

Fernerkundung als Hilfsmittel in der Wattenforschung

Von PETER WIELAND

Zusammenfassung

Zur Ergreifung der natürlichen Gesetzmäßigkeiten bei der Schlicksedimentation im Wattenmeer sind extrem umfangreiche Felddaten erforderlich, die heute personell kaum mehr zu bewältigen sind. Kurzfristige Veränderungen an der Wattoberfläche während der zeitaufwendigen Probeentnahmen bleiben außerdem oft unerfaßt. Deshalb ist anhand einer Test-Befliegung in der Dithmarscher Bucht und vor Sahlenburg die Eignung der Fernerkundung als wesentliches Hilfsmittel hierbei generell untersucht und dabei bestätigt worden. Die Methode und Möglichkeiten werden dargelegt.

Summary

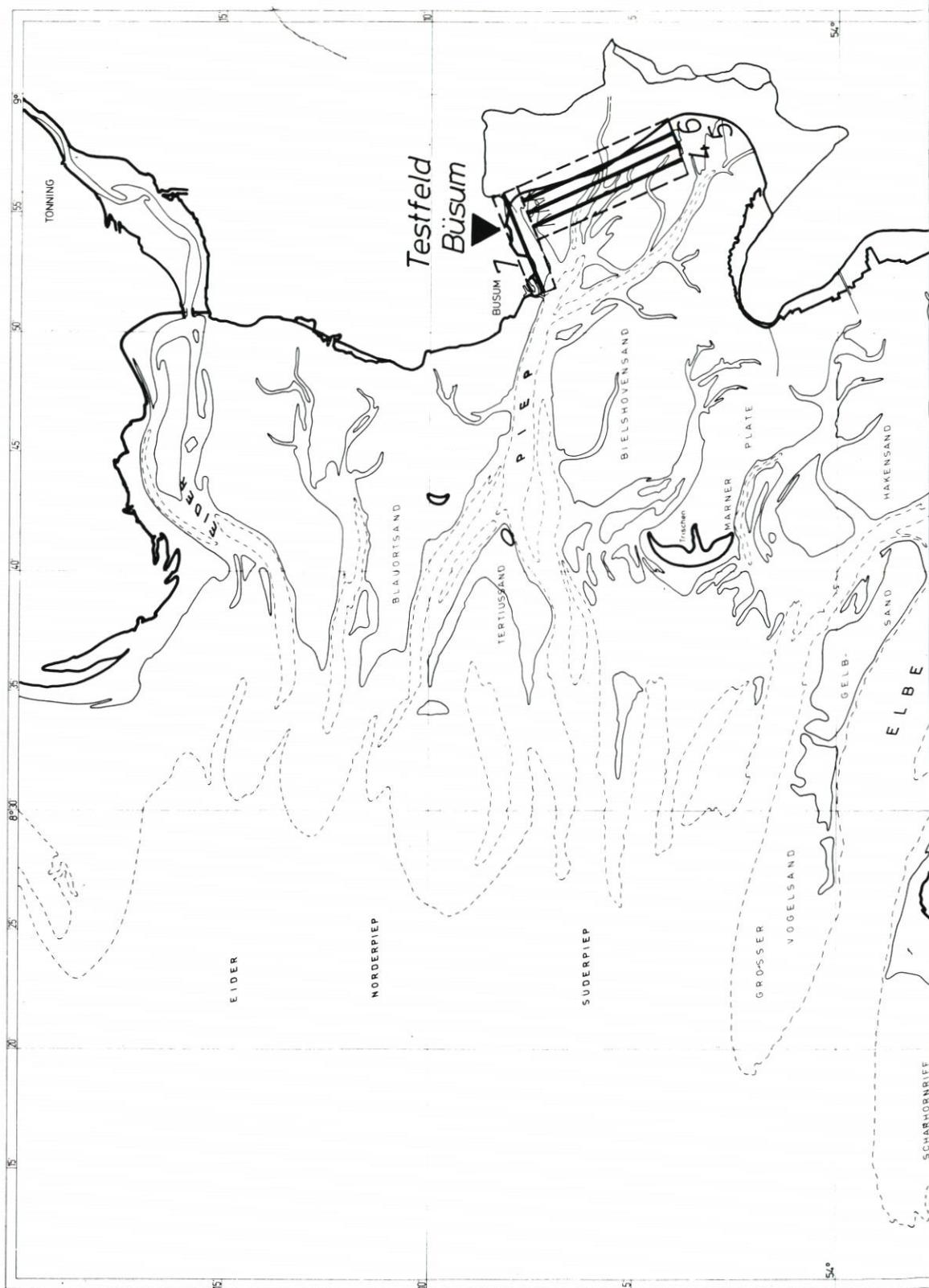
Extensive field surveys are necessary in order to investigate the basic phenomena associated with the formation of mud due to sedimentation in the intertidal zone. These studies can, however, rarely be conducted because they are too personnel intensive. In addition, short term changes of the intertidal surface during the sampling period often remain undetected. For these reasons, the applicability of aerial surveys for investigating the intertidal zone was tested on Dithmarsh Bay and near Sahlenburg. The results were positive. The technique and possibilities are presented here.

Inhalt

1. Anlaß und Aufgabe	91
2. Methode der Fernerkundung	94
2.1 Allgemeines	94
2.2 Erfassung von Fernerkundungsdaten	94
2.3 Digitale Bildverarbeitung	97
2.3.1 Aufbereitung der Daten	99
2.3.2 Auswertung der Daten	99
2.3.3 Interpretation	101
3. Ergebnis und Schlußfolgerung	102
4. Schriftenverzeichnis	105

1. Anlaß und Aufgabe

In einer ersten Phase des vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) im Zeitraum vom 1. 10. 1977 bis zum 31. 12. 1981 geförderten Forschungsvorhabens „Schlicksedimentation Wattenmeer“ (FIGGE et al., 1980) war u. a. die Methodik des Erfassens und Interpretierens von Zuständen und Vorgängen zu ergründen. Dabei sollte ein laufendes Befliegungsprogramm der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) genutzt werden, um mit demzufolge geringem zusätzlichem Kostenaufwand auch die Möglichkeiten und Eignung der Fernerkundung als Hilfsmittel in einem solchen Forschungsvorhaben zu untersuchen. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die gezielte



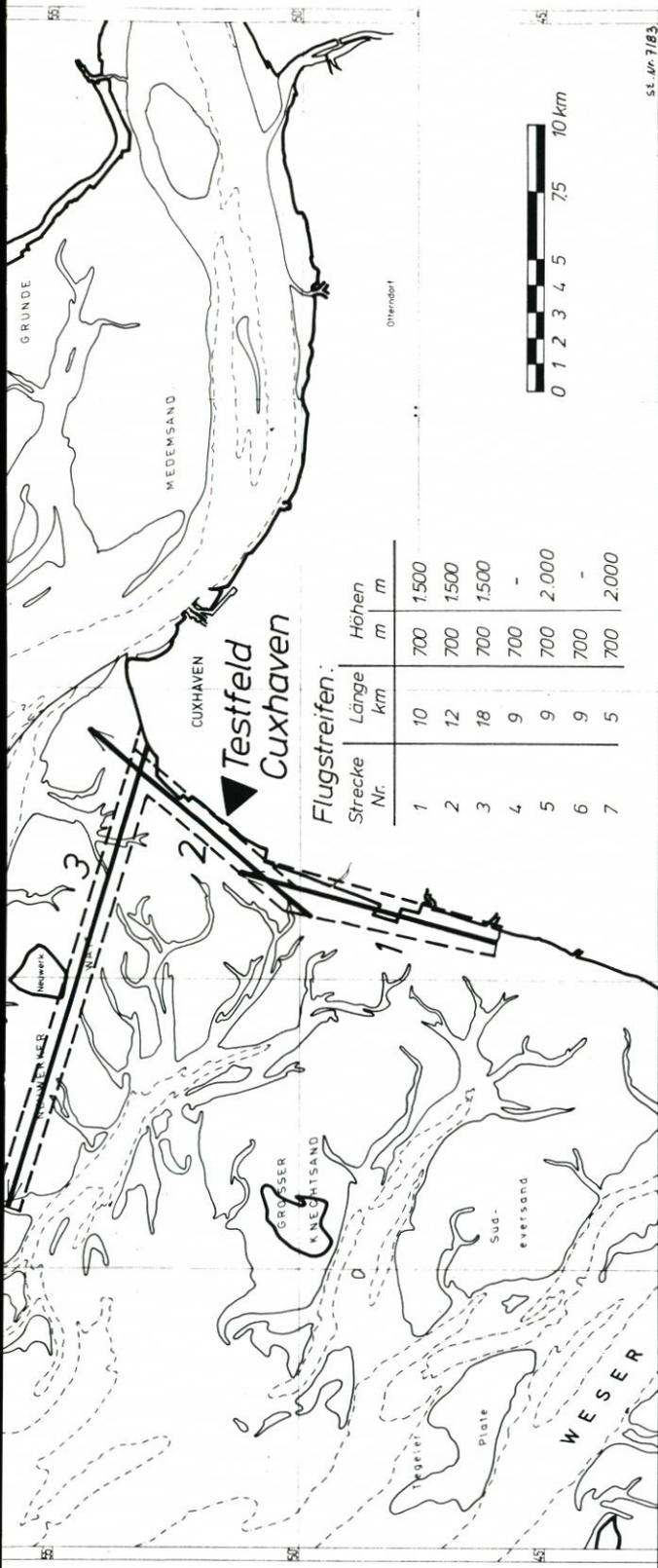


Abb. 1. Übersichtskarte Innere Deutsche Bucht mit den Testfeldern Büsum und Cuxhaven

großräumige, vertiefte Fortführung der Gesamtuntersuchung Schlicksedimentation Wattenmeer.

Nachfolgend wird das Fernerkundungsverfahren erläutert, und es werden die in den beiden Testfeldern Cuxhaven und Büsum (Abb. 1) damit durchgeführten Arbeiten sowie als Ergebnis die Anwendbarkeit der Fernerkundung zusammenfassend dargelegt.

2. Methode der Fernerkundung

2.1 Allgemeines

Durch die Fernerkundung können aus der Distanz „Informationen über die Qualität, den Zustand oder Veränderungen der Landoberfläche, der Atmosphäre oder der Ozeane vornehmlich mit Hilfe der Analyse des von diesen Objekten ausgehenden elektromagnetischen, spektral aufgelösten Strahlungsfeldes“ gewonnen werden (SCHNEIDER, 1980). Dies wird mit den Sensoren sog. „passiver Systeme“, wie Luftbildkammern, Scanner und Radiometer, erreicht. Außerdem werden mit sog. „aktiven Systemen“, besonders Seitwärtsradar, unabhängig von Tageslicht und Bewölkung, durch Mikrowellenimpulse ausgesendete Signale wieder empfangen.

Wesentliche, durch die Fernerkundung gewonnene Auswertungsgrundlage ist das fotografische, panchromatische Luftbild. Es kann direkt zur Auswertung herangezogen werden, weil es die jeweilige Erdoberfläche so wiedergibt, wie es das menschliche Auge erfäßt. Das ist der Bereich zwischen den Wellenlängen des Ultraviolett und des nahen Infrarot (Abb. 2). Dabei ist für die Interpretation die Kenntnis der Grauverteilung des Bildes (Abb. 5) bzw. der Erdoberfläche, z. B. Land, Watt, Meer (= Klassen), also der fotografisch gewonnenen Helligkeitswerte, entscheidend (Abb. 3). Ihre Unterscheidbarkeit ist jedoch optisch begrenzt auf 14 bis 15 Stufen. Weil die große Datenfülle auf Filmen nicht unterzubringen ist und um die hohe Informationsdichte überhaupt bewältigen zu können, wird die digitale Bildverarbeitung angewendet, wobei die im multispektralen Scanner auf Magnetband erfaßten Signale bis zu 63 Werte haben.

2.2. Erfassung von Fernerkundungsdaten

Das Aufnahmesystem gliedert sich in Meßgeräteträger und Sensoren. Als Meßgeräteträger werden am meisten verwendet zweckmäßig einrichtbare und gut navigierbare zweimotorige Flugzeuge mit Bodenluke, Hubschrauber, seit 1972 auch Erderkundungssatelliten wie z. B. LANDSAT, und daneben noch die aufwendigen, bemannten Raumfahrzeuge wie SKYLAB und SPACELAB. Besonders die Erderkundungssatelliten sind für eine kontinuierliche Überwachung von Veränderungen an der Erdoberfläche geeignet. Sie umkreisen die Erde in etwa 915 km Höhe in 103 Minuten auf einer sommersynchronen polaren Umlaufbahn. So macht LANDSAT innerhalb eines Tages 14 Umläufe von Nord nach Süd mit einem Aufnahmestreifen zwischen 81° nördlicher und 81° südlicher Breite, das gleiche Sichtfeld der Erde alle 14 Tage wieder erreichend. Die Raumfahrzeuge folgen in 435 km Höhe einer um 50° zum Äquator geneigten Flugbahn mit einer Umlaufdauer von etwa 93 Minuten, wobei die gleiche Bahn alle 5 Tage wieder erreicht und ein Aufnahmestreifen zwischen nur 50° nördlicher und 50° südlicher Breite erfäßt wird (SCHNEIDER, 1980).

Im Rahmen des Schlickforschungsvorhabens Watten ist von der DFVLR als Meßgeräte-

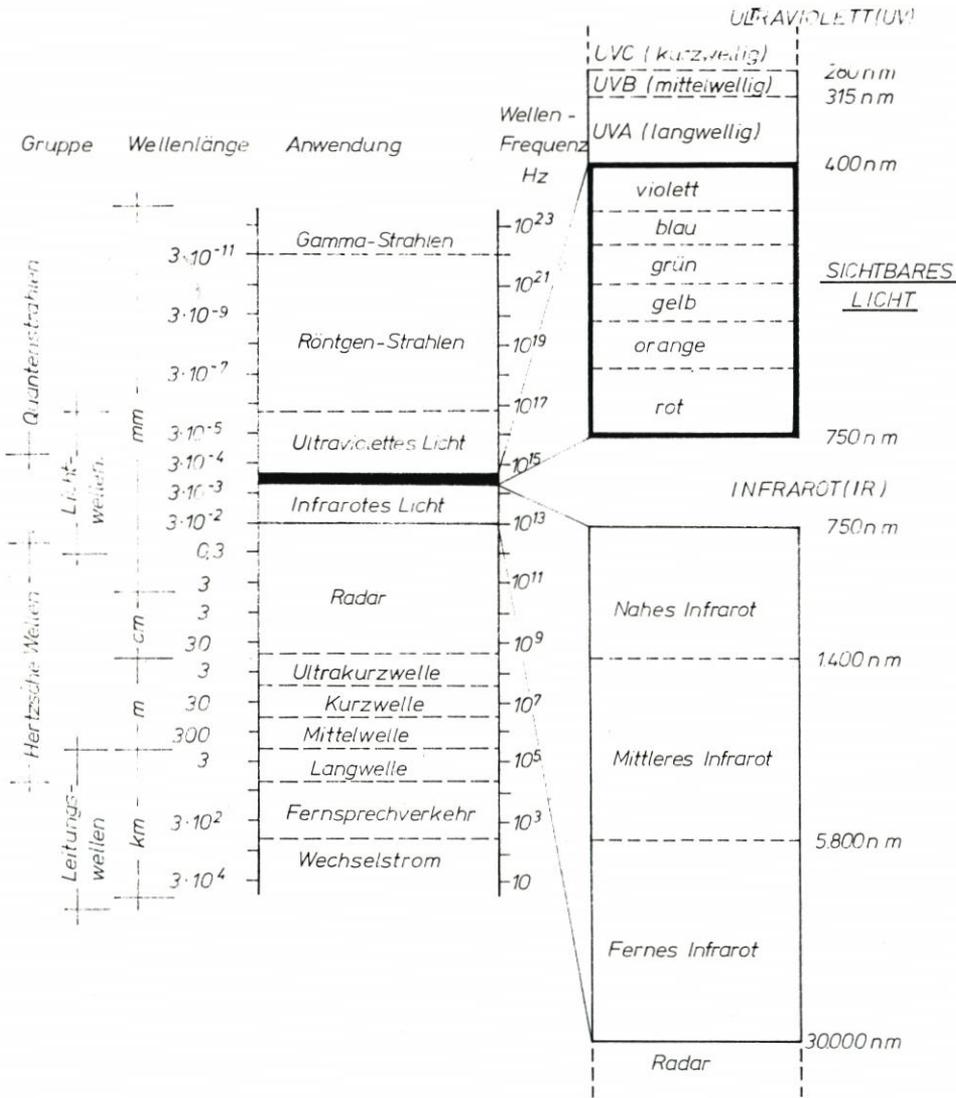


Abb. 2. Elektromagnetisches Wellenspektrum

träger ein Flugzeug des Typs Dornier DO 28 D2 „Skyservant“ eingesetzt worden. Es hat einen offenen Kameraschacht von $1,5 \times 0,5$ m Größe, über dem die Sensoren montiert waren. Die Leistungsdaten dieses Flugzeugs sind folgende (STÄTTER, 1982):

- Besatzung: 3 (Pilot, Meßingenieur, Navigator)
- Fluggeschwindigkeit: ca. 120 Knoten (rd. 220 km/h)
- Flughöhe: 300 bis 5000 m
- Reichweite: ca. 700 km (ca. 3,5 h)

Als Sensoren dienen Luftbildkammern, spezielle Filme sowie Multi-spektralscanner.

Für Aufnahmen im sichtbaren Wellenbereich werden an erster Stelle Luftbildkameras,

und zwar Reihenmeßkammern, verwendet. Sie liefern eine gute, flächenhafte und stereoskopisch auswertbare Bilddeckung, wie sie für die qualitative Luftbildinterpretation gebraucht wird. Reihenmeßkammern unterscheiden sich nach Bildformat und Objektivbrennweite. Darüber hinaus werden z. B. für besonders schwierig interpretierbare Erdoberflächen Spezialkammern eingesetzt wie Panoramakammer, Streifenkammer oder für die Erfassung desselben Flächenteiles in verschiedenen Spektralbereichen auch die mehrlinsige Multispektralkammer. Im Rahmen der Schlickforschung Watten sind folgende Luftbildkammern eingesetzt worden (STÄTTER, 1982):

1. Für Aufnahmen in sog. Fliegerfilmformat über Intervallrechner und Überdeckungsregler eine Reihenmeßkammer als Weitwinkelkamera des Typs RMK A 15/23, Brennweite $f = 15$ cm, Gesichtsfeld 75° , horizontal, Blende 1:4 bis 1:11, Belichtungszeit $\frac{1}{100}$ bis $\frac{1}{1000}$ s, Filmformat 24 cm Breite, Bildgröße 23×23 cm, Bildwiederholungsrate max. 2 s und Bildmaßstab bei 1500 m Flughöhe $m = 1:10\ 000$.
2. Für Multispektralaufnahmen mit verschiedenen Filmen, Filterkombinationen, variablem Bildmaßstab und verschiedenen Objektiven bestückt, ein System aus gekoppelten 70-mm-Kameras bei gleichzeitig auslösbarer Belichtung des Typs Hasselblad der Serien 500/EL und MK 70, Filmformat 70 mm Breite und 55×55 mm Bildgröße.

Bei den Filmen ist die Bildqualität von der Empfindlichkeit der Filmemulsion abhängig. Der in der Schwarzweiß-Fotografie meistens verwendete panchromatische Film (380 bis 680 nm) gibt die Farbunterschiede der Erdoberfläche nach dem Augenempfinden tonwertrichtig wieder. Oft sind jedoch die in schwer differenzierbaren Graustufen liegenden Einzelheiten nicht zu identifizieren. Denn die Remission (Zurückwerfen von Strahlen an undurchsichtigen Flächen) der verschiedenen Objekte ist in den Spektralbereichen unterschiedlich: Zum Beispiel liegt das Maximum bei Wasser im violetten Bereich (400 nm), Sand im gelben (600 nm), lebendes Blattgrün einmal im grünen (560 nm) und außerdem im nahen Infrarot. Im langwelligen Bereich absorbiert das Wasser also die Strahlung, es erscheint im infraroten Bereich (800 nm) schwarz. Lebendes Blattgrün wird dagegen in diesem Bereich stark reflektiert, je nach Chlorophyllgehalt bilden sich Wiesen, Laub und Grünpflanzen sehr hell ab (Abb. 2 u. 3). Durch diesen Chlorophylleffekt sind z. B. deutliche Unterscheidungen auch im amphibischen Wattenmeergebiet möglich (SCHNEIDER, 1980).

Der Farbfilm hat eine ähnliche spektrale Empfindlichkeit wie der panchromatische Schwarzweißfilm, ist diesem jedoch durch die natürliche Farbwiedergabe überlegen. Zur bestmöglichen Nutzung aller Spektralbereiche werden deshalb unterschiedliche Film-Filter-Kombinationen angewendet, wie beim Fernerkundungstest der DFVLR in der Schlickforschung in Batterien mehrerer Kammern oder speziellen mehrlinsigen Multispektralkammern zur Multispektralfotografie zusammengefaßt. Die DFVLR verwendete die für Luftbildaufnahmen aus größeren Höhen wegen der Filtrierbarkeit von Fehlern infolge des atmosphärischen Dunstes die gut geeigneten Filme s/w panchromatisch von Kodak Nr. 2402 und 2405, von Agfa PAN 30 und außerdem als Farbfilm von Kodak „false color infrared“ Nr. 2443. Als Zusatzinformationen wurden in jede Aufnahme eingeblendet (STÄTTER, 1982):

- Laufende Bildnummer (Zählerstand)
- Horizontale Ausrichtung der Kamera (Libelle)
- Barometrische Höhe
- Seriennummer der Meßkammer
- Datum und Uhrzeit der Aufnahme

Der schließlich als Sensor eingesetzte Multispektralscanner ist ein optomechanischer Abtaster, der die von der überflogenen Erdoberfläche empfangene Strahlung mit Hilfe eines geeigneten Spiegels durch Eigenrotation zeilenweise auf lichtempfindliche Zellen abtastet

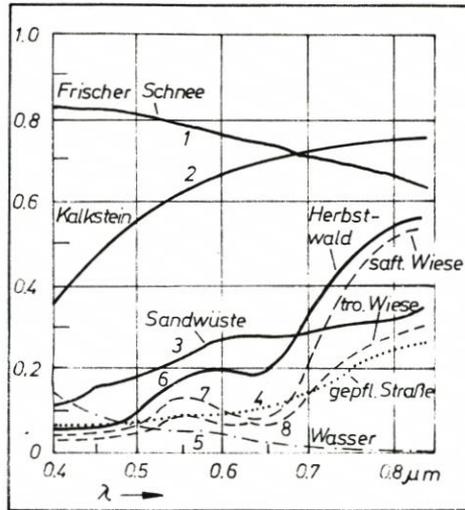


Abb. 3. Remission verschiedener Erdoberflächen

und zugleich registriert, so daß sich in Verbindung mit der Fortbewegung des Flugzeugs in seiner Flugbahn der Zeilenvorschub und aus Einzelbildpunkten zusammengesetzte Bilder der Erdoberfläche ergeben. Dabei wird je nach Bauart des Scanners die Strahlung zur Erhöhung des Unterscheidungsvermögens der Helligkeiten in mehreren Spektralbereichen (Kanälen) erfaßt (Abb. 4). Die Einzeldaten werden korrigiert (Drift-, Nick- und Rollwinkel des Flugzeugs), durch Umwandlung des unterschiedlichen Strahlungsintensitäten entspringenden Lichtes der einzelnen Bildpunkte in elektrische Signale digitalisiert, auf einem Mehrspurenmagnetband aufgezeichnet und schließlich im vorgegebenen Grauwertebereich abgebildet. Außer im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums können auch „Wärmebilder“ im infraroten Bereich aufgezeichnet werden. Die DFVLR verwendete im Forschungsvorhaben Schlick den

Multispektralscanner Bendix M²S

Nutzbarer Scanwinkel: 90° (± 45° von Nadir)

Scanstreifenbreite am Boden: zweifache Flughöhe

Geometrische Auflösung: bei 1000 m Flughöhe 2,5 × 2,5 m

Datenaufzeichnung auf 14-Spur-Analogband

Radiometrische Auflösung des Meßsignals: 1 bit = 256 Grauwerte

Meßwerterfassung in 11 Kanälen: 10 im sichtbaren bzw. nahen infraroten Spektralbereich, 1 im thermalinfraroten Bereich (Abb. 2)

Zur Einstellung des thermal-infraroten Meßbereichs des Scanners verwendet die DFVLR den die Strahlungsequivalent- oder Oberflächentemperatur registrierenden Infrarotradiometer BARNES PRT-5 mit einem von -20 °C bis +60 °C einstellbaren Meßbereich.

2.3 Digitale Bildverarbeitung

Mit der Verfügbarkeit von Luftbildaufnahmen des schleswig-holsteinischen Wattenmeergebiets seit 1935 (WIELAND, 1982) wurden die topografischen Unterlagen (Watthöhenkarten) für eine Überwachung von Formänderungen der Priele, Watten, Außensände und Inseln

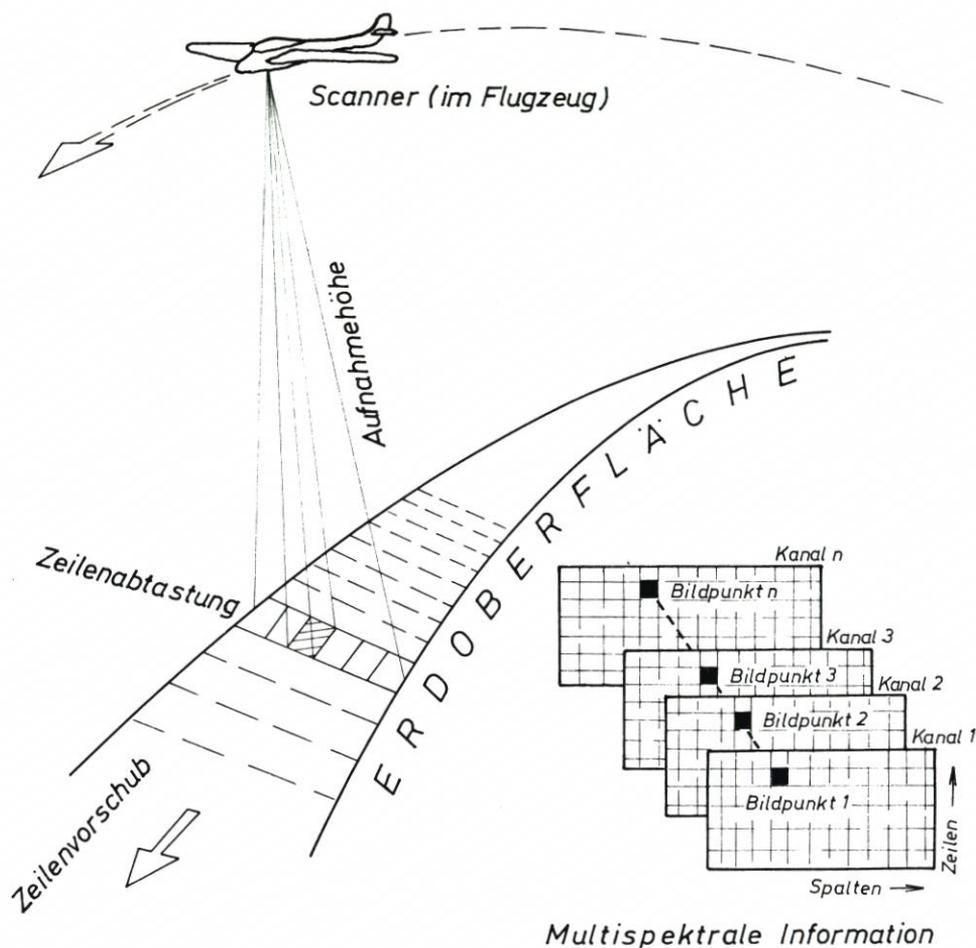


Abb. 4. Prinzip der Scanner-Aufnahme

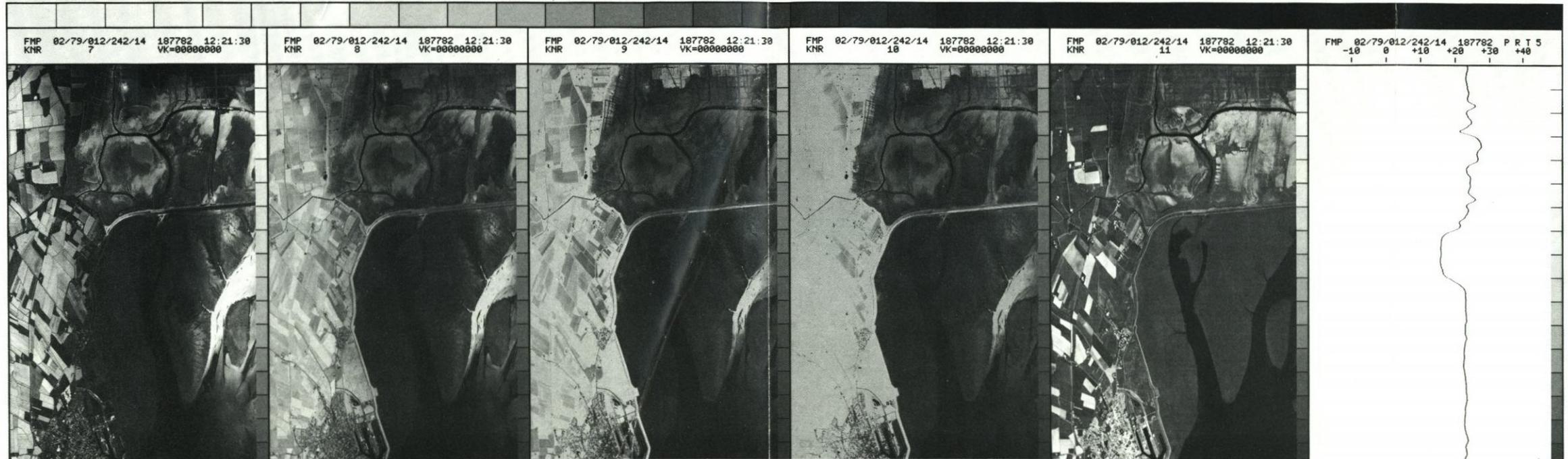
wesentlich ergänzt. Durch die bildlichen Momentaufnahmen wurden möglich:

- synoptische Beobachtung großer Areale zum Erkennen überregionaler Zusammenhänge,
- wiederholte periodische Aufnahme gleicher Gebiete zur Erfassung von Veränderungen.

Die optische Aussagekraft der so zunächst gewonnenen schwarz-weißen Senkrechtfotos wurde mit Einführung der Farb- und Infrarotfarbfotografie wesentlich verbessert.

Durch ständige Verbesserungen der Filmemulsionen, Objektive, Aufnahmeplattformen (Meßgeräteträger) und Auswertegeräte, hier insbesondere der Computertechnik, wurde es möglich, Methoden zu entwickeln, mit denen die außerordentlich große Menge an Informationen, die bei Berücksichtigung feinsten, mit dem Auge nicht mehr unterscheidbarer Helligkeitsnuancen in einem Bild enthalten sind, ausgewertet werden kann.

FMP DA 30.08.79 DFVLR-GSOC/BKA 22.05.80 TG 01 FS 0001 FN 01 SA=187782 TA=12:21:30 SE=189495 TE=12:23:32 V=250 H=7171 K= 78 AZ= 0.0 EL= 0.0
 MASSSTAB 1 : 76800 FREIGEgeben DURCH REGIERUNG VON OBERBAYERN NR. GS 300/8330 KOMMENTAR: MELDORFER 7



FMP DA 30.08.79 DFVLR-GSOC/BKA 22.05.80 TG 01 FS 0001 FN 01 SA=187782 TA=12:21:30 SE=189495 TE=12:23:32 V=250 H=7171 K= 78 AZ= 0.0 EL= 0.0
 MASSSTAB 1 : 76800 FREIGEgeben DURCH REGIERUNG VON OBERBAYERN NR. GS 300/8330 KOMMENTAR: MELDORFER 7

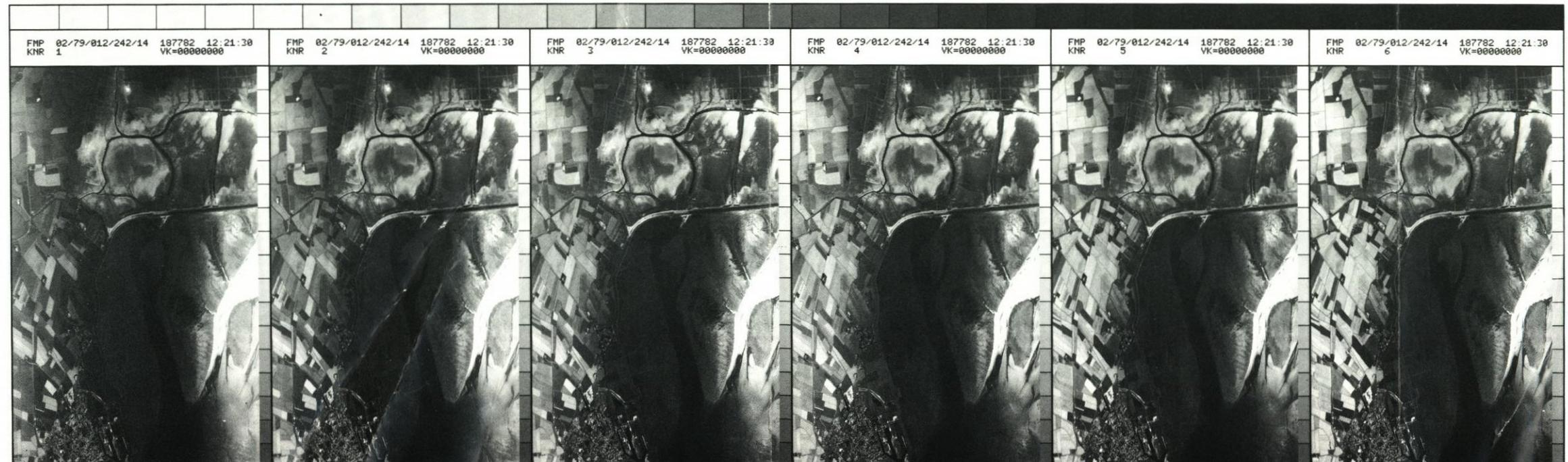


Abb. 5. Bildausgabe der Scanner- und Radiometerdaten, Beispiel Dithmarscher Bucht Nord

2.3.1 Aufbereitung der Daten

Die Einzelinformationen werden als Fotos aufgenommen und danach digitalisiert oder bereits bei der Aufnahme computergerecht aufbereitet. Bei allen optisch erzeugten Bildvorlagen erfolgt die Digitalisierung durch Aufsicht-Abtaster (Papierbilder) und Durchlicht-Abtaster (Dias), wobei die einzelnen Bildpunkte zeilenweise abgetastet, die Helligkeiten von einer Fotozelle gemessen, Zahlenwerten zugeordnet und in eine im Rechner weiterverarbeitbare Zahlenmatrix umgesetzt und gespeichert werden.

Zur Digitalisierung der Informationen schon bei der Aufzeichnung werden in Satelliten und Flugzeugen Multispektral-Scanner eingesetzt. Dabei werden die durch ein rotierendes Spiegelsystem von jedem Bildpunkt der Erdoberfläche empfangenen Strahlungsintensitäten, die den unterschiedlichen Helligkeiten und Farbtönen im sichtbaren Bereich sowie dem Thermoeffekt im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums entsprechen, auf lichtempfindlichen Zellen erfaßt, in elektrische Signale umgesetzt und quantifiziert. Nach Bestimmung und Zuordnung der mittleren Grauwerte innerhalb der Gesamtskala entsteht auch hier die Zahlenmatrix zur Weiterverarbeitung in Rechnern mit Hilfe spezieller Programme.

Die an der Schlickforschung beteiligte DFVLR bereitete das erflogene Datenmaterial fast ausschließlich im eigenen Hause auf. Schwarzweiß-Filme und Farbfilme wurden entwickelt, kopiert und als Vorlage für Vergrößerungen hergestellt, wobei Farbfilme nach dem Cibachrome-Prozeß bearbeitet wurden. Auf Magnetband aufgezeichnete Daten wurden in drei Schritten aufbereitet:

1. Kontrolle der Datenqualität durch Rückspielung der Analogdaten des Scanners auf Film (Quicklook).
2. Umsetzung auf Rechnerband mit 9 Spuren und 1600 Byte pro Inch. Dieses „Computer Compatible Tape“ (CCT) enthält alle Scanner- und Radiometerdaten sowie die Zusatzinformationen.
3. Bildaufbereitung und Bildausgabe, wobei vom Rechnerband über einen Fotoscanner ein Bild der Scanner- und Radiometerdaten erzeugt wird (Abb. 5).

Rechenbänder, Bildausgaben und Flugprotokolle werden an die Experimentatoren zur Weiterverarbeitung gegeben. Zur fotografischen Bildaufbereitung gehört auch die Umbildung der projektiven Verzerrung auf dem Luftbild in das einer Karte geometrisch ähnliche Bild. Die Korrektur dieser Panorama-Verzerrung kann z. B. auf mathematischem Wege erfolgen (Methode der strengen Abbildungsgleichungen) oder durch Vergleich mit einem Referenzbild (z. B. topografische Karte) mit Hilfe von Paßpunkten (BÄHR et al., 1981).

2.3.2 Auswertung der Daten

Um die Vielfalt der mit den modernen Datenerfassungssystemen gewinnbaren Einzelinformationen im Sinne einer optimalen Bildinterpretation hinsichtlich des jeweiligen Erkundungszieles auch voll ausnutzen zu können, ist die Konfiguration der Hardware, und für dessen Betrieb insbesondere die Flexibilität des Software-Pakets, von entscheidender Bedeutung. Demzufolge erscheint die vollautomatische Bildauswertung, bei der alle Entscheidungen dem Rechner überlassen werden, weniger geeignet. Deshalb hat die DFVLR das „digitale interaktive Bildauswertungssystem“ DIBIAS entwickelt und auch im Fernerkundungstest für die Schlickforschung Watten angewendet. Hierbei ist wesentlich die Kopplung zwischen dem subjektiv, aber synoptisch erkennenden und interpretierenden Menschen und dem schnell und

objektiv, aber seriell arbeitenden Rechner. Der Nachteil des bei dieser schrittweisen Bearbeitung geringeren Datendurchsatzes wird durch eine höhere Qualität der erzielten Ergebnisse ausgeglichen. Einige wichtige Merkmale dieses experimentellen, forschungsorientierten Bildverarbeitungssystems sind folgende (HABERÄCKER, 1978):

Flexibilität: Möglichkeit des Anwenders, die Prozesse zu aktivieren, zu steuern und zu überwachen. System jederzeit auf einfache Weise erweiterbar. Simultanarbeit verschiedener Verarbeitungsprogramme möglich.

Einfache Handhabung: Nach nur kurzer Einarbeitungszeit auch vom EDV-unerfahrenen Fachwissenschaftler selbständig anwendbar. Alle Systemteile präsentieren sich im Klartext. Streng modulare Gliederung der Software. Ergebnisse nach jedem Verarbeitungsprozeß sofort auf Farbbildschirm beurteilbar.

Die **Hardware**-Konfiguration von DIBIAS besteht im Kern aus dem Prozessorrechner INTERDATA M 85 und neben der üblichen Peripherie aus den 15 in Abb. 6 wiedergegebenen Geräten, worin das Datensichtgerät dem Anwender als Bedienungskonsole zur Kommunikation mit dem System dient. Dabei sind folgende Kategorien von Anwender-Interaktionen möglich (HABERÄCKER, 1978):

- Aktivierung von einzelnen Bildverarbeitungsprogrammen
- Eingabe von modulspezifischen Parametern
- Kontrolle des DIBIAS-Systemstatus
- DIBIAS-Systemmeldungen an den Anwender

Das **Software**-System von DIBIAS besteht neben den Datenträgern (Bild, Film, Magnetband) aus den registrierenden Teilen (Drucker, Zeichner), den Kommunikationsteilen (Sichtgerät, TV-Farbschirm), den Ein- und Ausgabeeinheiten sowie den Verarbeitungsmodulen (Abb. 7). Um größeren Programmieraufwand, Zeit- und Speicherbedarf bei der Verarbeitung

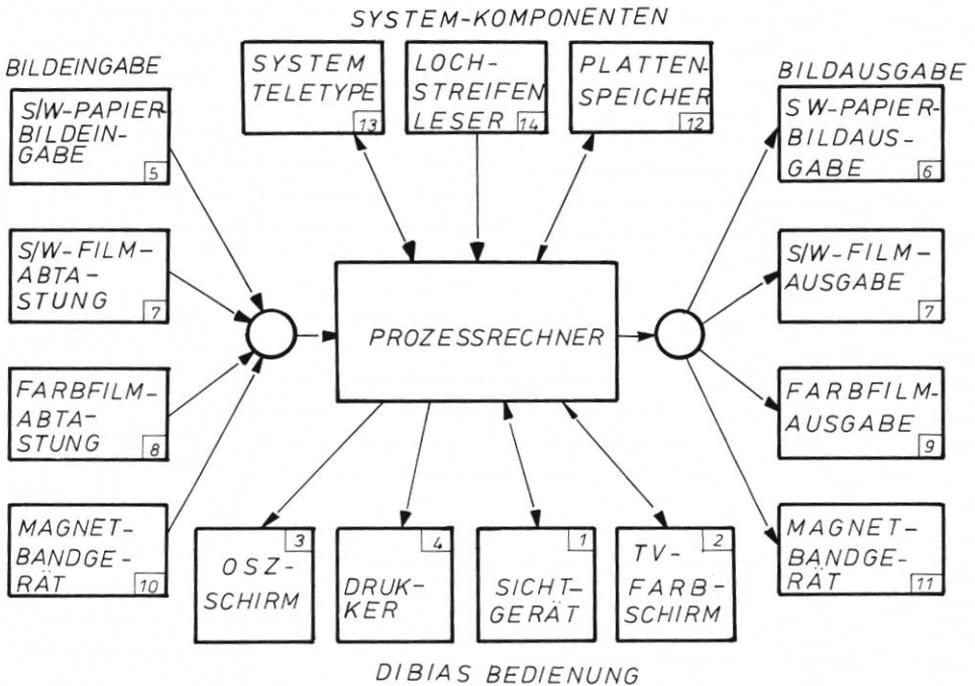


Abb. 6. Die DIBIAS-Hardware-Konfiguration

der Bildinformationen verschiedener Informationsträger und folglich unterschiedlicher Datenformate zu vermeiden, wurde ein einheitliches DIBIAS-internes Datenformat gewählt. Zur weitgehenden Ausschöpfung des gesamten Grauton-Spektrums wird jedes Bild mit den in der Regel aus 256 möglichen Graustufen pro Bildelement bestehenden Videodaten versehen und mit Zusatzinformationen, die das Bild genau identifizieren und die Entstehungsgeschichte (Bildgeschichte) dokumentieren sollen. Letztere enthält eine Protokollierung aller bisher erfolgten Verarbeitungsschritte. Die Verarbeitungsmoduln sind die eigentlichen Bildverarbeitungsprogramme. Bereits Anfang 1978 hatte DIBIAS etwa 150 verschiedene Programme.

2.3.3 Interpretation

Die Luftbildinterpretation ist in zwei Erkenntnisprozesse aufgliederbar:

1. Identifikation der Bildinhalte
2. Deduktion eines Schlüssels aus dem Erkundungsmaterial

Wichtiger Teil der Analyse, Synthese und Ergebnisdarstellung, z. B. in einer farbig-thematischen Karte, ist die digitale multispektrale *Klassifizierung*. Dabei werden als Endprodukte die im Original abgebildeten einzelnen Objektklassen (z. B. Vorland, Quellerzone, Schlickwatt, Sandwatt, Wasser) symbolisch und einheitlich durch Farbtöne dargestellt. Eine solche Klassifizierung wird dadurch ermöglicht, daß die Bildobjekte in den einzelnen Spektralbereichen unterschiedlich hell erscheinen.

Bei der Klassifizierung unterscheidet man grundsätzlich die „unüberwachte“ und die „überwachte“ Verfahrensgruppe. Letztere, der ersteren weit überlegen (BÄHR et al., 1981), arbeitet im wesentlichen nach folgendem Schema:

- Festlegen der unterscheidenden Klassen,
- Auswahl von Trainingsgebieten für jede Klasse,
- Berechnung statistischer Parameter, die als repräsentativ für die jeweilige Klasse gelten,
- Klassifizierung: Einsetzen der stat. Parameter in einen Entscheidungsmechanismus, der über die Zugehörigkeit jedes Merkmalvektors zu einer Klasse entscheidet oder ihn als unklassifizierbar zurückweist.

Im Bestreben, bei der digitalen multispektralen Klassifizierung eine hohe Genauigkeit zu erzielen, also den Anteil der in den einzelnen Klassen als richtig erkannten Bildelemente gegenüber den unklassifizierbaren möglichst hoch zu erreichen, werden die Grauwerte mehrerer Spektralkanäle gleichzeitig herangezogen, so daß der Merkmalsraum mehrdimensional wird. Als zusätzliche Hilfe werden verschiedene Filter verwendet. Zur Auswahl der geeigneten Spektralbereiche dient die Hauptkomponentenanalyse verschiedener Bildauschnitte. Das Festlegen der Klassen erfolgt in Abhängigkeit von der Fragestellung des Anwenders. Beispielsweise können Oberflächenstrukturen bzw. Watt-Typen im Küstenvorfeld interessieren wie

Sandwatt,
trockene Außensände,
dunkles (feuchtes) Sandwatt,
Schlickwatt,
Vorland,
Wasser.

Es kann der Bewuchs und das Oberflächensediment von Interesse sein, z. B.

Quellerzone,

Andelzone,
Diatomeensiedlungen,
Miesmuschelfelder,
Korngrößenverteilungen.

Oder es sollen thermische und hydrodynamische Parameter erkundet werden, wie z. B.
Wasseroberflächentemperaturverteilung,
Tideströmungsverhältnisse.

Diese genannten Klassen sind heute durch Fernerkundung bestimmbar. Die Auswahl der Trainings- und Kontrollgebiete mit Elementen möglichst nur einer Klasse spielt für die Klassifizierung eine zentrale Rolle, weil die den Entscheidungsalgorithmus bestimmenden statistischen Parameter aus Trainingsgebieten geschätzt werden. Da die Oberflächen z. B. der verschiedenen strukturierten und besiedelten Watten keine klar definierten Grenzen aufweisen, sondern fließend ineinander übergehen, und weil außerdem kaum genügend große, absolut homogene Flächen aufzufinden und Grenzen zwischen Mischformen (z. B. Schlickwatt, schlickiges Sandwatt) auch von der Definition her noch nicht eindeutig markiert sind, ist die Auswahl und sichere Abgrenzung von Trainingsgebieten für die einzelnen Klassen im Watt besonders schwierig. Unproblematisch in der Unterscheidung sind dagegen z. B. die zur Parameterschätzung genügend viele Bildelemente enthaltenden, wegen der deutlichen Unterschiedlichkeit der mittleren Grauwerte in den beiden Spektralbereichen leicht zu erkennenden und groß genug verfügbaren Klassen „trockenes Sandwatt“ und „Wasser“.

Zur Qualitätssteigerung der Klassifizierungsergebnisse dienen Einzelpunktvergleiche der transformierten und berechneten Werte mit den am Boden direkt gemessenen Parametern. Dazu werden Bodenkontrollmessungen zur Kalibrierung zeitparallel zu den Befliegungen durchgeführt. Außerdem wurden zeitstimmige thematische Karten herangezogen. Hierzu sind im Jahre 1974 an der Technischen Universität Hannover im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziell geförderten Sonderforschungsbereichs 149 „Vermessungs- und Fernerkundungsverfahren an Küsten und Meeren“ in den Teilprojekten S 1 „Auswertung von Fernerkundungsaufnahmen von Küstengewässern“ und S 2 „Auswertung von Fernerkundungsaufnahmen aus Wattgebieten“ (SFB 149, 1982) umfassende Untersuchungen begonnen worden. Als Testgebiete wurden die Watten im Jadebusen und in Nordfriesland gewählt. Die Fernerkundungsbefliegungen der Testfelder Cuxhaven und Büsum im Rahmen des Forschungsvorhabens Schlicksedimentation Watten sind durch Wattoberflächen-Sedimentproben-Entnahmen aus Trainingsgebieten zur Klassifizierung begleitet worden.

3. Ergebnis und Schlußfolgerung

Im Rahmen der vom BMFT von Ende 1977 bis 1981 geförderten ersten Stufe des Forschungsvorhabens „Schlicksedimentation Wattenmeer“ sind zusätzlich Befliegungen durchgeführt worden, um zu ergründen, ob die Fernerkundung hierbei als wesentliches Hilfsmittel dienen kann. Dazu wurden von den Testfeldern Büsum und Cuxhaven durch die DFVLR multispektrale Scanneraufnahmen aus 700 m, 1500 m bzw. 2000 m Höhe bei jeweils 60 % Überlappung in Flugrichtung gemacht (Abb. 1). Die Niedrigbefliegung in 700 m über Grund bei sämtlichen Streifen war aufgrund der Erkenntnisse aus den Arbeiten im Sonderforschungsbereich 149 in der Jade (BÄHR et al., 1981, und SFB 149, 1982) gewählt worden, wonach dabei eine besonders für Wattuntersuchungen wichtige hohe Detailerkennbarkeit erreicht wird. Als Sensoren wurden neben der Reihenmeßkammer von Zeiss und der Hasselblad-Kamera (siehe Abschn. 2.2) der Bendix-M²S-Scanner eingesetzt mit den 11 Kanälen

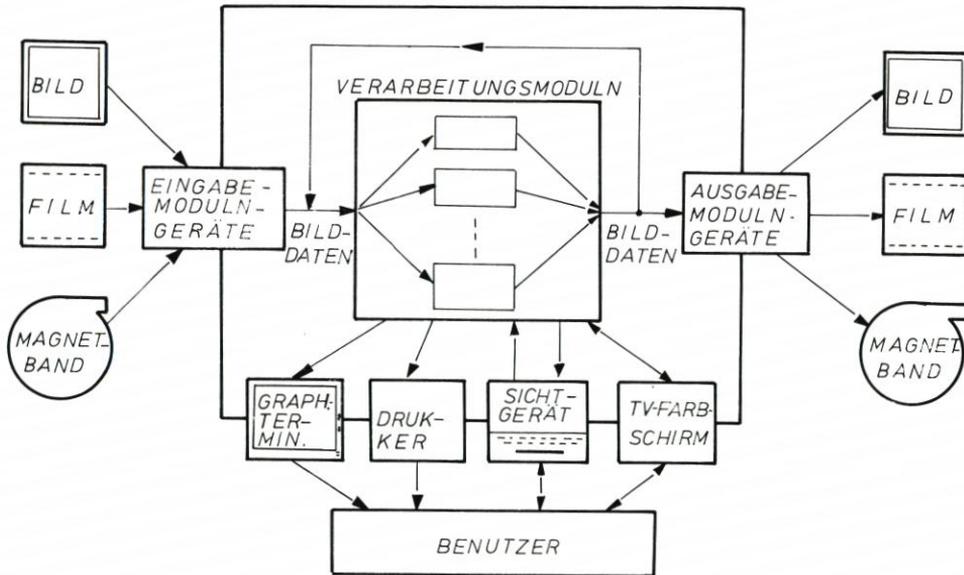


Abb. 7. Das DIBIAS-Software-System

K 1 = 0.380–0.440 μ	K 6 = 0.620– 0.660 μ
K 2 = 0.440–0.490 μ	K 7 = 0.660– 0.700 μ
K 3 = 0.495–0.535 μ	K 8 = 0.700– 0.740 μ
K 4 = 0.540–0.580 μ	K 9 = 0.760– 0.850 μ
K 5 = 0.580–0.620 μ	K 10 = 0.970– 1.060 μ
	K 11 = 9.000–11.000 μ (Thermal)

Das Testfeld Cuxhaven wurde am 7. 9. 1978 von 10.30 h bis 11.30 h (MEZ) bei einem Niedrigwasser-Scheiteleintritt um 10.30 h am Pegel Cuxhaven vom Flugplatz Nordholz aus bei dunstigem Wetter sowohl in 700 m als auch in 1500 m Höhe in drei Streifen von 10, 12 und 18 km Länge befliegen (Abb. 1). Die Befliegung des Testfeldes Büsum war wegen einer Nato-Manöversperrung im Sommer 1978 erst 1979 vom Flugplatz Westerland/Sylt aus möglich. Sie erfolgte am 30. August bei klarem Wetter von 10.55 h bis 15.05 h (MEZ) in vier Streifen aus 700 m und Streifen 5 und 7 auch aus 2000 m Höhe (Abb. 1). Der Scheitel des Tideniedrigwassers trat an dem Tag am Pegel Büsum um 10.44 h mit 324 cm PN ein, die Hochwasserscheitel um 4.39 h mit 649 cm PN und um 16.04 h (MEZ) mit 648 cm PN, insgesamt mit maximal nur 4 cm Abweichung fast genau im zehnjährigen mittleren Tidegang liegend.

Von den Befliegungen sind aus dem Testfeld Cuxhaven 8 Blatt Positiv-Papierbilder und die Magnetbänder der vom Scanner aufgezeichneten Daten ausgeliefert worden. Aus dem Testfeld Büsum wurde an Datenmaterial 70-mm-Dias, einige Cibachrome-Farbvergrößerungen von daraus ausgewählten Dias, Fliegeraufnahmen 23 \times 23 cm vom Kodak-2448-Farbumkehrfilm und 70-mm-Falschfarben-JR-Film Kodak 2443 JR-FC zur Verfügung gestellt (Abb. 8). Die Auswahl und Auswertung bestimmter Scannerszenen wurden in der DFVLR in Oberpfaffenhofen gemeinsam von den Mitarbeitern im Schlickforschungsprojekt, den Herren R. STÄTTER (DFVLR), R. GAST (Univ. Kiel) und B. FLADUNG (ALW Heide, Dezernat Gewässerkunde Büsum), vorgenommen.

Als Ergebnis kann zusammengefaßt gesagt werden, daß es durch die Fernerkundung mit Hilfe der heute verfügbaren leistungsstarken Geräteträger, Sensoren und speziellen Datenverarbeitungssysteme möglich geworden ist, neben den relativ gröberen Oberflächenstrukturen auch bereits sehr feine Bildelemente zweiter Dimension, wie z. B. Zusammensetzung und thermischer Zustand der Erdoberfläche, zu erfassen. So können im einzelnen mit Hilfe genügender spezifischer Paßpunkte und zeitgleicher In-situ-Messungen bei sorgfältiger Auswahl von Trainingsgebieten und Klassifizierung u. a. folgende, für Fragen der Schlickforschung relevante thematische Karten gewonnen werden:

Bewuchskarten (z. B. *Zostera*, *Salicornia*, *Spartina*, *Puccinellia*, *Festuca*, *Diatomeen*, Muschelfelder)

Wattypenkarten (Sandwatt, Mischwatt, Schlickwatt)

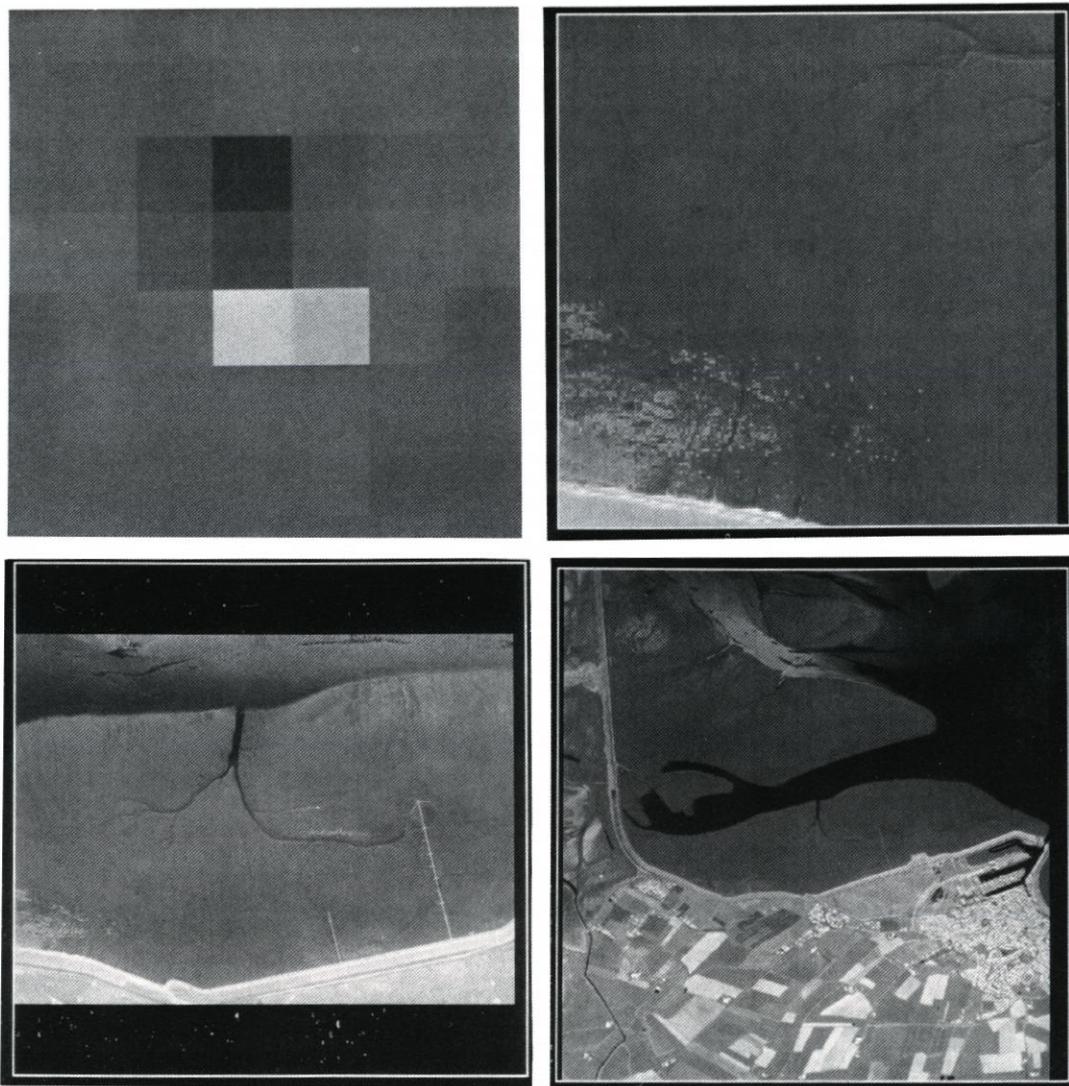


Abb. 8. Falschfarben-Bildausgaben vom Testfeld Buisson

Sedimentklassenkarten (Einteilung der Wattoberfläche nach prozentua-
lem Feinkornanteil bis 0.063 mm Ø), z. B. nach SFB 149, 1982:

Kl. 1 = 0 % bis 5 % Feinanteil

Kl. 2 = 5 % bis 10 % Feinanteil

Kl. 3 = 10 % bis 25 % Feinanteil

Kl. 4 = 25 % bis 50 % Feinanteil

Isothermalkarten: Oberflächentemperaturverteilung des Meerwassers
durch Bildfarbstufungen bis auf $1/10$ °C (BECKER, 1978; SCHNEIDER, 1979, u. SFB
149, 1982)

Strömungslinienkarten: Erfassung und Darstellung von Tidestromrich-
tungen und -geschwindigkeiten auf der Grundlage der Sedimentaufwirbelung ver-
schieden stark konzentrierter Wasserkörper, die im Kanal 5 des Multispektralscan-
ners besonders hohe Kontraste bilden (SFB 149, 1982)

Watthöhenkarten mit Hilfe des Wasserlinienverfahrens (WEGENER, 1979, u.
WIELAND, 1982)

Es zeigt sich also, daß die Fernerkundung in der „Schlickforschung Watten“, für die das auch
künftig unersetzbare menschliche Informationssystem, vor allem der Gesichtssinn, ein
wesentliches Hilfsmittel darstellt und im Hinblick auf die besonders für ineinandergreifende,
großräumige Vorgänge unerläßliche synoptische und kurzperiodische Datenerfassung unent-
behrlich ist, nicht zuletzt wegen der personell und gerätemäßig dazu unverhältnismäßig
aufwendigen Feldmessungen. Noch verlangt dieses Verfahren einen hohen apparativen Auf-
wand und umfangreiche Aufbereitungsverfahren. Die dynamische Entwicklung im letzten
Jahrzehnt ist jedoch noch nicht abgeschlossen. Zunehmend bessere und mehr Möglichkeiten
der Fernerkundung bestehen durch die ständige Weiterentwicklung der elektronischen Daten-
verarbeitung sowie durch spezielle Objektive, Aufnahmeplattformen, Sensoren und Film-
emulsionen auch für den nicht sichtbaren Infrarot- und Mikrowellenbereich.

4. Schriftenverzeichnis

- BÄHR, H.-P.; DENNERT-MÖLLER, E.; EHLERS, M.; KOLOUCH, D. u. LOHMANN, P.: Digitale
Verarbeitung von Fernerkundungsaufnahmen. Zeitschrift für Vermessungswesen, H. 3/
1981.
- BECKER, G.: Infrarot-Scanner-Aufnahme der Wassertemperatur um Helgoland. Deutsche Hydro-
graphische Zeitschrift, H. 3/1978.
- FIGGE, K.; KÖSTER, R.; THIEL, H. u. WIELAND, P.: Schlickuntersuchungen im Wattenmeer der
Deutschen Bucht – Zwischenbericht über ein Forschungsprojekt des KFKI. Die Küste,
H. 35/1980.
- HABERÄCKER, P.: Untersuchungen zur Klassifizierung multispektraler Bilddaten aus der Fern-
erkundung. Dissertation, TU Berlin, 1978.
- HABERÄCKER, P.: Digitale Bildverarbeitung. Die neue Dimension der Photographie. Bild der
Wissenschaft, H. 10/1978.
- SCHNEIDER, S.: Die Interpretation von Fernerkundungsdaten zur Beurteilung der Umweltsitua-
tion und Umweltbelastung. Handbuch für Planung, Gestaltung und Schutz der Umwelt,
Bd. 3, von Buchwald/Engelhardt (Hrsg.). BLV Verlagsgesellschaft München – Wien –
Zürich, 1980.
- SCHNEIDER, S. (in Zusammenarbeit mit KROESCH, V.; RÜPKE, N.; SERWATZKY, G. und WÖLPERT,
D.): Gewässerüberwachung durch Fernerkundung. Digitale Aufbereitung und Auswer-
tung von Thermalaufnahmen der Unterelbe und des Oberrheins. Schriftenfolge der
Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, H. 14, 1979.

- SFB 149 (Vermessungs- und Fernerkundungsverfahren an Küsten und Meeren): Auswertung von Fernerkundungsaufnahmen von Küstengewässern und aus Wattgebieten. Jahresberichte über die Teilprojekte S₁ und S₂ in den Jahren 1977 bis 1981. Wissenschaftl. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, Nr. 81/1979, 87/1979, 96/1980, 103/1981, 109/1982.
- STÄTTER, R.: Möglichkeiten der optischen Erderkundung in der DFVLR. Unveröffentl. Bericht „Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e. V.“, Oberpfaffenhofen, März 1982.
- WEGENER, B.: Rechnergestützte Erfassung und Beschickung von Wasserlinien im Verfahren der Wattvermessung. Dissertation. Wissenschaftl. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, H. 91, 1979.
- WIELAND, P.: Umfang und Häufigkeit topografischer und fotografischer Erfassung des Wattenmeergebietes zwischen Hever- und Elbemündung von 1934 bis 1981. Büsumer Gewässerkundliche Berichte Nr. 45/1982 des ALW Heide. Büsum, 1982.