radio-metrisch sorgfältig geeichter multispektraler Daten unabhängige Direktmessungen der Wassersereigenschaften, der Tiefe und Reflexionsbedingungen am Boden von Flachwasserbereichen und zum Teil auch der atmosphärischen Bedingungen unerlässlich [13], [92], [113], [114] [115], [117]. Bedingt u. a. durch die noch immer sehr beschränkten Kenntnisse der spektralen Absorptions- und Reflexionscharakteristiken von Wasserverunreinigungen können aber die erforderlichen erdgebundenen Messungen so aufwendig sein, daß die Fernerkundung für

viele Probleme der Wassererkundung nur eine kostspieligere Alternative zu konventionellen Verfahren darstellt. Auch Untersuchungen der Zusammensetzung und Konzentration atmosphärischer Verunreinigungen mit Hilfe der Satellitenfernerkundung sind sehr aufwendig und noch immer im experimentellen Stadium [16]. Auf sie soll hier nicht näher eingegangen werden.

Die üblichsten Verfahren zur Bearbeitung und Darstellung von Fernerkundungsdaten für Wasseruntersuchungen sind Äquidensitendarstellungen des radiometrischen Niveaus in bestimmten Spektralkanälen (Abb. 41) [112], Quotientenbildung zwischen verschiedenen Kanälen oder deren Linearkombinationen (λ -Abhängigkeit der Eindringtiefe und Partikelstreuung), Spektralquotienten-"cluster" im mehrdimensionalen Raum und Hauptkomponentenanalyse [113]. Für die Interpretation werden Korrelationsbeziehungen dieser Fernerkundungsparameter mit den gesuchten, aus direkten Bodenmessungen ermittelten Größen benötigt. Der nach Labormessungen signifikante Einfluß von Wasserverunreinigungen auf die Polarisation des Lichtes [16] wird bisher noch nicht in operativen Fernerkundungsaktivitäten genutzt.

Bei der Identifizierung von Ölverschmutzungen im Meer haben sich vor allem die IR-Spektroskopie (λ zwischen 5 und 16 μm) und neuerdings auch die Laser-Fluoreszenzspektroskopie bewährt. Entsprechende IR- und Laser-UV-Sensoren werden heute bereits gemeinsam mit passiven und aktiven (SLAR)-Mikrowellensensoren sowie hochauflösenden Fotokameras in operativen komplexen Flugzeuglaboratorien eingesetzt, um Ölverschmutzungen im Küstenbereich und deren Verursacher festzustellen [128].

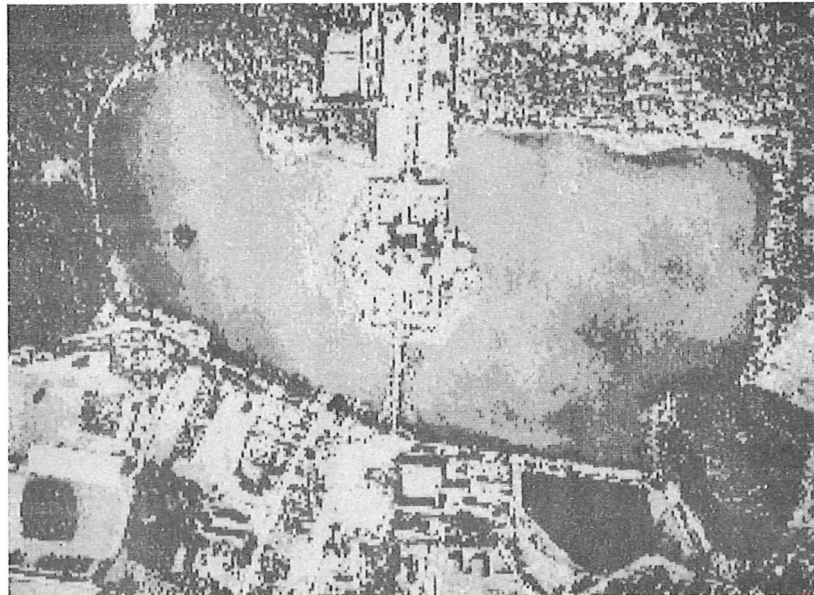


Abb. 41. Luftbildaufnahme vom Gebiet Moritzburg bei Dresden. Äquidensitendarstellung des Ergebnisses einer Grauwertspreizung im Bereich des Schloßteiches (LFB-Nr. 31/64)

4.4.8. Geologische Interpretation von Fernerkundungsdaten

Klassische Methoden der geologischen Erkundung sind in der Regel induktiv. Die ausgeprägte Synopsis von Aufnahmen der Satellitenfernerkundung gestattet in bisher ungewohntem Maße ein deduktives Herangehen an die geologische Struktur- und Ressourcenerkundung. Dabei erweisen sich neben Aufnahmen meteorologischer Satelliten mit großer Überdeckungsbreite auch Mosaiks aus Satellitenaufnahmen als besonders günstiges Ausgangsmaterial. Sie überdecken ganze Länder und Regionen und eignen sich vorzüglich zur Erkennung ringförmiger und linearer Großstrukturen regionalen und kontinentalen Ausmaßes.

Entsprechende Mosaiks existieren bereits für zahlreiche Länder, darunter Ägypten, Argentinien, Bolivien, China, Frankreich, Kanada, Mexiko, Pakistan, Philippinen, Spanien, Thailand, USA, Zaire u. a. Staaten. FISCHER [162] konnte zeigen, daß in dem entsprechenden Mosaik der USA Ringstrukturen riesigen Ausmaßes (Durchmesser ca. 1000 km) deutlich erkennbar sind. Sie waren ebenso wie viele lineare Strukturen mit konventionellen Erkundungsmethoden, darunter auch der Flugzeugfernerkundung, bisher nicht feststellbar. Dabei fällt auf, daß die reichsten Ölfelder und Kupfergruben der USA an der Peripherie dieser Ringstrukturen liegen. FISCHER schließt daraus, daß solche Strukturen um so wichtiger für die Rohstofferkundung seien, je größer und damit tieferreichender und älter sie sind.

Die Erkennung von Lineationen geologischen Ursprungs in Fernerkundungsaufnahmen kann z. T. erheblich erschwert werden durch antropogene Lineationen. Unter diesen lassen sich künstliche Verkehrswege relativ leicht erkennen und aussondern. Dagegen entsteht durch Wald-, Feld-, Bewässerungs- und Berieselungsgrenzen in Gebieten mit ausgedehnten landwirtschaftlichen Kulturen oft ein verwirrendes Muster anisotroper Grauton- bzw. Farbverteilungen. Sie können geomorphologisch-tektonische Lineationen bis zur Unkenntlichkeit maskieren. Durch geeignete digitale Datenverarbeitung lassen sich die störenden antropogenen Lineationen herausfiltern. Entsprechende Verfahren wurden am Zentralinstitut für Physik der Erde entwickelt und für die Analyse von Satellitenaufnahmen eingesetzt, die mit Hilfe der MKF-6 von Bord des sowjetischen Raumschiffes SOJUS-22 vom Norden der DDR gewonnen wurden. Die Anwendung dieser Verfahren ermöglichte sogar die Erkennung diffuser flächenhafter Lineationen und geomorphologischer Merkmale und die Analyse ihrer Internstruktur (z. B. KAUTZLEBEN u. BANKWITZ [117]). Abb. 43 und Abb. 44 zeigen Beispiele der gewonnenen Ergebnisse.

An der Herausbildung geomorphologisch-struktureller Merkmale, die als Fotolineationen in Erscheinung treten können, sind eine Vielzahl endogener (Hebungs-/Senkungs-) und exogener Prozesse (Verwitterung, Sedimentation) beteiligt. Die physikalischen Eigenschaften der Gesteine und klimatische Faktoren haben dabei einen entscheidenden modifizierenden Einfluß. Da die endogenen und exogenen Faktoren sich ebenso wie der Verfestigungsgrad der anstehenden Materialien im Verlaufe der geologischen Zeiten ändern, die heute beobachteten Merkmale aber sowohl durch rezente als auch Paläobedingungen und -prozesse geprägt sein können, ist die geologische Interpretation dieser Merkmale in Fernerkundungsaufnahmen sehr diffizil. Versuche zur Entwicklung von Interpretationsschlüsseln haben bisher keine befriedigenden Ergebnisse erbracht und sind für gezielte geologische Fragen ohne Wert geblieben (BANKWITZ [119]).

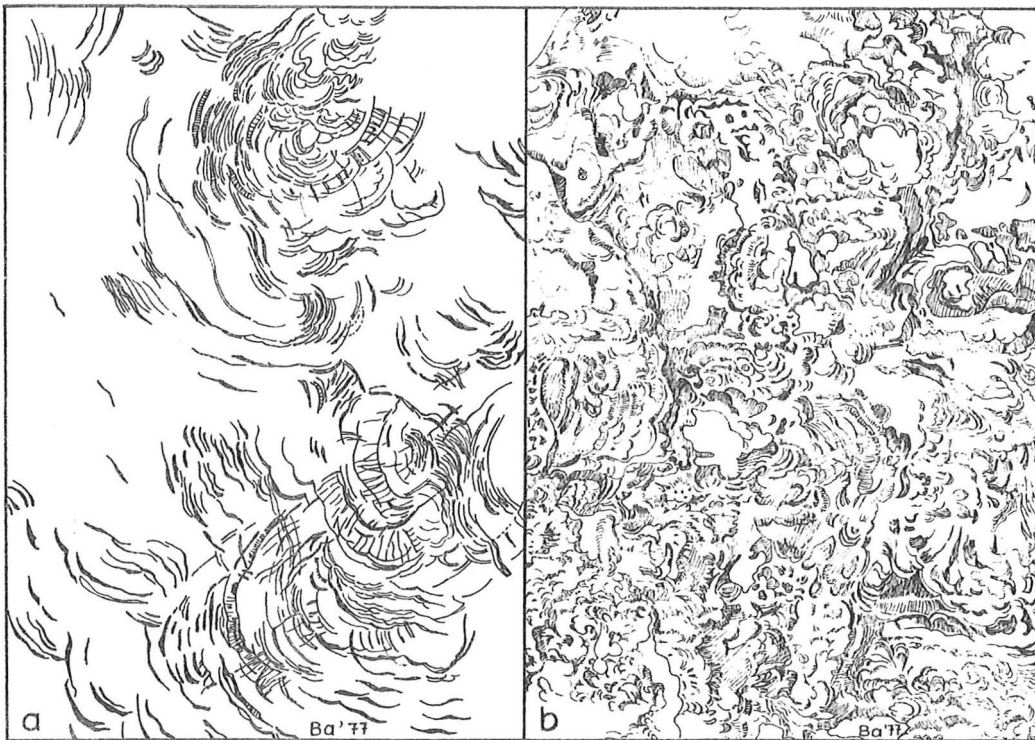


Abb. 42. Fotolineationen im Nordteil der DDR nach Auswertungen von MKF-6-Multispektralaufnahmen von Bord des Raumschiffes SOJUS-22 (a) bzw. eines Flugzeuges (b, entspricht einem Bildausschnitt von a)
 a - bogenförmige Sedimentstrukturen in Lockergesteinen
 b - Kryoturbationsgefüge, d. h. turbulente Bodenstruktur durch wiederholtes Aufschmelzen des Bodens im Vorfeld der pleistozänen Inlandeis-Vergletscherung (nach BANKWITZ aus [111])

Die wichtigste Methode zur Feststellung von Fotolineationen geologischen Ursprungs ist die visuelle Auswertung von (erforderlichenfalls geeignet vorverarbeiteten, s. o.) Fernerkundungsaufnahmen durch einen erfahrenen Geologen. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Feststellung solcher Merkmale wie Grautonwechsel, Änderung der Drainagemuster (Abb. 44), Versetzung von Flußläufen, Auftreten besonders geradliniger Talstücken in sonst sehr gekrümmten Wasserrinnen, linearen Begrenzungen bzw. linearem Auftreten von Vegetation an Wasserstauhorizonten bzw. Grenzen unterschiedlicher lithologischer Komplexe, lineare Anordnung von topografischen Merkmalen wie Geländestufen, Höhenrücken, Vulkankegeln, Depressionen, Tälern und Seen. Die Erkennbarkeit der Lineationen hängt außer von den technischen Aufnahmebedingungen (geometrisches Auflösungsvermögen, Aufnahmemastab, fotografische oder Scanner- bzw. TV-Aufnahme, Stereoüberlappung) auch stark von den natürlichen Bedingungen z. Z. der Aufnahme (Sonnenhöhe und -azimut, Vegetations- und/oder Schneebedeckung, Bodenfeuchtigkeit) und den individuellen Fähigkeiten des Auswerters ab. Allgemein wird die Erkennbarkeit von geomorphologischen Lineationen durch niedrigen Sonnenstand quer zur Streichrichtung (Schattenwurf) und durch die Auswertung multitemporaler Aufnahmen erleichtert. In Aufnahmen von Scanner- und TV-Systemen werden Lineationen parallel zu den Scanlinien unterdrückt.

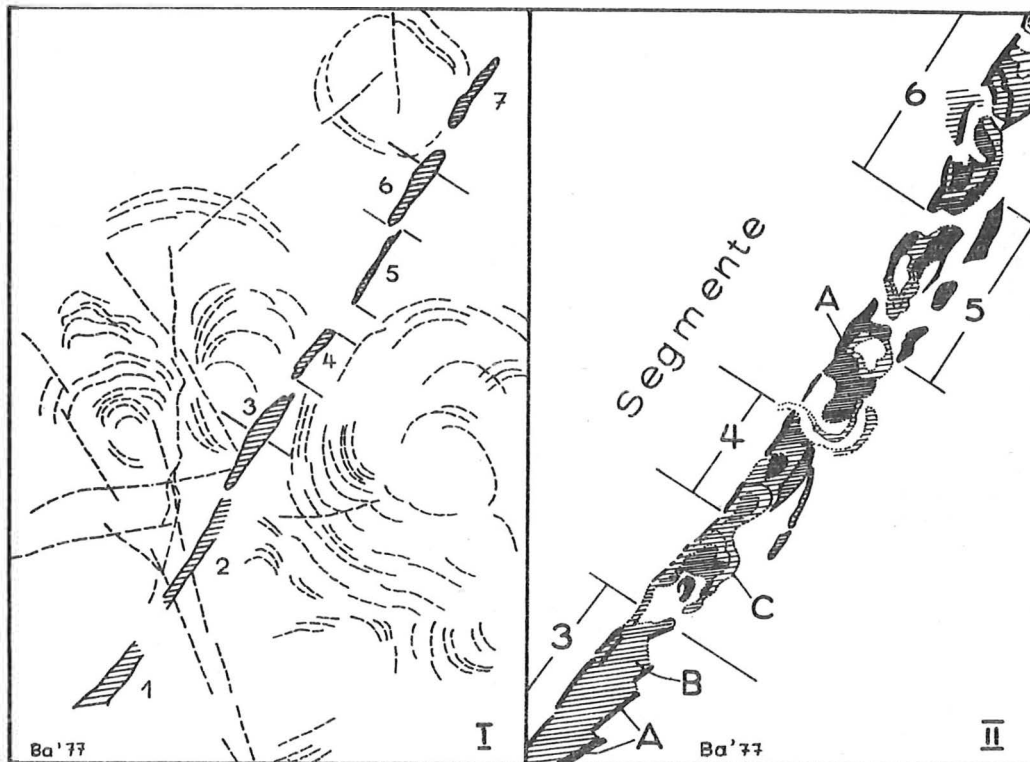


Abb. 43. Internstruktur störungsartiger Lineationen im Nordwestteil der DDR. Interpretation einer Multispektralaufnahme von SOJUS-22
 I - Visuelle Interpretation einer nichtbearbeiteten Multispektralaufnahme
 II - Interpretation nach der digitalen Bildbearbeitung des Zentralteils von I. Die Bearbeitung und densitometrische Auswertung macht die Feinstruktur der flächenhaften Lineationen deutlich (nach BANKWITZ)

Eine entscheidende Frage ist die nach der Natur der Fotolineationen. Sie lassen sich nur z. T. mit bereits bekannten Bruchstrukturen korrelieren. Andererseits sind nicht alle bekannten tektonischen Störungszonen in Fernerkundungsaufnahmen feststellbar. Das gilt insbesondere für Über- und Unterschiebungen (engl.: thrust faults). Die mit diesem auch seismotektonisch bedeutsamen Störungstyp verbundenen umfangreichen und vielfach irregulären Massenbewegungen im Bereich der Störungszone machen deren Oberflächenerscheinung undeutlich. Das führt dazu, daß tektonische Studien, die ausschließlich auf der Auswertung von Satellitenaufnahmen beruhen, zu einem fehlerhaften Bild der Strukturentwicklung der betreffenden Region und der sie verursachenden dynamischen Prozesse führen können [69]. Aber auch bei den nicht mit bereits bekannten Störungen korrelierbaren Fotolineationen in Fernerkundungsaufnahmen handelt es sich nur z. T. um bisher nicht festgestellte reale tektonische Störungen. Durch Erosionswirkungen von Wasser und Wind, Fazieswechsel in Sedimenten, Grenzen verschiedener Böden in flachen Gebieten sowie durch andere nichttektonische Veränderungen oberflächennaher Gesteine und Böden

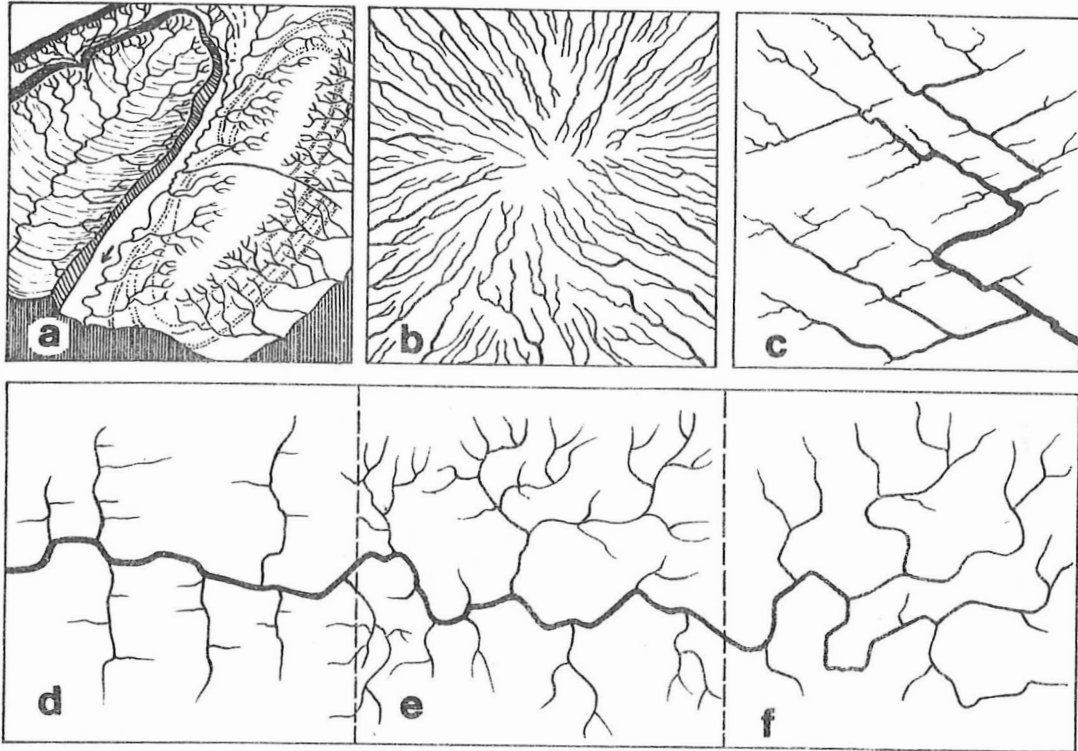


Abb. 44. Gewässernetze (Drainagemuster)
Identifizierung von Gesteins- und Strukturmerkmalen in aerokosmischen Aufnahmen nach der Ausbildung des Gewässernetzes (nach BANKWITZ)

- a - c: strukturkontrolliertes Gewässernetz
- d - f: gesteinskontrolliertes Gewässernetz in arider Zone
- a - unterschiedliche Entwässerungsformen an Antiklinalen und Synklinalen
- b - radiales Drainagenetz an Vulkankegel
- c - winklige Entwässerungsstruktur bei flacher Schichtlagerung; durch Störungen und Klüfte kontrolliert
- d - gitterförmige Anordnung der Flußläufe über Sandstein
- e - feindentritisches Drainagemuster in Tonschiefern
- f - winklig-dentritisches Drainagemuster über Kalkstein, z. T. bruchkontrolliert

(Hangrutschungen, Setzungen, Auswaschungen etc.) können Pseudolineationen in Fernerkundungsaufnahmen auftreten. Zur Aufklärung der Natur einzelner Fotolineationen sind deshalb unabhängige Bodeninformationen und ggf. detaillierte Felduntersuchungen erforderlich. Eine Schwierigkeit der Verifizierung der Fotolineationen durch Bodenbegehungen besteht oft darin, daß diese sehr breit (viele 100 m) und ausgedehnt sind. Die Geologie hat aber bisher nur Gesteinsversätze als geologische Störungen dokumentiert, während diffuse Zerrüttungszonen und Dislokationen ohne signifikanten Gesteinsversatz nicht kartiert wurden [119]. Ein besseres Verständnis der aus Fernerkundungsauswertungen ermittelten Fotolineationen erfordert somit auch eine teilweise Modifizierung traditioneller geologischer Geländearbeiten sowie der angewandten Schemata zur Klassifizierung und kartenmäßigen Darstellung beobachteter Phänomene.

Auf die Rolle des subjektiven Faktors, d. h. die Beobachtungsfähigkeiten und Erfahrungen des Interpretators bei der visuellen Auswertung von Fernerkundungsaufnahmen war bereits hingewiesen worden. PODWYSOCKI et al. [118] berichten, daß für ein allerdings recht schwieriges Testgebiet (schwaches Relief, dominierende antropogene Merkmale) die von vier unabhängigen Auswertern gefundenen Fotolineationen nur in 0,4 % der Fälle übereinstimmten. 4,8 % der Lineationen wurden nur von 3, 17,8 % nur von 2 und 77 % nur von einem (dem erfahrensten) Auswerter festgestellt. Sie schlußfolgern daraus die Notwendigkeit zur Objektivierung der Auswertung von Fotolineationen durch automatisierte analoge und digitale Bildauswertung (Kantenverstärkung, Fourieranalyse, Richtungsfilterung). Allerdings erfordern solche Prozeduren der Bildanalyse eine enge Wechselwirkung zwischen Mensch und Maschine, um antropogene und sonstige Lineationen nichtgeologischen Ursprungs weitestgehend auszuschließen, d. h. es ist eine aufgabenbezogene Homogenisierung der Ausgangsdaten für die Interpretation erforderlich.

Lineationen, die durch visuelle, automatisierte oder die Kombination verschiedener Auswertemethoden gewonnen wurden, können nach verschiedenen Gesichtspunkten statistisch aufbereitet werden. Üblich sind Richtungsrosen-Darstellungen der Häufigkeit bzw. der Länge (Dichte) von Lineationen pro Einheitsfläche. So gewonnene Häufigkeits- bzw. Dichte-Richtungsstatistiken von Fotolineationen gestatten Schlußfolgerungen auf die verursachenden regionalen Spannungsverhältnisse und ihre zeitlichen Veränderungen, die zugleich mobilisierender Faktor für Mineralakkumulationen entlang geologischer Störungszonen sind. Dazu muß die generalisierende und homogenisierende statistische Analyse der Fotolineationen durch eine geologische Klassifikation und fortschreitende geologische Prozeßanalyse ergänzt werden. Das erfordert neben umfassenden Kenntnissen lokaler und regionaler geologischer Prozeßabläufe die Zuhilfenahme unabhängiger Informationen aus geologischen Karten, geomorphologischen und tektonischen Geländeuntersuchungen sowie den Ergebnissen von Gefüge- und mikrotektonischen Strukturanalysen an repräsentativen Handstücken aus dem Untersuchungsgebiet. Wenn möglich, sollten auch die Resultate rezenter In-situ-Spannungsmessungen bzw. seismischer Herdflächen- und Verschiebungsvektoranalysen für die Interpretation herangezogen werden.

Nur wenn Fotolineationen in Satellitenaufnahmen in dieser komplexen Weise analysiert und von erfahrenen Spezialisten mit soliden Grundlagen- wie auch Detailkenntnissen über das Untersuchungsgebiet unter Zuhilfenahme umfassender unabhängiger Bodeninformationen interpretiert werden, können sie einen entscheidenden Beitrag zur Entwirrung der Spannungs- und damit tektonischen Entwicklungsgeschichte des Untersuchungsgebietes, der

Einschätzung seiner Gefährdung durch seismische oder aseismische Bewegungsvorgänge (Kriechen, Rutschungen, Absenkungen) sowie zur Ausarbeitung einer begründeten und rationalen Erkundungsstrategie für mineralische Rohstoffe, Kohlenwasserstoffe und Wasserakkumulationen liefern. Beispiele dafür wurden wiederholt von PRESS [120], [121], [122] auf UNO-Seminaren zur Fernerkundung vorgetragen.

Für die Erkennung und Identifizierung flächenhafter geologisch-pedologischer Objekte eignet sich vor allem die spektrale Klassifizierung. Da sich petrographisch-mineralogisch relevante Merkmalsänderungen radiometrisch oft nur schwach andeuten, wird zur Verstärkung der Merkmalskontraste zweckmäßigerweise das Spektralverhältnis verschiedener Kanäle gebildet. Sensoren im sichtbaren und nahen IR sprechen dabei vor allem auf die breiten Fe-Absorptionsbanden und damit auf oberflächennahe Variationen im Eisen-gehalt der Gesteine an. Sie sind damit geeignet für den Nachweis von Limonitzonen. Diese sind in ariden und semiariden Gebieten oft an hydrothermal überprägte und limonitisch verwitterte pyritführende Gesteinskomplexe gebunden [106], [107]. Eine zuverlässige direkte Identifizierung ist aber ohne umfassende Bodenkontrollerkundungen nicht möglich. Beispielsweise wurde in Pakistan eine umfassende rechnergestützte Klassifizierung von LANDSAT-Daten für den Nachweis von Kupferkieslagerstätten durchgeführt [109]. Die Klassifizierung erfolgte überwacht, d. h. nach Eichung der Satellitendaten mit Hilfe einer ausgedehnten und typisch entwickelten Testlagerstätte in Pakistan. Es wurden 50 Gebiete als Konzentrationen mineralisierter Quarzdiorite und pyritischer Gesteine klassifiziert. Davon ließen sich nach gründlicher Überprüfung der Wahrscheinlichkeit korrekter Klassifizierung, der Beziehungen zu Konzentrationen anderer Klassen und durch Vergleich mit bereits bekannten Gesteinstypen und hydrothermalen Mineralisationen 20 Gebiete als nicht wahrscheinlich aussondern. Schließlich blieben nach Stereoauswertung von Luftbildaufnahmen (Maßstab 1 : 40 000) nur noch 19 potentielle Gebiete für Geländeuntersuchungen übrig. Von diesen erwiesen sich fünf als ausgedehnte Ausbisse hydrothermal veränderter sulfidreicher Gesteine. Zwei Gebiete zeigten geringe Sulfidkonzentrationen.

Allerdings können nach [133] durch Quotientenbildung von Kanälen im sichtbaren und nahen IR-Bereich limonitisch verwitterte Gesteine nicht von unveränderten limonitischen Gesteinen unterschieden werden. Auch gebleichte nicht-limonitische Gesteine sind nicht unterscheidbar von anderen hellen Gesteinstypen. Dafür wären Sensoren im mittleren IR ($\lambda \approx 2,2 \mu\text{m}$) erforderlich, da veränderte Gesteine im Gegensatz zu unveränderten in diesem Band markante Absorption zeigen (Ton-Absorptionslinie). Weder fotografische noch die bisherigen Satelliten-Scannersysteme verfügen über Sensoren in diesem Band. Das erklärt z. T. auch, weshalb die Satellitenfernerkundung bisher im Direktnachweis mineralisierter Zonen nicht sehr erfolgreich war. Für den TM in LANDSAT-D ist dieses Spektralband vorgesehen.

Bezüglich der Klassifizierung von Gesteinskomplexen und Bodentypen erhofft man sich übrigens eine entscheidende Effektivitätssteigerung durch die Einbeziehung der hochauflösenden thermischen IR-Daten der NASA-"Heat Capacity Mapping Mission" (HCMM) in Verbindung mit LANDSAT-Daten. Allerdings ist es schwierig, eine Kartenbasis für diese Daten zu definieren, da der Aufheizungseffekt der Sonnenstrahlung u. a. stark von der Topographie abhängt. Die Eliminierung dieses Effektes erfordert ausreichend genaue digitale Terrainmodelle zur Berechnung topographischer Korrekturen für die thermischen Trägheitswerte. Auch die Vegetationsbedeckung, Bodenfeuchtigkeit und Oberflächenrauigkeit haben

entscheidenden Einfluß auf diese Größen, deren korrekte Berücksichtigung erneut unabhängige Bodenkontrollinformationen voraussetzt. Deshalb wird heute der HCMM für nicht-geologische Anwendungen wie der Ermittlung von Boden- und Pflanzentemperaturen ("Pflanzenfieber") zwecks Einschätzung des Gesundheitszustandes der Pflanzen, zur Verbesserung von Eis-, Schnee- und Umgebungstemperaturmessungen für zuverlässigere Berechnungen von Abschmelzraten sowie für die Überwachung thermischer Verunreinigungen in Küstenzonen und Binnengewässern vergleichbare oder noch größere Bedeutung beigemessen. Die Untersuchungsergebnisse der nächsten Jahre werden genauere Aussagen zur Eignung hochauflösender thermischer IR-Daten für die geologische Erkundung, darunter auch den Nachweis möglicher thermischer Anomalien in Verbindung mit aktiven Störungszonen erbringen. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, daß im Rahmen des Internationalen Geologischen Korrelations-Programms (IGCP) von UNESCO und IUGS seit 1976 ein Projekt zur "Fernbeobachtung und Mineralerkundung" läuft. An ihm beteiligen sich ca. 40 Staaten. Forschungsarbeiten konzentrieren sich nach [133] auf:

- Lineamentanalysen und ihre Beziehungen zur Verteilung mineralischer und energetischer Ressourcen;
- Messungen des spektralen Reflexionsverhaltens mittels digitaler Satellitendaten und Feldmessungen zur Unterscheidung von Gesteinstypen und erzhöflichen Überprägungszonen;
- Untersuchung der Beziehungen zwischen Vegetationsstress und mineralisierten Zonen, um letztere auch in bewaldeten Regionen der Erde nachweisen zu können.

Mit diesen Ausführungen zu methodischen Problemen der Gewinnung und Auswertung von Fernerkundungsdaten sollten schwerpunktmäßig spezifische Besonderheiten gegenüber anderen Erkundungsmethoden herausgearbeitet werden. Dabei wurde die Notwendigkeit komplexer Untersuchungen mit gezielter Einbeziehung von Lufterkundungen und erdgebundenen Beobachtungen für die Gewinnung hochwertiger, praktisch nutzbarer Ergebnisse der Satellitenfernerkundung begründet und durch Beispiele belegt. Letztere beziehen sich zwar auf typische, für die praktischen Belange besonders relevante Anwendungen, vermitteln aber nur einen kleinen Ausschnitt des breiten Spektrums aktueller und potentieller Einsatzmöglichkeiten der Fernerkundung. Selbst so wichtige Nutzungsgebiete wie die Kartographie und die Aktualisierung topographischer und thematischer Karten blieben unberücksichtigt (s. [90], [116], [132], [134], [145]). Dabei sind es gerade diese Anwendungen, die in der Anfangsphase der Nutzung der Fernerkundung bevorzugt werden, da sie bereits mit relativ bescheidenen materiell-technischen Mitteln von Kadern mittlerer Qualifizierung nach kurzer Anlernphase ausgeführt werden können. Sie beschränken sich meist auf visuelle Auswertungen nach geometrisch-strukturellen Kriterien unter qualitativer Berücksichtigung radiometrisch-spektraler Merkmalsunterschiede und erfordern einen vergleichsweise geringen Forschungs- und Entwicklungsvorlauf. Ihre Ergebnisse sind unmittelbar plausibel und lassen sich leicht in bestehende Konzeptionen und Informationssysteme integrieren.

Beispiele dafür sind die Kartierung von Gewässersystemen und Überflutungsgebieten, z.B. [69], [108], [144], [146], [147], [148], von An- und Ablandungen in Delta- und Küstengebieten [149], von Waldabholzungen [142], [150], von Landnutzungsveränderungen und von zeitlichen Veränderungen der Schnee- und Eisbedeckung [151], [152], [153]. Topografische und thematische Kartierungsanwendungen der Fernerkundung sind vor allem für noch schlecht erschlossene Entwicklungsländer von erheblichem Nutzen. Es ist offensichtlich, daß dabei multispektralen Aufnahmen fotografischer Satelliten mit hoher geometrischer Auflösung und Abbildungstreue für die aufklärende Erkundung und kartenmäßige Erfassung ausgedehnter Territorien besondere Bedeutung zukommt.

5. Voraussetzungen, Bedürfnisse, Nutzen und Organisation der Fernerkundung

5.1. Generelle Voraussetzungen und Bedürfnisse

Vier Grundkonzeptionen von Fernerkundungssystemen sind denkbar:

- a) Flugzeugsystem ergänzt durch ein Untersystem zur Sammlung von Bodeninformationen;
- b) bemanntes Satellitensystem;
- c) automatisches Satellitensystem mit Datenfernübertragung zur Erde;
- d) Kombinationen von a) bis c) (vgl. Abb. 40)

Nach 4.4.2. ist die Datensammlung in verschiedenen Niveaus und zu verschiedenen Zeitpunkten sowie die komplexe Auswertung der Fernerkundungsdaten gemeinsam mit anderen Daten und unabhängigen Bodeninformationen entscheidend für den Erfolg und die Kosteneffektivität eines Fernerkundungssystems. Variante d) wäre somit prinzipiell die günstigste, insbesondere für die Fernerkundung großer Territorien. Variante a) ist die Mindestvariante für ein nationales Fernerkundungssystem, b) eignet sich gut für die planmäßige Fernbeobachtung größerer Regionen mit hoher Auflösung und c) ist optimal für die regelmäßige, langfristige Fernbeobachtung der Erde im planetaren Maßstab insbesondere auch unter dem Aspekt der globalen Überwachung veränderlicher Phänomene. Sie ermöglicht hohe zeitliche Auflösung und schnellstmögliche Datenbereitstellung.

In vielen Staaten existieren heute bereits private oder staatliche Unternehmen für Flugzeugerkundung. Andere Staaten mieten sich die Dienste von Lufterkundungsfirmen auf kommerzieller Basis. Vorteilhaft ist dabei die Möglichkeit zur geeigneten Wahl der Sensorparameter und des Zeitpunktes der Befliegungen entsprechend den konkreten Bedingungen und Erfordernissen des Landes. Beispielsweise war es innerhalb einer kurzen wolkenfreien Periode möglich, das gesamte Territorium von Sierra Leone im Rahmen eines FAO-Landnutzungsprojekts durch Einsatz hochfliegender Erkundungsflugzeuge mit hochauflösenden IR-Falschfarbenaufnahmen (1 : 73 000) und panchromatischen Schwarz-Weiß-Aufnahmen (1 : 126 000) zu überdecken [127].

Im Vergleich zur Satellitenfernerkundung sind die Kosten von Flugzeugerkundungen, insbesondere, wenn wiederholte Überfliegungen großer Gebiete erforderlich sind, sehr hoch. Beispielsweise betragen die Kosten je brauchbarer LANDSAT-Szene von ca. 33 000 km² nur etwa 600 - 800 US\$, falls man die Amortisation aller Kosten des Systems in Rechnung stellt [55]. Dem stehen nach [54] Kosten von ca. 100 000 bis 150 000 US\$ für die fotografische bzw. Radar-Lufterkundung eines gleichgroßen Gebietes gegenüber. Natürlich sind die verschiedenen Datenprodukte auf Grund der unterschiedlichen Auflösung der Primärdaten in ihrem Informationsgehalt nicht gleichwertig. Dennoch wird aus der Gegenüberstellung die große Bedeutung der Satellitenfernerkundung für die schnelle und kostensparende Übertragung der Ergebnisse detaillierter Boden- und Flugzeugbeobachtungen in ausgewählten Gebieten auf größere nationale Territorien bzw. ganze Regionen und Kontinente offensichtlich. Das Problem besteht darin, daß die niedrigen Kosten pro Flächeneinheit für Satellitenaufnahmen nur bei kontinuierlicher globaler Datengewinnung realisiert werden können. Die Kosten für das Weltraumsegment sind sehr hoch. Sie betragen ca. 20 bis 100 Millionen US\$/a für ein automatisches Satellitensystem je nach Konfiguration, Betriebsdauer etc. [78]. Sie sind sicherlich ungleich höher für ein bemanntes System.

Es ist folglich ein sehr kostspieliges Unternehmen, ein ziviles Satellitenfernerkundungssegment ausschließlich im Rahmen eines nationalen Fernerkundungssystems zu betreiben. Staaten, die allein oder kooperativ Weltraumsegmente zur Satellitenfernerkundung betreiben oder planen, werden deshalb in der Regel daran interessiert sein, deren globale Potenzen weitestgehend auszuschöpfen und durch die umfassende Nutzung und den Vertrieb der Daten ein hohes Nutzen-Kosten-Verhältnis zu erzielen (s. 5.2.). Andere Staaten sind darauf angewiesen, sich langfristig einen kontinuierlichen (möglichst direkten oder Prioritäts-) Zugang zu Satellitenfernerkundungsdaten ihrer eigenen Territorien zu sichern. Nur so können sie deren Potenzen für die Schaffung eines effektiven nationalen Fernerkundungssystems, ggf. auch ohne kostspielige Lufteerkundungskomponente, nutzen.

Stehen die topografische und Landpotential- bzw. Landnutzungskartierung im Vordergrund, d. h. die Feststellung und Kartierung langsam veränderlicher Phänomene, dann ist der gelegentliche Zugang zu möglichst hochauflösenden (z. B. fotografischen) Satellitendaten ausreichend. Dient dagegen das Fernerkundungssystem vor allem Fragen der Überwachung und Prognose landwirtschaftlicher Ressourcen und schnell veränderlicher Umweltphänomene, dann ist im Falle großer Territorien der Direktzugang in Realzeit zu Daten automatischer Satelliten erstrebenswert, auch wenn die Schaffung des entsprechenden Bodensegments erhebliche Investitionen erfordert (s. 3.2.).

1978 organisierte das Internationale Institut für Lufteerkundung und Geowissenschaften (ITC) in Enschede, Holland, das erste in einer Reihe von Seminaren zum Thema "Fernerkundung-Entscheidungsfindung". Im Rahmen dieser Veranstaltung fand unter Leitung des Autors eine Problemdiskussion statt. Sie diente der Identifizierung von Voraussetzungen und Kriterien für die Auswahl von Fernerkundungssystemen zur Lösung von Erkundungs- und Überwachungsaufgaben sowie für deren Integration in den Prozeß der Planung und Entscheidungsfindung. Dabei wurde von den führenden Vertretern nationaler Ressourcenerkundungseinrichtungen aus 10 Entwicklungsländern übereinstimmend herausgearbeitet, daß die **V e r f ü g b a r k e i t** von Daten die entscheidende Voraussetzung für die Auswahl und Nutzung eines Fernerkundungssystems sei. Als Kriterien der Verfügbarkeit wurden das Recht eines Staates auf **Z u g a n g** zu den Daten des Systems (zumindest soweit sie sein eigenes Territorium betreffen), die **K o n t i - n u i t ä t** und **R e c h t z e i t i g k e i t** der Datenbereitstellung sowie die ausreichend häufige **W i e d e r h o l u n g s ü b e r d e c k u n g** gleicher Gebiete identifiziert. Sind diese Grundvoraussetzungen für eine kontinuierliche und effektive Nutzung eines Fernerkundungssystems erfüllt, dann muß geprüft werden, ob das System auch im politischen und (völker-) rechtlichen sowie im technischen Sinne **a k z e p - t a b e l** ist. Zum letztgenannten Aspekt ist z. B. zu untersuchen, ob die Daten zuverlässig sind und kompatibel mit bzw. komplementär zu anderen verfügbaren Daten bzw. verfügbaren Datenempfangs- und -bearbeitungseinrichtungen. Schließlich muß geprüft werden, ob ein solches System von den wissenschaftlich-technischen, ökonomischen und infra-strukturellen Bedingungen des Landes her überhaupt **n u t z b a r** bzw. **r e a - l i s i e r b a r** ist. Diese Kriterien wurden 1979 auf einem regionalen Nachfolgeseminar in Bogotá, Kolumbien, erhärtet.

Bezüglich des letztgenannten Kriteriums der infrastrukturellen Voraussetzungen für die Effektivität eines Fernerkundungssystems muß vor allem auf die Notwendigkeit der Schaffung geeigneter operativer Organisationsstrukturen für die schnellstmögliche Sammlung, Bearbeitung, Auswertung, Verteilung und Nutzung der gewonnenen Massendaten und Informationen hingewiesen werden. Hochentwickelte Industriestaaten verfügen bereits über moderne Informationssysteme und Erfahrungen in ihrer Nutzung. Notwendig wäre oft nur deren geeignete Ergänzung bzw. Anpassung an die speziellen Bedürfnisse der Fernerkundung. Wesentlich komplizierter ist die Situation in den meisten Entwicklungsländern. Zwar ist für sie der potentielle Nutzen aus der Fernerkundung ihrer Territorien oft wesentlich größer als für entwickelte Länder, doch würde die volle Realisierung dieser Potenzen z. T. drastische Veränderungen in der traditionellen ökonomisch-gesellschaftlichen Praxis, der Arbeitsweise der Institutionen wie der individuellen Verhaltensweisen erfordern. Die Herbeiführung solcher Veränderungen kann viele Jahre in Anspruch nehmen und Investitionen notwendig machen, die weit über die Kosten für die Schaffung und den Betrieb eines nationalen Fernerkundungssystems hinausgehen. Allerdings hätten solche Veränderungen multivalenten Nutzen.

Generell kann eingeschätzt werden, daß in den meisten Entwicklungsländern ein großer Mangel an wesentlichen Informationen besteht, die für eine planmäßige ökonomische und infrastrukturelle Entwicklung erforderlich sind. Die Gewinnung dieser Informationen ist bei ausschließlicher Verwendung konventioneller Methoden sehr zeitaufwendig und für viele Länder unerschwinglich. Daten der Satellitenfernerkundung bieten eine gute Möglichkeit, um schnell ökonomisch und planerisch wertvolle synoptische Informationen zur Ergänzung und Erweiterung der mit konventionellen Methoden ermittelten Informationen zu gewinnen. Das gilt sowohl in der Phase der Aufklärungserkundung als auch für die spätere Phase der Detailerkundung und Überwachung. Im ersten Falle überwiegt die visuelle Datenauswertung mit relativ einfachen Mitteln, während im letzteren Fall die Betonung auf der Nutzung hochauflösender digitaler Fernerkundungsdaten liegt. Für die meisten Entwicklungsländer ist der potentielle Nutzen aus Anwendungen der Satellitenfernerkundung bereits in der Phase der Aufklärungserkundung sehr hoch.

Entscheidende Voraussetzungen für die effektive Nutzung der Potenzen der Fernerkundung durch die Entwicklungsländer sind die gesicherte kontinuierliche Datenbereitstellung zu erschwinglichen Preisen, die Qualifizierung nationaler Kader in der Auswertung der Daten und effektiven Nutzung der gewonnenen Informationen, ein entwickeltes Verständnis auf der Arbeits- wie der politischen Entscheidungsebene für die Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundung nebst umfassenden zuverlässigen Informationen über vorhandene Ausrüstungen und technisch-organisatorische Systemvarianten. Diese Kenntnisse sind Voraussetzung für die Steuerung eines angemessenen Technologietransfers bei maximaler Nutzung und Entwicklung örtlicher Potenzen. Große Bedeutung besitzt die schöpferische Fähigkeit der nationalen Kader zur Adaption international verfügbarer bzw. zur Entwicklung neuer Methoden, Technologien und Organisationsformen, die den lokalen Verhältnissen und Möglichkeiten optimal angepaßt sind. Detailliertere Angaben zu den Bedürfnissen von Entwicklungsländern bezüglich Unterstützung in der praktischen Anwendung der Weltraumtechnik, darunter auch der Satellitenfernerkundung, sind einigen UNO-Dokumenten zu entnehmen [84].

Geometrisches, radiometrisches, spektrales und zeitliches Auflösungsvermögen eines Fernerkundungsaufnahmesystems sind in komplexer Weise miteinander verknüpft. Sie bedingen sich z. T. gegenseitig und müssen in Verbindung mit dem angestrebten Aufnahmemaßstab aufgabenbezogen optimiert werden. Welcher Auflösungsparameter entscheidend bzw. welche Kombination am geeignetsten ist, hängt von der Aufgabenstellung und den Umweltbedingungen ab. Das effektive geometrische Auflösungsvermögen ist für einen gegebenen Sensor keine feststehende Größe. Es wird außer von sensorinhärenten Faktoren (Abbildungseigenschaften, spektrales und radiometrisches Auflösungsvermögen auch von äußeren Bedingungen beeinflusst (Form und Anordnung der Objekte, spektraler Objektkontrast, allgemeine Helligkeit der Szene. Zustand der Atmosphäre, Art der Datenvorverarbeitung).

Die Ausrüstung von Datenauswertezentren hängt von den zu lösenden Aufgaben und Randbedingungen (z. B. Umfang und Art des anfallenden Datenmaterials, verfügbare Kader, finanzielle Ressourcen) ab. Die Anschaffung kostspieliger Geräte oder die Nutzung teurer digitaler Methoden ist nur gerechtfertigt, wenn die entsprechende Arbeit in der erforderlichen Menge und Qualität anders nicht bzw. mit deren Hilfe letztendlich billiger getan werden kann. Ausrüstung und personeller Aufwand für ein methodisch-diagnostisches Zentrum werden vor allem bestimmt durch die erforderliche Präzision und Komplexität, mit der Bildbearbeitungs- und Auswerteverfahren auf ihre Eignung für den Nutzer getestet und die der Auswertung zugrundeliegenden naturgesetzlichen Zusammenhänge untersucht werden müssen. Der Beitrag der erbrachten Ergebnisse für die Beschleunigung, Kostensenkung und Erhöhung der Aussagekraft operativer Routineauswertungen sowie der Umfang, in dem diese Verfahren schließlich in der Praxis genutzt werden, entscheiden nachträglich über die Effektivität entsprechender Aufwendungen.

Bei der Entscheidung für bzw. der Auswahl von geeigneten Fernerkundungssystemen zur Lösung von Erkundungs- und/oder Überwachungsaufgaben sowie bei Überlegungen zur wirksamen Integration dieser Systeme in den nationalen Planungs- und Leitungsprozeß muß die Erfüllung einer Reihe von Voraussetzungen geprüft werden. Dazu gehören:

- a) Verfügbarkeit von Daten (d. h. gesicherter Zugang zu den Daten, Kontinuität und Rechtzeitigkeit der Datenbereitstellung, ausreichend häufige Wiederholungsüberdeckung);
- b) Akzeptierbarkeit des Fernerkundungssystems vom politischen, (völker-) rechtlichen und technischen Standpunkt. Zum letztgenannten Aspekt gehören die Kompatibilität, Komplementarität und Zuverlässigkeit der Daten;
- c) Nutzbarkeit bzw. Realisierbarkeit des Systems unter Beachtung der ökonomischen, wissenschaftlich-technischen und infrastrukturellen Bedingungen des jeweiligen Landes.

Ein totales Fernerkundungssystem umfaßt neben den wissenschaftlich-technischen und methodisch-analytischen Teilsystemen das Teilsystem der Informationsnutzung. Die Effektivität des Gesamtsystems wird entscheidend von der seines schwächsten Gliedes bestimmt. Auch ein vom wissenschaftlich-technischen und methodischen Standpunkt aus optimiertes Fernerkundungssystem kann nur in dem Maße ökonomisch-gesellschaftlich wirksam werden, wie die bestehenden Planungs- und Leitungsstrukturen in der Lage sind, die gewonnenen Informationen schnell und sachkundig zu integrieren und in nützliche Aktivitäten umzusetzen. Erfahrungsgemäß ist nicht die Gewinnung der Daten und der daraus abgeleiteten Informationen, sondern die Schaffung geeigneter Bindeglieder zwischen Information und Aktion das entscheidende Problem.

Die Größe der Länder, ihr Entwicklungsstand und Erschließungsgrad sowie die natürlichen und gesellschaftlichen Bedingungen variieren erheblich. Dementsprechend sind auch die geeignetsten Formen zur Organisation nationaler und regionaler Fernerkundungsaktivitäten verschieden. Generell erweisen sich Organisationsformen am effektivsten, die eine dem interdisziplinären Charakter der Fernerkundung angemessene wirksame inter-institutionelle Kooperation und Koordinierung der verschiedenen Nutzerbereiche herbeiführen. Deshalb ist - insbesondere für Länder, die sich eine Duplizierung von Anstrengungen und Ressourcen nicht leisten können - neben einer horizontalen Koordinierung auch eine übergeordnete, fachlich kompetente entscheidungsbefugte Leitung zweckmäßig. Gesamtgesellschaftliche Interessen können so am besten berücksichtigt und materielle und personelle Ressourcen für eine ausgewogene Entwicklung der Teilsysteme optimal eingesetzt werden.

Kosten-Nutzen-Aussagen zur Fernerkundung sind nur sinnvoll im Hinblick auf spezifische zu lösende Probleme unter Beachtung lokaler Bedingungen und Erfordernisse und zur Verfügung stehender Alternativmethoden. Sie müssen deshalb für jedes Land neu erarbeitet werden. Dabei muß zwischen quantifizierbarem, klar faßbarem aber nicht quantifizierbarem und weder klar faßbarem noch quantifizierbarem Nutzen unterschieden werden. Welcher Wert letzterem beigemessen wird, hängt wesentlich von den politischen Zielstellungen und sozial-ökonomischen Bedingungen des jeweiligen Landes ab.

Der tatsächlich realisierbare Nutzen hängt außer von wissenschaftlich-technischen und organisatorischen Faktoren auch vom Anwendungsgebiet ab. Von Anwendungen der Satellitenfernerkundung für landwirtschaftliche Fragestellungen wird der größte Nutzen erwartet, gefolgt von Fragen der Landnutzungsplanung und Wasserressourcenbewirtschaftung. Der Nutzen für die Erkundung geologisch-mineralischer Ressourcen wird langfristig gesehen relativ gering eingestuft (<10 % des Gesamtnutzens). Die Nutzungsverhältnisse für verschiedene Anwendungen werden allerdings beeinflusst sowohl von den technischen Parametern der zur Verfügung stehenden Fernerkundungssysteme als auch vom momentanen Erkundungsstand und der relativen Häufigkeit bzw. ökonomischen Bedeutung der verschiedenen Ressourcenarten für ein gegebenes Land.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit baut einerseits auf Erfahrungen auf, die der Autor während seiner fast dreijährigen Tätigkeit in der Weltraumabteilung der UNO in New York sammeln konnte und berücksichtigt andererseits Ergebnisse und Wertungen, wie sie im Zentralinstitut für Physik der Erde der Akademie der Wissenschaften der DDR beim Aufbau eines eigenen methodisch-diagnostischen Zentrums für Fernerkundung und der Koordinierung nationaler Fernerkundungsaktivitäten gewonnen wurden.

Es ist dem Autor ein Bedürfnis, all denen zu danken, die durch Forderungen, Fragen, förderliche Diskussionen und aufmunternde Unterstützung meine Beschäftigung mit dem Thema stimuliert und mir Mut gemacht haben, es in dieser geschlossenen Form abzuhandeln. Ein besonderer Dank gilt dabei dem Direktor des Zentralinstituts für Physik der Erde, Prof. Dr. H. KAUTZLEBEN. Zu großem Dank bin ich auch Prof. L. PEREK, seinerzeit Leiter der UNO-Weltraumabteilung sowie dem langjährigen UNO-Experten für Anwendungen der Weltraumtechnik, Prof. H.G.S. MURTHY, verpflichtet. Den an der technischen Fertigstellung der Veröffentlichung beteiligten Mitarbeitern des ZIPE und des VEB Kartographischer Dienst Potsdam sei an dieser Stelle ebenfalls herzlich gedankt.

Erläuterung von Abkürzungen

APT	- Automatic Picture Transmission
ARSC	- African Remote Sensing Council
AVHRR	- Advanced Very High Resolution Radiometer
CCD	- Charge-Coupled Device
CCIR	- International Radio Consultative Committee
CCRS	- Canada Center for Remote Sensing
CCT	- Computer Compatible Tape
CNES	- Centre National d'Etudes Spatiales (Frankreich)
COMSAT	- Communications Satellite Corporation (Washington, D.C., U.S.A.)
COPUOS	- Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (UNO)
COSPAR	- Committee on Space Research (ICSU, s.u.)
CTS	- Communications Technology Satellite (Kanada)
CZCS	- Coastal Zone Color Scanner
DCP	- Data Collection Platform
DCS	- Data Collection System
EARTHSAT	- Earth Satellite Corporation (Washington, D.C.)
EDC	- EROS Data Center (s. EROS)
EIFOV	- Effective Instantaneous Field of View
EOS	- Earth Observation Satellite
ERB	- Earth Radiation Budget Mission (NIMBUS-7)
ERRE	- Effective Radiometric Resolution Element
ERE	- Effective Resolution Element
EREP	- Earth Resources Experiment Package (Skylab-Experiment)
ERIM	- Environmental Research Institute of Michigan (Ann Arbor, U.S.A.)
EROS	- Earth Resources Observation Systems (Datenzentrum des U.S. Geological Survey, U.S. Department of Interior)
ERTS	- Earth Resources Technology Satellite (später in LANDSAT umbenannt)
ESA	- European Space Agency
ESTEC	- European Space Research and Technology Centre (Noordwijk, Niederlande)
FAO	- United Nations Food and Agriculture Organization
GARP	- Global Atmospheric Research Programme (WMO/ICSU)
GEMS	- Global Environmental Monitoring System
GEOS	- Geodynamic Experimental Ocean Satellite
GIPME	- Global Investigation of Pollution in the Marine Environment (WMO/ICSU)
GOES	- Geostationary Operating Environmental Satellite
GSFC	- Goddard Space Flight Center (NASA, Greenbelt, Md., U.S.A.)
HCMM	- Heat Capacity Mapping Mission Satellite
HDDT	- High Density Digital Tape
HIR	- Horizontal Infrad-Red Radiometer
HIRS	- High Resolution IR-Radiometric Sounder
HRPT	- High Resolution Picture Transmission

- ICSI - International Commission on Snow and Ice
 ICSU - International Council of Scientific Unions
 IDOE - International Decade of Ocean Exploration
 IFOV - Instantaneous Field of View
 IFRB - International Frequency Registration Board (ITU)
 IGCP - International Geological Correlation Programme
 IGOS - Integrated Global Ocean Stations System
 IHP - International Hydrological Programme
 INTELSAT - International Telecommunications Satellite Organization
 INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais (Brasilien)
 IOC - Intergovernmental Oceanographic Commission
 ISRO - Indian Space Research Organization
 ITC - International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences
 (Enschede, Niederlande)
 ITU - International Telecommunication Union
 IUGG - International Union of Geodesy and Geophysics
 IUGS - International Union of Geological Sciences
- JEOS - Japanese Earth Observation Satellite
- LACATE - Lower Atmosphere Composition and Temperature Experiment
 LACIE - Large Area Crop Inventory Experiment
 LAPAN - Indonesische Agentur für Aeronautik und Weltraumangelegenheiten
 LARS - Laboratory for Applications of Remote Sensing (Purdue Univ., Indiana, U.S.A.)
 LFC - Large Format Camera
 LOS - Land Observation Satellite (Japan)
- MAB - Man and Biosphere
 MBB - Messerschmitt-Bölkow-Blohm
 MEOS - Multidisciplinary Earth Observation Satellite (ESA)
 MLA - Multiple Linear Array oder Multispectral Linear Array
 MMS - Multi-Mission Modular Spacecraft
 MOS - Marine Observation Satellite (Japan)
 MSS - Multispectral Scanner
 MTF - Modulation Transfer Function
- NASA - National Aeronautics and Space Administration (U.S.A.)
 NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration (U.S.A.)
 NRSA - National Remote Sensing Agency (Indien)
- ONERN - Oficina National de Evaluacion de Recursos Naturales (Peru)
 OSAD - Outer Space Affairs Division (UNO-Sekretariat)
- PAMIRSAT - Passive Microwave Radiometer Satellite (ESA)
 PIXEL - Picture element
- RBV - Return Beam Vidicon

SAMS - Stratospheric and Mesospheric Sounder
 SAR - Synthetic Aperture Radar
 SBUV/TOMS - Solar Backscatter Ultraviolet and Total Ozone Mapping Spectrometer
 SEOS - Synchronous Earth Observation Satellite
 SLAR - Side-looking Airborne Radar
 SLR - Side-looking Radar
 SMMR - Scanning Multichannel Microwave Radiometer
 SMS - Synchronous Meteorological Satellite
 SPOT - Satellite Probatoire pour l'Observation Terrestre (CNES, Frankreich)
 STSC - Scientific and Technical Sub-Committee of COPUOS

 TDRSS - Tracking and Data Relay Satellite System
 THIR - Temperature Humidity Infrared Radiometer
 TIROS - Television and Infra-Red Observation Satellite
 TM - Thematic Mapper in LANDSAT-D

 UN (UNO) - United Nations Organization
 UNCOD - United Nations Conference on Desertification
 UNDP - United Nations Development Programme
 UNEP - United Nations Environment Programme
 UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
 USGS - U.S. Geological Survey (U.S. Department of Interior)

 VAS - VISSR Atmospheric Sounder
 VHRR - Very High Resolution Radiometer
 VISSR - Visible IR-Spin-Scan Radiometer
 VTPR - Vertical Temperature Profil Radiometer

 WEFAX - Weather Facsimile
 WMO - World Meteorological Organization
 WWW - World Weather Watch (Programm der WHO und des ICSU)

Literatur

- [1] BARRETT, CURTIS: Introduction to environmental remote sensing.
London; Chapman Hall 1976
- [2] ... Background paper by the Secretary-General assessing United Nations documents and other pertinent data related to the subject of remote sensing of the earth by satellite.
UN-Doc. A/AC. 105/108 (12 June 1973) 67 S.
- [3] ... Questions relating to remote sensing of the earth by satellites; Working paper submitted by the Union of Soviet Socialist Republics (15 February 1977).
UN-Doc. A/AC. 105/C. 1/L. 94
- [4] SCHANDA, E. (Hrsg.): Remote sensing for environmental sciences.
Ecological Studies 18, Springer Verlag Berlin - Heidelberg - New York 1976, 367 S.
- [5] ... Aerokosmičeskie issledovanija zemli, Izdatel'stvo Nauka, Akademija Nauk SSR. IKI, Moskva 1979, 303 S.
- [6] ... Aerokosmičeskie issledovanija zemli - obrabotka videoinformacii na EVM. Izdatel'stvo Nauka, Akademija Nauk SSR. IKI, Moskva 1978, 245 S.
- [7] ... Report of the Scientific and Technical Sub-Committee on the work of its fourteenth session.
UN-Doc. A/AC. 105/195 (1 March 1977) 28 S.
- [8] REEVES, R.G. (Hrsg.): Manual of remote sensing: Vol. 1: Theorie, instruments and techniques
American Soc. of Photogram. Falls church: Virginia 1975, 867 S.
- [9] FARROW, I.B.: The influence of the atmosphere on remote sensing measurements.
Vol. 1. Ultraviolet, visible and infrared regions. Vol. 2. Microwave and radio wavelengths
Contractor rep. European Space Agency, ESA CR-354 and ESA CR-355 1975
- [10] ORHAUG, T.: Passive microwave radiometry and its potential applications to earth resources surveys: Microwave emissions from natural materials.
Contractor rep., European Space Res. Organiz., ESRO CR-74 1973
- [11] FITZGERALD, E.: Multispectral scanning systems and their potential application to earth-resources surveys: Spectral properties of materials.
Contractor rep. , European Space Res. Organiz., ESRO CR-232 1974, 231 S.
- [12] DEANE, R.A.; DOMVILLE, A.R.: Side-looking radar systems and their potential application to earth-resources surveys: Radar scattering from natural surfaces.
Contractor rep., European Space Res. Organiz., ESRO CR-137 1973, 49 S.
- [13] MOORE, G.K.: Satellite surveillance of physical water-quality characteristics.
In: Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor: (1978), 1, S. 445 - 462
- [14] KAWATA, Y.; HABA, Y. u. a.: Atmospheric effects and their correction in airborne sensor and Landsat MSS data.
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor, 1 (1978), S. 1241 - 1258
- [15] ... Resource sensing from space: prospects for developing countries.
Nat. Acad. of Sci., Washington D.C. 1977, 202 S.
- [16] HALLOCK, H.B.: The use of land resource satellite sensors for air and water pollution measurements.
In: Remote sensing of earth resources, edited by F. Shahrokki, Univ. of Tennessee, Tullahoma 4 (1975), S. 431 - 460
- [17] SAVIGEAR, R.A.G. u. a.: Multispectral scanning systems and their potential application to earth resources surveys: Earth science applications
Contractor rep., ESRO CR-234 1975, 202 S.

- [18] OWEN JONES, E.S.: The electromagnetic spectrum, properties and principles of measurement
UN/FAO-Seminar on Applications of Remote Sensing. Univ. of Reading, UK, 22.6.-10.7.1976. Coll. papers, 1 (1976)
- [19] SELLERS, W.D.: Physical climatology
Univ. of Chicago Press, Chicago 1965, 272 S.
- [20] SCHANDA, E.; HOFER, R.; WYSSEN, D.: Soil moisture determination and snow classification with microwave radiometry
Proc. 12th internat. Symp. Rem. Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor: 2 (1978), S. 1779 - 1790
- [21] LYON, R.J.P.: Analysis of rocks by spectral infrared emission (8 to 25 microns)
Economic Geol., 60 (1965), S. 715 - 736
- [22] VALLEY, S.L.: Handbook of geophysics and space environments
Airforce Cambridge Res. Labor., Off. of Aerospace Res. U.S.A.F., Mc Graw Hill 1965
- [23] ... The detection and monitoring of pollution of the environment by means of remote sensing from outer space
UN-Doc. A/AC. 105/202 (23 September 1977); Add. 1, (22 November 1977) and Add. 2, (9 January 1978)
- [24] HALAJIAN, J.; HALLOCK, H.B.; Photometric and polarimetric mapping of water turbidity and water depth
NASA CR 134030, Final techn. Rep. Contract NAS 9-12963 (1973)
- [25] BOWERS, S.A.; HANKS, R.J.: Reflection of radiant energy from soils
Soil Sci. 100 (1965) 2, S. 130 - 138
- [26] GATES, D.M.: Physical and physiological properties of plants
In: Remote Sensing. Nat. Acad. of Sci., Washington, D.C. 1970
- [27] FISCHER, W.: Determination of spectral signatures of vegetated surfaces by radiometric measurements
Proc. 12th internat. Symp. Rem. Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor: 2 (1978), S. 2333 - 2342
- [28] YOST, E.; WENDEROTH, S.: The reflectance spectra of mineralized trees
Proc. 4th internat. Symp. Remote Sens. Environ. Univ. Michigan, Ann. Arbor (1966), S. 305 - 312
- [29] DUNTLEY: Detection of ocean chlorophyll from earth orbit
4th Annual Earth Resources Programm Rev., 4 (1972) (aus [11])
- [30] MYERS, V.I.: Soil, water and plant relations
Chapter 6 of: Remote Sensing. Comm. on Remote Sensing for agricultural Purposes, nat. Acad. of Sci., Washington, D.C. 1970
- [31] CLARKE, G.L.; EWING, G.C.; LORENZEN, C.J.: Spectra backscattered light from the sea obtained from aircraft as a measure of chlorophyll concentration
Sci. 167 (1970), S. 1119 - 1121
- [32] HIGHAM, A.D.; WILKINSON, B.; KAHN, D.: Multispectral scanning systems and their potential application to earth-resources surveys: Basic physics and sensing technology
Contractor rep., ESRO CR-231 (1973), 183 S.
- [33] Mc ALISTER, E.D.: Infra-red optical techniques applied to oceanography. I. Measurement of total heat flow from the sea surface
Appl. Optics 2 (1964) 5, S. 609 - 612
- [34] DOYLE, F.J.: The next decade of satellite remote sensing
Photogramm. Engin. Remote Sens. 44 (1978) 2, S. 155 - 164
- [35] HENDERSON III, F.B.: Geosat: Geological industry recommendations on remote sensing from space
Photogramm. Engin. Rem. Sens. 44 (1978) 2, S. 165 - 169

- [36] KAUTZLEBEN, H.; BORMANN, P.; JOACHIM, R.: Remote sensing activities in the German Democratic Republic
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor 1 (1978), S. 113 - 121
- [37] BANYARD, S.G.: Radar interpretation based on photo-truth keys
ITC Journal (1979) 2, S. 249 - 266
- [38] ZICKLER, A.: Design and technical parameters of the MKF-6 multispectral camera and the MSP-4 multispectral projector
Paper presented at the 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor 1 (1978),
- [39] ... Characteristics and capabilities of sensors for earth resources surveys
UN-Doc. A/AC. 105/204 (9 Sept. 1977), 27 S.
- [40] KOOPMANS, B.N.: In: Proceedings of the seminar on remote sensing applications Bangkok, 29.9.-6.10.1974, UN Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (1975), S. 25 - 40 and S. 131 - 162
- [41] GELNETT, R.H.: Importance of look direction and depression angles in geologic applications of SLAR
Motorola Aerial Remote Sensing, Inc. Technical Report TR-04823 (1978), 15 S.
- [42] ... United Nations Press Release. No ECA/595 (11 September 1978)
- [43] TARANIK, J.V.: Characteristics of the LANDSAT multispectral data system
Open-file report 78 - 187 of the US Dep. of the Interior, Geolog. Survey, Sioux Falls 1978, 76 S.
- [44] SALOMONSON, V.V.: LANDSAT-D, a systems overview
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor 1 (1978), S. 371 - 385
- [45] COLVOCORESSES, A.P.: In: Forum on proposed parameters for an operational LANDSAT Photogramm. Engin. Rem. Sens. 44 (1978) 2, S. 189 - 192
- [46] ... Report of the Scientific Technical Subcommittee on the work of its 17th session
UN-Doc. A/AC. 105/267 (15 February 1980)
- [47] VELTEN, E.H.; GILG, W.; RAUSCH, G.: Some recent developments in remote sensing instruments and measurement systems
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor 2 (1978), S. 1421 - 1430
- [48] ... Report on effective resolution element and related concepts
UN-Doc. A/AC. 105/260 (17 January 1980), 7 S.
- [49] ... The definition of spatial resolution in imaging radar systems (Working paper presented by the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland)
UN-Doc. A/AC. 105/251 (5 October 1979), 21 S.
- [50] GAUBERT, A.M.: SPOT: The French Earth Observation System
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor 1 (1978)
- [51] ... Data preprocessing systems for earth resources surveys
Vol. 1: Introduction to preprocessing techniques. Contractor rep., ESRO CR-295 (1973), 118 S.
- [52] HEMPENIUS, S.: Critical review of the status of remote sensing
Bildmessung und Luftbildwesen 44 (1976) 1, S. 29 - 41
- [53] MELEN, R.; BUSS, D. (Hrsg.): Charge-coupled devices: technology and applications
IEEE Press
- [54] ... Report on the UN/FAO Regional Training Seminar on the Applications of Remote Sensing from Satellite
La Paz, Bolivia, 1-9 December 1977
UN-Doc. A/AC. 105/210 (15 December 1977), 14 S.

Geometrisches, radiometrisches, spektrales und zeitliches Auflösungsvermögen eines Fernerkundungsaufnahmesystems sind in komplexer Weise miteinander verknüpft. Sie bedingen sich z. T. gegenseitig und müssen in Verbindung mit dem angestrebten Aufnahmemaßstab aufgabenbezogen optimiert werden. Welcher Auflösungsparameter entscheidend bzw. welche Kombination am geeignetsten ist, hängt von der Aufgabenstellung und den Umweltbedingungen ab. Das effektive geometrische Auflösungsvermögen ist für einen gegebenen Sensor keine feststehende Größe. Es wird außer von sensorinhärenten Faktoren (Abbildungseigenschaften, spektrales und radiometrisches Auflösungsvermögen auch von äußeren Bedingungen beeinflusst (Form und Anordnung der Objekte, spektraler Objektkontrast, allgemeine Helligkeit der Szene, Zustand der Atmosphäre, Art der Datenvorverarbeitung).

Die Ausrüstung von Datenauswertezentren hängt von den zu lösenden Aufgaben und Randbedingungen (z. B. Umfang und Art des anfallenden Datenmaterials, verfügbare Kader, finanzielle Ressourcen) ab. Die Anschaffung kostspieliger Geräte oder die Nutzung teurer digitaler Methoden ist nur gerechtfertigt, wenn die entsprechende Arbeit in der erforderlichen Menge und Qualität anders nicht bzw. mit deren Hilfe letztendlich billiger getan werden kann. Ausrüstung und personeller Aufwand für ein methodisch-diagnostisches Zentrum werden vor allem bestimmt durch die erforderliche Präzision und Komplexität, mit der Bildbearbeitungs- und Auswerteverfahren auf ihre Eignung für den Nutzer getestet und die der Auswertung zugrundeliegenden naturgesetzlichen Zusammenhänge untersucht werden müssen. Der Beitrag der erbrachten Ergebnisse für die Beschleunigung, Kostensenkung und Erhöhung der Aussagekraft operativer Routineauswertungen sowie der Umfang, in dem diese Verfahren schließlich in der Praxis genutzt werden, entscheiden nachträglich über die Effektivität entsprechender Aufwendungen.

Bei der Entscheidung für bzw. der Auswahl von geeigneten Fernerkundungssystemen zur Lösung von Erkundungs- und/oder Überwachungsaufgaben sowie bei Überlegungen zur wirksamen Integration dieser Systeme in den nationalen Planungs- und Leitungsprozeß muß die Erfüllung einer Reihe von Voraussetzungen geprüft werden. Dazu gehören:

- a) Verfügbarkeit von Daten (d. h. gesicherter Zugang zu den Daten, Kontinuität und Rechtzeitigkeit der Datenbereitstellung, ausreichend häufige Wiederholungsüberdeckung);
- b) Akzeptierbarkeit des Fernerkundungssystems vom politischen, (völker-) rechtlichen und technischen Standpunkt. Zum letztgenannten Aspekt gehören die Kompatibilität, Komplementarität und Zuverlässigkeit der Daten;
- c) Nutzbarkeit bzw. Realisierbarkeit des Systems unter Beachtung der ökonomischen, wissenschaftlich-technischen und infrastrukturellen Bedingungen des jeweiligen Landes.

Ein totales Fernerkundungssystem umfaßt neben den wissenschaftlich-technischen und methodisch-analytischen Teilsystemen das Teilsystem der Informationsnutzung. Die Effektivität des Gesamtsystems wird entscheidend von der seines schwächsten Gliedes bestimmt. Auch ein vom wissenschaftlich-technischen und methodischen Standpunkt aus optimiertes Fernerkundungssystem kann nur in dem Maße ökonomisch-gesellschaftlich wirksam werden, wie die bestehenden Planungs- und Leitungsstrukturen in der Lage sind, die gewonnenen Informationen schnell und sachkundig zu integrieren und in nützliche Aktivitäten umzusetzen. Erfahrungsgemäß ist nicht die Gewinnung der Daten und der daraus abgeleiteten Informationen, sondern die Schaffung geeigneter Bindeglieder zwischen Information und Aktion das entscheidende Problem.

Die Größe der Länder, ihr Entwicklungsstand und Erschließungsgrad sowie die natürlichen und gesellschaftlichen Bedingungen variieren erheblich. Dementsprechend sind auch die geeignetsten Formen zur Organisation nationaler und regionaler Fernerkundungsaktivitäten verschieden. Generell erweisen sich Organisationsformen am effektivsten, die eine dem interdisziplinären Charakter der Fernerkundung angemessene wirksame inter-institutionelle Kooperation und Koordinierung der verschiedenen Nutzerbereiche herbeiführen. Deshalb ist - insbesondere für Länder, die sich eine Duplizierung von Anstrengungen und Ressourcen nicht leisten können - neben einer horizontalen Koordinierung auch eine übergeordnete, fachlich kompetente entscheidungsbefugte Leitung zweckmäßig. Gesamtgesellschaftliche Interessen können so am besten berücksichtigt und materielle und personelle Ressourcen für eine ausgewogene Entwicklung der Teilsysteme optimal eingesetzt werden.

Kosten-Nutzen-Aussagen zur Fernerkundung sind nur sinnvoll im Hinblick auf spezifische zu lösende Probleme unter Beachtung lokaler Bedingungen und Erfordernisse und zur Verfügung stehender Alternativmethoden. Sie müssen deshalb für jedes Land neu erarbeitet werden. Dabei muß zwischen quantifizierbarem, klar faßbarem aber nicht quantifizierbarem und weder klar faßbarem noch quantifizierbarem Nutzen unterschieden werden. Welcher Wert letzterem beigemessen wird, hängt wesentlich von den politischen Zielstellungen und sozial-ökonomischen Bedingungen des jeweiligen Landes ab.

Der tatsächlich realisierbare Nutzen hängt außer von wissenschaftlich-technischen und organisatorischen Faktoren auch vom Anwendungsgebiet ab. Von Anwendungen der Satellitenfernerkundung für landwirtschaftliche Fragestellungen wird der größte Nutzen erwartet, gefolgt von Fragen der Landnutzungsplanung und Wasserressourcenbewirtschaftung. Der Nutzen für die Erkundung geologisch-mineralischer Ressourcen wird langfristig gesehen relativ gering eingestuft (<10 % des Gesamtnutzens). Die Nutzungsverhältnisse für verschiedene Anwendungen werden allerdings beeinflusst sowohl von den technischen Parametern der zur Verfügung stehenden Fernerkundungssysteme als auch vom momentanen Erkundungsstand und der relativen Häufigkeit bzw. ökonomischen Bedeutung der verschiedenen Ressourcenarten für ein gegebenes Land.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit baut einerseits auf Erfahrungen auf, die der Autor während seiner fast dreijährigen Tätigkeit in der Weltraumabteilung der UNO in New York sammeln konnte und berücksichtigt andererseits Ergebnisse und Wertungen, wie sie im Zentralinstitut für Physik der Erde der Akademie der Wissenschaften der DDR beim Aufbau eines eigenen methodisch-diagnostischen Zentrums für Fernerkundung und der Koordinierung nationaler Fernerkundungsaktivitäten gewonnen wurden.

Es ist dem Autor ein Bedürfnis, all denen zu danken, die durch Forderungen, Fragen, förderliche Diskussionen und aufmunternde Unterstützung meine Beschäftigung mit dem Thema stimuliert und mir Mut gemacht haben, es in dieser geschlossenen Form abzuhandeln. Ein besonderer Dank gilt dabei dem Direktor des Zentralinstituts für Physik der Erde, Prof. Dr. H. KAUTZLEBEN. Zu großem Dank bin ich auch Prof. L. PEREK, seinerzeit Leiter der UNO-Weltraumabteilung sowie dem langjährigen UNO-Experten für Anwendungen der Weltraumtechnik, Prof. H.G.S. MURTHY, verpflichtet. Den an der technischen Fertigstellung der Veröffentlichung beteiligten Mitarbeitern des ZIPE und des VEB Kartographischer Dienst Potsdam sei an dieser Stelle ebenfalls herzlich gedankt.

Erläuterung von Abkürzungen

APT	- Automatic Picture Transmission
ARSC	- African Remote Sensing Council
AVHRR	- Advanced Very High Resolution Radiometer
CCD	- Charge-Coupled Device
CCIR	- International Radio Consultative Committee
CCRS	- Canada Center for Remote Sensing
CGT	- Computer Compatible Tape
CNES	- Centre National d'Etudes Spatiales (Frankreich)
COMSAT	- Communications Satellite Corporation (Washington, D.C., U.S.A.)
COPUOS	- Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (UNO)
COSPAR	- Committee on Space Research (ICSU, s.u.)
CTS	- Communications Technology Satellite (Kanada)
CZCS	- Coastal Zone Color Scanner
DCP	- Data Collection Platform
DCS	- Data Collection System
EARTHSTAT	- Earth Satellite Corporation (Washington, D.C.)
EDC	- EROS Data Center (s. EROS)
EIFOV	- Effective Instantaneous Field of View
EOS	- Earth Observation Satellite
ERB	- Earth Radiation Budget Mission (NIMBUS-7)
ERRE	- Effective Radiometric Resolution Element
ERE	- Effective Resolution Element
EREP	- Earth Resources Experiment Package (Skylab-Experiment)
ERIM	- Environmental Research Institute of Michigan (Ann Arbor, U.S.A.)
EROS	- Earth Resources Observation Systems (Datenzentrum des U.S. Geological Survey, U.S. Department of Interior)
ERTS	- Earth Resources Technology Satellite (später in LANDSAT umbenannt)
ESA	- European Space Agency
ESTEC	- European Space Research and Technology Centre (Noordwijk, Niederlande)
FAO	- United Nations Food and Agriculture Organization
GARP	- Global Atmospheric Research Programme (WMO/ICSU)
GEMS	- Global Environmental Monitoring System
GEOS	- Geodynamic Experimental Ocean Satellite
GIPME	- Global Investigation of Pollution in the Marine Environment (WMO/ICSU)
GOES	- Geostationary Operating Environmental Satellite
GSFC	- Goddard Space Flight Center (NASA, Greenbelt, Md., U.S.A.)
HCMM	- Heat Capacity Mapping Mission Satellite
HDDT	- High Density Digital Tapes
HIR	- Horizontal Infrad-Red Radiometer
HIRS	- High Resolution IR-Radiometric Sounder
HRPT	- High Resolution Picture Transmission

- ICSI - International Commission on Snow and Ice
 ICSU - International Council of Scientific Unions
 IDOE - International Decade of Ocean Exploration
 IFOV - Instantaneous Field of View
 IFRB - International Frequency Registration Board (ITU)
 IGCP - International Geological Correlation Programme
 IGOSS - Integrated Global Ocean Stations System
 IHP - International Hydrological Programme
 INTELSAT - International Telecommunications Satellite Organization
 INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais (Brasilien)
 IOC - Intergovernmental Oceanographic Commission
 ISRO - Indian Space Research Organization
 ITC - International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences
 (Enschede, Niederlande)
 ITU - International Telecommunication Union
 IUGG - International Union of Geodesy and Geophysics
 IUGS - International Union of Geological Sciences

 JEOS - Japanese Earth Observation Satellite

 LACATE - Lower Atmosphere Composition and Temperature Experiment
 LACIE - Large Area Crop Inventory Experiment
 LAPAN - Indonesische Agentur für Aeronautik und Weltraumangelegenheiten
 LARS - Laboratory for Applications of Remote Sensing (Purdue Univ., Indiana, U.S.A.)
 LFC - Large Format Camera
 LOS - Land Observation Satellite (Japan)

 MAB - Man and Biosphere
 MBB - Messerschmitt-Bölkow-Blohm
 MEOS - Multidisciplinary Earth Observation Satellite (ESA)
 MLA - Multiple Linear Array oder Multispectral Linear Array
 MMS - Multi-Mission Modular Spacecraft
 MOSQ - Marine Observation Satellite (Japan)
 MSS - Multispectral Scanner
 MTF - Modulation Transfer Function

 NASA - National Aeronautics and Space Administration (U.S.A.)
 NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration (U.S.A.)
 NRSA - National Remote Sensing Agency (Indien)

 ONERN - Oficina National de Evaluacion de Recursos Naturales (Peru)
 OSAD - Outer Space Affairs Division (UNO-Sekretariat)

 PAMIRSAT - Passive Microwave Radiometer Satellite (ESA)
 PIXEL - Picture element

 RBV - Return Beam Vidicon

SAMS - Stratospheric and Mesospheric Sounder
SAR - Synthetic Aperture Radar
SBUV/TOMS - Solar Backscatter Ultraviolet and Total Ozone Mapping Spectrometer
SEOS - Synchronous Earth Observation Satellite
SLAR - Side-looking Airborne Radar
SLR - Side-looking Radar
SMMR - Scanning Multichannel Microwave Radiometer
SMS - Synchronous Meteorological Satellite
SPOT - Satellite Probatoire pour l'Observation Terrestre (CNES, Frankreich)
STSC - Scientific and Technical Sub-Committee of COPUOS

TDRSS - Tracking and Data Relay Satellite System
THIR - Temperature Humidity Infrared Radiometer
TIROS - Television and Infra-Red Observation Satellite
TM - Thematic Mapper in LANDSAT-D

UN (UNO) - United Nations Organization
UNCOD - United Nations Conference on Desertification
UNDP - United Nations Development Programme
UNEP - United Nations Environment Programme
UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USGS - U.S. Geological Survey (U.S. Department of Interior)

VAS - VISSR Atmospheric Sounder
VHRR - Very High Resolution Radiometer
VISSR - Visible IR-Spin-Scan Radiometer
VTPR - Vertical Temperature Profil Radiometer

WEFAX - Weather Facsimile
WMO - World Meteorological Organization
WWW - World Weather Watch (Programm der WHO und des ICSU)

Literatur

- [1] BARRETT, CURTIS: Introduction to environmental remote sensing.
London; Chapman Hall 1976
- [2] ... Background paper by the Secretary-General assessing United Nations documents and other pertinent data related to the subject of remote sensing of the earth by satellite.
UN-Doc. A/AC. 105/108 (12 June 1973) 67 S.
- [3] ... Questions relating to remote sensing of the earth by satellites: Working paper submitted by the Union of Soviet Socialist Republics (15 February 1977).
UN-Doc. A/AC. 105/C. 1/L. 94
- [4] SCHANDA, E. (Hrsg.): Remote sensing for environmental sciences.
Ecological Studies 18, Springer Verlag Berlin - Heidelberg - New York 1976, 367 S.
- [5] ... Aerokosmičeskie issledovanija zemli, Izdatel'stvo Nauka, Akademija Nauk SSR.
IKI, Moskva 1979, 303 S.
- [6] ... Aerokosmičeskie issledovanija zemli - obrabotka videoinformacii na EVM.
Izdatel'stvo Nauka, Akademija Nauk SSR.
IKI, Moskva 1978, 245 S.
- [7] ... Report of the Scientific and Technical Sub-Committee on the work of its fourteenth session.
UN-Doc. A/AC. 105/195 (1 March 1977) 28 S.
- [8] REEVES, R.G. (Hrsg.): Manual of remote sensing: Vol. 1: Theorie, instruments and techniques
American Soc. of Photogram. Falls church: Virginia 1975, 867 S.
- [9] FARROW, I.B.: The influence of the atmosphere on remote sensing measurements.
Vol. 1. Ultraviolet, visible and infrared regions. Vol. 2. Microwave and radio wavelengths
Contractor rep. European Space Agency, ESA CR-354 and ESA CR-355 1975
- [10] ORHAUG, T.: Passive microwave radiometry and its potential applications to earth resources surveys: Microwave emissions from natural materials.
Contractor rep., European Space Res. Organiz., ESRO CR-74 1973
- [11] FITZGERALD, E.: Multispectral scanning systems and their potential application to earth-resources surveys: Spectral properties of materials.
Contractor rep. , European Space Res. Organiz., ESRO CR-232 1974, 231 S.
- [12] DEANE, R.A.; DOMVILLE, A.R.: Side-looking radar systems and their potential application to earth-resources surveys: Radar scattering from natural surfaces.
Contractor rep., European Space Res. Organiz., ESRO CR-137 1973, 49 S.
- [13] MOORE, G.K.: Satellite surveillance of physical water-quality characteristics.
In: Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978;
Ann. Arbor: (1978), 1, S. 445 - 462
- [14] KAWATA, Y.; HABA, Y. u. a.: Atmospheric effects and their correction in airborne sensor and Landsat MSS data.
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978;
Ann. Arbor, 1 (1978), S. 1241 - 1258
- [15] ... Resource sensing from space: prospects for developing countries.
Nat. Acad. of Sci., Washington D.C. 1977, 202 S.
- [16] HALLOCK, H.B.: The use of land resource satellite sensors for air and water pollution measurements.
In: Remote sensing of earth resources, edited by F. Shahrokki, Univ. of Tennessee, Tullahoma 4 (1975), S. 431 - 460
- [17] SAVIGEAR, R.A.G. u. a.: Multispectral scanning systems and their potential application to earth resources surveys: Earth science applications
Contractor rep., ESRO CR-234 1975, 202 S.

- [18] OWEN JONES, E.S.: The electromagnetic spectrum, properties and principles of measurement
UN/FAO-Seminar on Applications of Remote Sensing. Univ. of Reading, UK, 22.6.-10.7.1976. Coll. papers, 1 (1976)
- [19] SELLERS, W.D.: Physical climatology
Univ. of Chicago Press, Chicago 1965, 272 S.
- [20] SCHANDA, E.; HOFER, R.; WYSSEN, D.: Soil moisture determination and snow classification with microwave radiometry
Proc. 12th internat. Symp. Rem. Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor: 3 (1978), S. 1779 - 1790
- [21] LYON, R.J.P.: Analysis of rocks by spectral infrared emission (8 to 25 microns)
Economic Geol., 60 (1965), S. 715 - 736
- [22] VALLEY, S.L.: Handbook of geophysics and space environments
Airforce Cambridge Res. Labor., Off. of Aerospace Res. U.S.A.F., Mc Graw Hill 1965
- [23] ... The detection and monitoring of pollution of the environment by means of remote sensing from outer space
UN-Doc. A/AC.105/202 (23 September 1977); Add. 1, (22 November 1977) and Add. 2, (9 January 1978)
- [24] HALAJIAN, J.; HALLOCK, H.B.: Photometric and polarimetric mapping of water turbidity and water depth
NASA CR 134030, Final techn. Rep. Contract NAS 9-12963 (1973)
- [25] BOWERS, S.A.; HANKS, R.J.: Reflection of radiant energy from soils
Soil Sci. 100 (1965) 2, S. 130 - 138
- [26] GATES, D.M.: Physical and physiological properties of plants
In: Remote Sensing. Nat. Acad. of Sci., Washington, D.C. 1970
- [27] FISCHER, W.: Determination of spectral signatures of vegetated surfaces by radiometric measurements
Proc. 12th internat. Symp. Rem. Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor: 3 (1978), S. 2333 - 2342
- [28] YOST, E.; WENDEROTH, S.: The reflectance spectra of mineralized trees
Proc. 4th internat. Symp. Remote Sens. Environ. Univ. Michigan, Ann. Arbor (1966), S. 305 - 312
- [29] DUNTLEY: Detection of ocean chlorophyll from earth orbit
4th Annual Earth Resources Programm Rev., 4 (1972) (aus [11])
- [30] MYERS, V.I.: Soil, water and plant relations
Chapter 6 of: Remote Sensing. Comm. on Remote Sensing for agricultural Purposes, nat. Acad. of Sci., Washington, D.C. 1970
- [31] CLARKE, G.L.; EWING, G.C.; LORENZEN, C.J.: Spectra backscattered light from the sea obtained from aircraft as a measure of chlorophyll concentration
Sci. 167 (1970), S. 1119 - 1121
- [32] HIGHAM, A.D.; WILKINSON, B.; KAHN, D.: Multispectral scanning systems and their potential application to earth-resources surveys: Basic physics and sensing technology
Contractor rep., ESRO CR-231 (1973), 183 S.
- [33] Mc ALISTER, E.D.: Infra-red optical techniques applied to oceanography. I. Measurement of total heat flow from the sea surface
Appl. Optics 3 (1964) 5, S. 609 - 612
- [34] DOYLE, F.J.: The next decade of satellite remote sensing
Photogramm. Engin. Remote Sens. 44 (1978) 2, S. 155 - 164
- [35] HENDERSON III, F.B.: Geosat: Geological industry recommendations on remote sensing from space
Photogramm. Engin. Rem. Sens. 44 (1978) 2, S. 165 - 169

- [36] KAUTZLEBEN, H.; BORMANN, P.; JOACHIM, R.: Remote sensing activities in the German Democratic Republic
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor 1 (1978), S. 113 - 121
- [37] BANYARD, S.G.: Radar interpretation based on photo-truth keys
ITC Journal (1979) 2, S. 249 - 266
- [38] ZICKLER, A.: Design and technical parameters of the MKF-6 multispectral camera and the MSP-4 multispectral projector
Paper presented at the 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor 1 (1978),
- [39] ... Characteristics and capabilities of sensors for earth resources surveys
UN-Doc. A/AC. 105/204 (9 Sept. 1977), 27 S.
- [40] KOOPMANS, B.N.: In: Proceedings of the seminar on remote sensing applications Bangkok, 29.9.-6.10.1974, UN Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (1975), S. 25 - 40 and S. 131 - 162
- [41] GELNETT, R.H.: Importance of look direction and depression angles in geologic applications of SLAR
Motorola Aerial Remote Sensing, Inc. Technical Report TR-04823 (1978), 15 S.
- [42] ... United Nations Press Release. No ECA/595 (11 September 1978)
- [43] TARANIK, J.V.: Characteristics of the LANDSAT multispectral data system
Open-file report 78 - 187 of the US Dep. of the Interior, Geolog. Survey, Sioux Falls 1978, 76 S.
- [44] SALOMONSON, V.V.: LANDSAT-D, a systems overview
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor 1 (1978), S. 371 - 385
- [45] COLVOCORESSES, A.P.: In: Forum on proposed parameters for an operational LANDSAT Photogramm. Engin. Rem. Sens. 44 (1978) 2, S. 189 - 192
- [46] ... Report of the Scientific Technical Subcommittee on the work of its 17th session
UN-Doc. A/AC. 105/267 (15 February 1980)
- [47] VELTEN, E.H.; GILG, W.; RAUSCH, G.: Some recent developments in remote sensing instruments and measurement systems
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor 2 (1978), S. 1421 - 1430
- [48] ... Report on effective resolution element and related concepts
UN-Doc. A/AC. 105/260 (17 January 1980), 7 S.
- [49] ... The definition of spatial resolution in imaging radar systems (Working paper presented by the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland)
UN-Doc. A/AC. 105/251 (5 October 1979), 21 S.
- [50] GAUBERT, A.M.: SPOT: The French Trial Earth Observation System
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978; Ann. Arbor 1 (1978)
- [51] ... Data preprocessing systems for earth resources surveys
Vol. 1: Introduction to preprocessing techniques. Contractor rep., ESRO CR-295 (1973), 118 S.
- [52] HEMPENIUS, S.: Critical review of the status of remote sensing
Bildmessung und Luftbildwesen 44 (1976) 1, S. 29 - 41
- [53] MELEN, R.; BUSS, D. (Hrsg.): Charge-coupled devices: technology and applications
IEEE Press
- [54] ... Report on the UN/FAO Regional Training Seminar on the Applications of Remote Sensing from Satellite
La Paz, Bolivia, 1-9 December 1977
UN-Doc. A/AC. 105/210 (15 December 1977), 14 S.

- [55] ... Actual and predicted costs and benefits involved in the practical application of remote sensing technology
UN-Doc. A/AC. 105/153 (18 February 1976), 68 S.
- [56] WHITE, L.P.: Side-Looking radar
UN/FAO training seminar on the applications of remote sensing. Seminar papers, Univ. of Reading, UK, 1 (1976)
- [57] ... Characteristics and capabilities of sensors for earth resources studies (Comparison of the resolution of photographic cameras and instantaneous field of view of linescan instruments). Study prepared by COSPAR
UN-Doc. A/AC. 105/204 Add. 1 (21 December 1978), 29 S.
- [58] ... SEASAT-A: Concern and questions
Sci. News 114 (1978) 17, S. 280
- [59] SCHMIDT-FALKENBERG, H.: Zur Grundlagenforschung in der Fotointerpretation
Nachr. Karten- und Vermessungswesen, Reihe 1, 50 (1970), S. 47 - 51
- [60] STOCKHAM, T.G.: Image processing in the context of a visual model
Proc. IEEE 60 (1972) 7, S. 828 - 842
- [61] ... Report of the Scientific and Technical Sub-Committee on the work of its Sixteenth Session
UN-Doc. A/AC. 105/238 (26 February 1979)
- [62] ... Further satellite developments
ITC Journal (1975) 1, S. 136 - 143
- [63] JOHNSON, D.S.; VETLOV, I.: The role of satellites in WMO programmes in the 1980s
Spezialstudie für WMO mit 2 Anlagen (Annex I: Physical bases of remote methods of determining hydrometeorological and geophysical parameters. Annex II: Observational requirements for WMO programmes) 1976, 74 S.
- [64] ... Information concerning existing or planned national ground stations for direct reception of remote sensing data from satellites
UN-Doc. A/AC. 105/155 and Add. 1 - 6 (1976/77)
- [65] ... Ground systems for receiving, analyzing and disseminating earth resources satellite data
Rep. of the Working Group one of IAF (November 1974) 95 S.
- [66] BEILOCK, M.M.: Systems for acquisition, processing and dissemination of earth resources satellite data
Special study prepared for the UN Outer Space Affairs Division (December 1973) 85 S.
- [67] TURNER, R.E.: Elimination of atmospheric effects from remote sensor data
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila (20.-26.4.1978); Ann. Arbor: 1 (1978), S. 783 - 794
- [68] ... MKF-6M Multispectral Camera
Prospekt des VEB Carl Zeiss Jena
- [69] ... Report on the United Nations Regional Training Seminar on Remote Sensing Applications, Karachi 17 - 28 January 1977;
UN-Doc. A/AC. 105/194 (13 April 1977), 13 S.
- [70] JAZAYERI, B.; NADERI, F.: Satellite remote sensing activities in Iran
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila (20.-26.4.1978); Ann. Arbor: 1 (1978), S. 69 - 80
- [71] LOWITZ, G.E.; SPIWACK, A.G.: Study of image on-board processing methods
ESTEC Contract 2098
- [72] ... Report of the Scientific and Technical Sub-Committee on the Work of its Twelfth Session
UN-Doc. A/AC. 105/150 (7 May 1975), 21 S.
- [73] ... Report of the Scientific and Technical Sub-Committee on the Work of its Thirteenth Session
UN-Doc. A/AC. 105/170 (1976), 30 S.

- [74] ... Report of the Scientific and Technical Sub-Committee on the work of its Fifteenth Session
UN-Doc. A/AC. 105/216 (6 March 1978), 33 S.
- [75] ORTM, R.; WONG, F.; MacDONALD, J.S.: The production of 1:250 000 maps of precision rectified and registered LANDSAT Imagery using the MDA image analysis system: initial results
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila (20.-26.4.1978); Ann. Arbor: 2 (1978), S. 2163 - 2169
- [76] SÖLLNER, R.: Untersuchungen zur interpretationsgerechten Aufbereitung von Multi-spektralfotografien
Dissertationsschrift, Potsdam 1980, 133 S.
- [77] ... Interpretation equipment
VEB Carl Zeiss Jena, GDR, Prospectus, 36 S.
- [78] ... Preliminary study of the organizational and financial requirements of a future operational space segment of an international earth resources survey system
UN-Doc. A/AC. 105/156 (23 February 1976)
- [79] ... Information on equipment for image analysis and interpretation of remote sensing data
UN-Doc. A/AC. 105/C.1/L88 (1977)
- [80] ALFÖLDI, T.T.; RYERSON, R.A.: Satellite Imagery Interpretation: suggestions for laboratory design
COSPAR Technical Manual Series. Manual No 5, Mai 1976, 19 S.
- [81] MALAN, O.G.: How to use transparent DIAZO colour film for interpretation of LANDSAT images
COSPAR Technical Manual Series. Manual No 6 (1976), 36 S.
- [82] PEIPMANN, R.: Grundlagen der technischen Erkennung
Berlin: VEB Verlag der Technik, 1975
- [83] SCHÖBER, M.: Das Sehen
Leipzig: Fachbuchverlag GmbH, 1954
- [84] ... Reports on needs of developing countries for assistance in the practical applications of space technology
UN-Doc. A/AC. 105/143 & Add. 1 - 6 (1976/77)
- [85] OLSEN, Ch.E.: Interpretation extraction with human interpreters
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila (20.-26.4.1978); Ann. Arbor: 1 (1978), S. 323 - 327
- [86] ... Telespacio Newsletter Nr. 6 (1978)
- [87] NDUAGUBA, D.C.: A guide to equipment for remote sensing data analysis
AGD (RS) 5/75, Remote Sensing Circular No 1. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome: 1975, 33 S.
- [88] DONKER, N.H.W.; MULDER, N.J.: Analysis of MSS digital imagery with the aid of principal component transform
ITC-Study. Paper presented at the 13th Congress of the Internat. Soc. for Photogrammetrie, Helsinki: 1976
- [89] WIGTON, W.M.; BORMANN, P.: A guide to area sampling frame construction utilizing satellite imagery
Paper presented to the UN Outer Space Affairs Div. (March 1978), 28 S.
- [90] ... Report on the United Nations/FAO Training Seminar on the Application of Remote Sensing for Natural Resources Survey, Planning and Devel. Reading Univ., U.K., 22 July - 10 August 1976
UN-Doc. A/AC. 105/185 (8 October 1976), 17 S.
- [91] ... Report on the 2nd United Nations/International Training Course on Remote Sensing Applications for Agriculture, Crop Statistics and Agricultural Census. 25 April - 13 Mai 1977. Rome, Italy
UN-Doc. A/AC. 105/198 (7 July 1977), 8 S.

- [92] WAGNER, T.W.; LOWE, D.S.: Ground truth collection techniques
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, (20.-26.4.1978); Ann.
Arbor: 1 (1978), S. 277 - 282
- [93] HEMPENIUS, S.A.; D'AUDRETSCH, F.C.; JACUB RAIS: Remote Sensing and Satellite
Surveying
Economic and Social Commission for Asia and the Pacific Rep. of the ESCAP
Mission (1976), 38 S.
- [94] HOWARD, J.A.: Phyto-geomorphic classification of land units
Paper presented at the UN/FAO Training seminar on the applications of remote
sensing; Reading Univ., U.K., 22 July - 10 August 1976. Coll. papers, 2 (1976)
- [95] MITCHELL, G.W.: The methodology of integrated land resources survey
Paper presented at the UN/FAO Training seminar on the applications of remote
sensing; Reading Univ., U.K., 22 July - 10 August 1976. Coll. papers, 2 (1976)
- [96] SAVIGEAR, R.A.G.: The integrated approach in remote sensing
Paper presented at the UN/FAO Training seminar on the applications of remote
sensing; Reading Univ., U.K., 22 July - 10 August 1976. Coll. papers, 2 (1976)
- [97] GLEASON, CH. et al.: The auxiliary use of LANDSAT data in estimating crop acreages:
Results of the 1975 Illinois crop acreage experiment
Statistical Reporting Service, U.S. Dep. of Agric., SRS-21 (1977), 51 S.
- [98] VON STEEN, D.H.; WIGTON, W.H.: Crop identification and acreage measurement utiliz-
ing LANDSAT (formerly ERTS)
Statist. Reporting Service. U.S. Dep. of Agric.; Final Rep. prepared for NASA
Goddard Space Flight Center (1975), 68 S.
- [99] HUDDLESTON, H.F.: A training course in sampling concepts for agricultural survey
Statist. Reporting Service. U.S. Dep. of Agric., SRS No 21 (1976), 59 S. plus
Anlagen
- [100] HOUSEMAN, E.E.: Area frame sampling in agriculture
Statist. Reporting Service. U.S. Dep. of Agric., SRS No 20 (1975), 79 S.
- [101] SPIERS, B. (Hrsg.): Report of the 2nd Intern. Training Course on Rem. Sens. Appl.
for Agriculture
Food and Agric. Organiz. of the United Nations, Rom (1977), 76 S.
- [102] ... Feasibility study on monitoring processes of desertification (and establishing
an inventory of natural resources) in critical areas of South America
UN Conf. on Desertification. Draft: (1976), 42 S.
- [103] ABOTTEEN, R.A.: Principal component greenness transformation in multitemporal
agricultural LANDSAT data.
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, (20.-26.4.1978); Ann.
Arbor: 1 (1978), S. 765 - 774
- [104] NEARY, P.J.; COINER, J.C.: Detecting transitions in agricultural systems
Proc. Am. Soc. Photogr. 45th Annual Meeting, 2 (1976). S. 477 - 482
- [105] COINER, J.C.; BRUCE, R.C.: Use of change detection in assessing development plans:
a Philippine example
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, (20.-26.4.1978); Ann.
Arbor: 1 (1978), S. 547 - 566
- [106] ROWAN, L.C. et al.: Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks
in visible and near-infrared multispectral images
Geophysics 42 (1977) 2, S. 522 - 535
- [107] GOETZ, A.F.M. et al.: Application of ERTS images and image processing to regional
geologic problems and geologic mapping in northern Arizona
NASA Technical Report 32-1597, Jet Propulsion Laboratory (1975)
- [108] OTTERMAN, J.; LOWMAN, P.D.; SALOMONSON, V.V.: Surveying earth resources by remote
sensing from satellite
Geophys. Surveys 2 (1976), S. 431 - 467

- [109] SCHMIDT, R.G. et al.: A research for sulfide-bearing areas using LANDSAT-1 data and digital image-processing techniques
Proc. NASA Earth Research Symp. Houston Texas (1975), NASA TMX-58168, II-A, S. 112 - 121
- [110] DANJOY, W.A.; SADOWSKI, F.G.: Use of LANDSAT in the study of classification in the tropical jungle
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, (20.-26.4.1978): Ann. Arbor: 1 (1978), S. 947 - 953
- [111] KAUTZLEBEN, H.; BANKWITZ, P.: Zu einigen Fragen der Interpretation aerokosmischer Aufnahmen
Z. geol. Wiss., Berlin 2 (1979) 1, S. 55 - 74
- [112] HELLDEN, U.: The use of LANDSAT-1 imagery for water quality studies in Southern Scandinavia
Proc. NASA Earth Res. Symp., Houston, Texas, June 1975, NASA TMX-58168, I-A, S. 451 - 468
- [113] BOLAND, D.H.P.: LANDSAT-1 multispectral scanner as a tool in the classification of inland lakes
Proc. NASA Earth Res. Symp., Houston, Texas; June 1975, NASA TMX-58168, I-A, S. 419 - 442
- [114] YARGER, H.L.; MC CAULEY, J.R.: Quantitative water quality with LANDSAT and SKYLAB
Proc. NASA Earth Res. Symp., Houston, Texas; June 1975, NASA TMX-58168, I-A S. 347 - 370
- [115] BARKER, J.L.: LANDSAT-1 data as it has been applied for land use and water quality data by the virginia state water control board: Monitoring of water quality
Proc. NASA Earth Res. Symp., Houston, Texas; June 1975, NASA TMX-58168, I-A, S. 383 - 418
- [116] TRINDER, J.C.; NASCA, S.U.: Test on mapping application of LANDSAT imagery
Unisurv G 25 (1976), S. 47 - 70
- [117] KAUTZLEBEN, H.; BANKWITZ, P.: Multispektralaufnahmen des RADUGA-Experiments Erste Erfahrungen und Ergebnisse der Auswertung. Wiss. u. Fortschritt 27 (1977) 10, S. 469 - 474
- [118] PODWYSOCKI, M.H. et al.: Quantification of geologic lineament by manual and machine processing techniques
Proc. NASA Earth Res. Symp., Houston, Texas, June 1975, NASA TMX-58168, I-B
- [119] BANKWITZ, R.: Persönliche Mitteilung (1978)
- [120] PRESS, N.; KAMPSCHUUR, W.: Geofractures and fracture trace analysis
Paper presented at the UN remote sensing seminar, Karachi, January 1977
- [121] KAMPSCHUUR, W; PRESS, N.: Iberian tectonics from LANDSAT
Zusammenfassung eines Kontraktberichts
- [122] KAMPSCHUUR, W. PRESS, N.: The direct relationship of features interpreted from LANDSAT imagery to plate tectonic concepts in the atlantic region: It's significance in hydrocarbon exploration
Paper presented at the Pecora III symposium, Sioux Falls, November 1977. Diese Ergebnisse wurden auch auf dem UNO-Seminar für Fernerkundung in Manila, April 1978, dargestellt.
- [123] CAZENAVE, M.: Le programme SPOT
Proc. of an internat. Conf. on Earth Obs. and Space Managm. of Planet. Res., Toulouse, March 1978, ESA SP-134, S. 177 - 185
- [124] ... Global Crop Experiment (LACIE) evaluated
NASA News Release No 78 - 179 (17 Nov. 1978)
- [125] ... Definiciones de la leyenda de cobertura y uso actual de la tierra. Tercera correccion
Noviembre 1977. (Inform.-mater. für das UNO-Seminar zur Fernerkundung in La Paz, Bolivien, December 1977, 10 S.)

- [126] SHELTON, R.L.; TILMANN, S.E.: Remote sensing, geographic information systems and national land planning: Some Central American and Caribbean Experiences
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, (20.-26.4.1978); Ann. Arbor: 1 (1978), S. 567 - 586
- [127] HOWARD, J.A.: Remote sensing of tropical forests with special reference to satellite imagery
FAO, Rome: AGDCRS 3/76 (1976), 11 S.
- [128] WHITE, J.R. et al.: U.S. coast guard utilization of remote sensing techniques for ocean surveillance
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, (20.-26.4.1978); Ann. Arbor: 2 (1978), S. 2307 - 2309
- [129] ... Summary of studies on cost effectiveness in remote sensing (27 January 1975)
UN-Doc. A/AC. 105/139 and Add. 1 (27 January 1975)
- [130] ... U.S. Geological Survey study weighs aircraft/spacecraft benefits
Aviation Week and Space Technology, (3 February 1975)
- [131] ... Study finds ERS benefits would outstrip costs
Defense/Space Business Daily, (27 January 1975)
- [132] NASCA, S.U.; TRINDER, J.C.: Use of LANDSAT-MSS imagery for topographic map revision
Unisurv G27 (1977), S. 27 - 41
- [133] CARTER, W.D.; ROWAN, L.C.: A world wide approach to remote sensing and mineral exploration
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila (20.-26.4.1978); Ann. Arbor: 1 (1978), S. 387 - 394
- [134] PETRIE, G.: The status of topographic mapping from space imagery
Aus: Remote Sensing Society, Newsletter No 17, June 1978, 13 S.
- [135] HEISS, K.P.: United States benefits of improved world-wide wheat crop information from a LANDSAT system overview
Proc. internat. Conf. on Earth Obs. from Space and Managm. of Planet. Res., Toulouse, 6-11 March 1978, ESA SP-134, S. 563 - 574
- [136] HOWARD, J.A.: Satellite remote sensing of agricultural resources for developing countries - present and future - an international perspective
FAO, Rome: AGD (RS) 2/76 (1976), 14 S.
- [137] HOWARD, J.A.: Concepts of remote sensing applications for food production in developing countries.
FAO, Rome: AGD (RS) 5/76 (1976), 11 S.
- [138] TEODORESCU, C. et al.: Remote sensing in Africa
Report on the ECA technical mission on remote sensing in Africa
February-March 1976, UN Commission for Africa
- [139] SPANN, G.W.: Remote sensing markets in the 1980's
Proc. Am. Soc. Photogr. 45th Annual Meeting, 18-24 March 1979, 2 (1979), S. 533 - 539
- [140] ABIODUN, A.A.: The economic implications of remote sensing from space for the developing countries
Proc. internat. Conf. on Earth Obs. from Space and Managm. of Planet. Res. Toulouse, March 1978, ESA SP-134, S. 575 - 583
- [141] ... A European program for the remote sensing of earth resources from space
ESA, Remote Sensing ESA/RSAGH (75) 1, Rev. 1, Att.: Annex 1: ad hoc Group, (27 October 1975)
- [142] SANGA SABHASRI et al.: Thailand national remote sensing program: Past, present and future
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, (20.-26.4.1978); Ann. Arbor: 1 (1978), S. 37 - 42
- [143] MARELLI L.: The Earthnet program
ESA Bulletin No 13 (1977), S. 41 - 51

- [144] AKHAVI, M.S.: Application of ERTS-1 imagery to water and marine resources in Iran
Proc. Sem. Remote Sensing Applications. Bangkok, Thailand, 29 September -
6 October 1974; UN Economic and Social Commission for Asia and the Pacific,
Bangkok (1975), S. 92 - 100
- [145] HARDY, J.R.: Mapping from remote sensing imagery
UN/FAO Seminar on applicat. of remote sensing, Univ. of Reading, UK, 22 July -
10 August 1976, Coll. papers. 2 (1976)
- [146] CASTRUCCIO, P.A.; LOATS, H.: Application of the dynamic method of flood mapping to
selected developing nations
Study prepared for the UN Outer Space Affairs Div. 1 (1976), 114 S.
- [147] CURREY, D.T.: Remote sensing, floods and flood plains, Victoria, Australia
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, (20.-26.4.1978); Ann.
Arbor: 1 (1978), S. 463 - 480
- [148] RANGO, A.; SALOMONSON, V.V.: Regional flood mapping from space
Water Resources Res. 10 (1974), S. 473 - 484
- [149] PRAMANIK et al.: Sedimentation pattern and land formation studies in the Feni
and Little Feni river estuaries using LANDSAT imageries
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, (20.-26.4.1978); Ann.
Arbor: 2 (1978), S. 2277 - 2284
- [150] MORAIN, S.A.; KLANKAMSORN: Forest mapping and inventory techniques through visual
analysis of LANDSAT imagery: Examples from Thailand
Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, (20.-26.4.1978); Ann.
Arbor: 2 (1978), S. 417 - 426
- [151] WIESNET, D.R.; MCGINNIS, D.F.; McMILLAN, M.C.: Evaluation of ERTS-1 Data for
certain hydrological users
Final Rep. NASA Contract 432-641-14-04-03, nat. Environmental Satellite Service,
NOAA (1974)
- [152] WILLIAMS, R.S. et al.: Environmental studies of Iceland with ERTS-1 imagery
Proc. 9th Symp. Remote Sens. Environ., Ann. Arbor: 1974
- [153] RANGO, A.: An overview of the applications systems verification test on snowcover
mapping
Proc. Workshop Operat. Applic. Satellite Snowcover Observ., South Lake Tahoe,
Calif., 18.-20.8.1975. NASA Sp-391, Washington, D.C. (1975)
- [154] ... Involvement of private sector in operational remote sensing satellite systems
(ORSS) being studied
Defense/Space Business Daily (4 and 7 May 1979)
- [155] ... Kosmičeskie issledovanija zemnych resursov
Moskva: Izdatel'stvo Nauka IKI 1976
- [156] SÖLLNER, R.: Verbesserungen der visuellen Interpretierbarkeit von Schwarz-Weiß-
Bildern durch Grauwertspreizung und Histogrammegalierung
Vermessungstechnik 26 (1978) 8, S. 250 - 265
- [157] SÖLLNER, R.: Optimierung der Farbdifferenzierung in Multispektralbildern durch
Anwendung digitaler und analoger Bildbearbeitungstechniken
Vermessungstechnik (im Druck)
- [158] SÖLLNER, R.; SCHILBACH, G.: Ergebnisse der Hauptachsentransformation an MKF-6-
Aufnahmen
Vermessungstechnik (im Druck)
- [159] SCHILBACH, G.; WEICHELDT, H.; WIRTH, H.: Rechnergestützte Analyse von MKF-6-Auf-
nahmen durch überwachte Klassifizierung
Vermessungstechnik (im Druck)
- [160] DIETERLE, G.; SCHLUDE, F.: Synthetic aperture radar systems and spacelab experi-
ments for the European remote sensing space programme
Paper presented at the XXXth IAF Conference, Munich, 16. - 22. Sept. 1979

- [161] ... Remote Sensing Society Newsletter No 17, June 1978
- [162] FISCHER: Vortrag auf dem 12. Internat. Symp. on Remote Sensing of the Environment, Manila, 20.-26.4.1978
- [163] MORGAN, G.A.: Remote sensing of the oceans - a review. Proc. 12th internat. Symp. Remote Sens. Environ., Manila, 20.-26.4.1978, Ann Arbor 1 (1978), S. 599-617

