

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

Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde
Nr. 68

**Untersuchungen zur interpretationsgerechten
Aufbereitung von Multispektralfotografien**

von
Rainer Söllner

Bei der AdW der DDR am 30. 11. 1979 eingereichte, am 16. 9. 1980
öffentlich verteidigte, zur Erlangung des akademischen Grades Doktor
eines Wissenschaftszweiges (Dr. rer. nat.) genehmigte Dissertation

Herausgeber: Der Direktor des Zentralinstituts für Physik der Erde Potsdam

Als Manuskript gedruckt Potsdam 1982

| <u>Inhaltsverzeichnis:</u> | <u>Seite</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 1. Einleitung | 5 |
| 2. Aspekte der Bildwahrnehmung und der naturwissenschaftlichen Thematik für die interpretationsgerechte Aufbereitung von farbigen Abbildungen aus Multispektralfotografien | 9 |
| 2.1. Physikalische Aspekte der Bildwahrnehmung | 9 |
| 2.1.1. Abbildung der Umwelt bei bilderzeugenden Fernerkundungsverfahren ... | 9 |
| 2.1.2. Beschreibung der zweidimensionalen Bildfunktion von Schwarzweiß- bildern | 11 |
| 2.1.3. Grundzüge der Bildfunktion von Farbbildern und Multispektralauf- nahmen | 13 |
| 2.2. Physiologisch-optische Aspekte der Bildwahrnehmung | 15 |
| 2.2.1. Reizaufnahme und Reizverarbeitung im Auge | 15 |
| 2.2.2. Physiologie der Farbwahrnehmung | 18 |
| 2.2.2.1. Grundbegriffe der Farbvalenzmetrik | 18 |
| 2.2.2.2. Die trichromatischen Farbmaßzahlen | 19 |
| 2.2.2.3. Die geometrische Darstellung von Farben in der Farbvalenzmetrik | 21 |
| 2.2.2.4. Grundbegriffe der empfindungsgemäßen Farbmeterik | 23 |
| 2.2.3. Einfluß der Farbwahrnehmung auf die Bildinterpretation | 24 |
| 2.3. Psychologische Aspekte der Bildwahrnehmung | 25 |
| 2.4. Aspekte der naturwissenschaftlichen Thematik der Interpretation | 26 |
| 2.5. Ableitung einer Aufgabenstellung zur interpretationsgerechten Aufbe- reitung der Multispektralinformation | 27 |
| 3. Verfahren der digitalen und kombinierten digital-analogen Bildbe- arbeitung zur interpretationsgerechten Aufbereitung von MKF 6 - Multispektralfotografien | 30 |
| 3.1. Grundlagen der Bildbearbeitung | 30 |
| 3.1.1. Grundbegriffe der digitalen Bildbearbeitung | 31 |
| 3.1.2. Analog-optische Bildbearbeitung mit Multispektralprojektoren | 32 |
| 3.1.3. Kombinierte analog-optische Bildbearbeitung | 34 |
| 3.2. Aufbereitung von MKF 6 - Multispektralfotografien zur Verarbeitung auf numerischen Rechenanlagen | 35 |
| 3.3. Anwendung der Hauptachsentransformation zur Datenverdichtung bei MKF 6 - Multispektralaufnahmen | 36 |

| | <u>Seite</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 3.3.1. Mathematisch-physikalische Grundlagen der Hauptachsentransformation von multispektralen Abbildungen | 37 |
| 3.3.2. Technische Realisierung der Hauptachsentransformation für Multispektraldaten | 39 |
| 3.3.3. Beispiel zur Hauptachsentransformation von MKF 6 - Multispektralaufnahmen | 40 |
| 3.4. Interpretationsgerechte Aufbereitung von farbigen Abbildungen aus Multispektralaufnahmen durch lineare Grauwerttransformation im zweidimensionalen Merkmalsraum | 43 |
| 3.4.1. Mathematisch-physikalische Grundlagen des Verfahrens | 43 |
| 3.4.2. Technische Realisierung | 45 |
| 3.5. Interpretationsgerechte Aufbereitung von farbigen Abbildungen aus MKF 6 - Multispektralaufnahmen unter Berücksichtigung der empfindungsgemäßen Farbmetrik | 46 |
| 3.5.1. Mathematisch-physikalische Grundlagen des Verfahrens | 46 |
| 3.5.1.1. Unabhängige Optimierung der Grauwertdifferenzierung in drei Komponenten mit anschließender Farbmischung im Multispektralprojektor | 46 |
| 3.5.1.2. Optimierung der Farbdifferenzierung durch Egalisierung des zweidimensionalen Histogramms der Farbwertanteile | 49 |
| 3.5.2. Programmtechnische Realisierung des Verfahrens | 51 |
| 3.5.3. Vergleich mit einem bekannten ähnlichen Verfahren | 53 |
| 3.6. Interpretationsgerechte Aufbereitung von farbigen Abbildungen aus Multispektralaufnahmen durch unüberwachte Klassifizierung nach repräsentativen Objektklassen | 54 |
| 3.6.1. Mathematisch-physikalische Grundlagen des Verfahrens | 54 |
| 3.6.2. Programmtechnische Realisierung des Verfahrens | 56 |
| 4. Untersuchungen zur Applikation der beschriebenen digital-analogen Verfahren für die interpretationsgerechte Aufbereitung von Multispektralfotografien | 57 |
| 4.1. Interpretationsgerechte Aufbereitung von Multispektralfotografien mit inhomogener Bildfunktion | 57 |
| 4.1.1. Farbcodierung der Hauptkomponenten im Multispektralprojektor . | 59 |
| 4.1.2. Farbcodierung der linear transformierten Hauptkomponenten | 60 |

| | <u>Seite</u> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 4.1.3. Farboptimierung durch Egalisierung des Histogramms der Farb- wertanteile | 63 |
| 4.1.4. Aufbereitung von Teilaspekten der Bildfunktion durch unüber- wachte Klassifizierung | 65 |
| 4.2. Interpretationsgerechte Aufbereitung von Multispektralfoto- grafien mit relativ homogener Bildfunktion | 69 |
| 4.3. Prinzipielle Schlußfolgerungen zur Anwendung der beschriebenen Verfahren zur interpretationsgerechten Aufbereitung von Multi- spektralfotografien | 71 |
| 5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen | 74 |
| 6. Literaturverzeichnis | 79 |
| 7. Verzeichnis der Beilagen | |

1. Einleitung

Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit ist das im Jahre 1976 im Rahmen der Interkosmoskooperation durchgeführte wissenschaftliche Großexperiment "RADUGA" zur Fernerkundung der Erde mit Hilfe der Multispektralfotografie. Die Arbeit widerspiegelt Ergebnisse von wissenschaftlichen Untersuchungen zur interpretationsgerechten Aufbereitung von Multispektralfotografien, die am Methodisch-diagnostischen Zentrum für Fernerkundung des Zentralinstituts für Physik der Erde der Akademie der Wissenschaften der DDR bei der Auswertung und Weiterführung des Experiments "RADUGA" gewonnen wurden. Die Möglichkeiten der analog-optischen Bildverarbeitung zur interpretationsgerechten Aufbereitung von Multispektralfotografien wurden dabei bereits im Zusammenhang mit der Auswertung des Experiments "RADUGA" untersucht und in [38] ausführlich beschrieben. Den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bilden deshalb Untersuchungen von digitalen und kombinierten digital-analog-optischen Verfahren zur interpretationsgerechten Bildaufbereitung.

In den letzten Jahren haben Aufgaben zur Erkundung unserer Erde, zum Studium ihrer natürlichen Ressourcen und zur Kontrolle und Überwachung der Umwelt immer größere Bedeutung erlangt [32, 56, 63, 68, 69, 71, 77, 79]. Dabei sind vor allem zwei Aufgabenrichtungen zu erkennen, die die Gewinnung von geometrisch-kartographischen Informationen und von stofflichen Aussagen über die untersuchten Objekte zum Inhalt haben [62]. Während das Problem der geometrischen Untersuchung von Bodenobjekten aus Fernerkundungsdaten bereits zu einem Stand der routinemäßigen Auswertungen geführt hat, werden bisher stoffliche Aussagen nur an vereinzelt Beispielen abgeleitet, wobei die stoffliche Interpretation des Datenmaterials gegenwärtig noch darin besteht, die ermittelten Daten mit aus Bodenmessungen bekannten terrestrischen Informationen zu korrelieren. Ziel der Fernerkundung ist es, diese stofflichen Aussagen unmittelbar aus den ermittelten Daten abzuleiten. In der gegenwärtigen Etappe zur Realisierung dieses Ziels spielt die visuelle Bildverbesserung eine besondere Rolle, um die im Datenmaterial enthaltenen Informationen für die Interpretation auf der Grundlage von terrestrischen Messungen optimal aufzubereiten. Der internationale Stand ist aber so einzuschätzen, daß moderne Verfahren der Fernmeßtechnik entwickelt wurden, mit denen von Flugzeugen und Satelliten aus Informationen über Vorgänge und Erscheinungen auf der Erde und speziell ihrer Oberfläche gewonnen werden, daß aber demgegenüber die Verfahren der Datenauswertung in ihrer Entwicklung zurückgeblieben sind und noch keine maximale Nutzung des gewonnenen Datenmaterials ermöglichen [1, 3, 5]. Als Gerätesysteme zur Datengewinnung werden Fernsehkameras bzw. fotografische Kameras und spezielle Abtastsysteme (Scanner) verwendet. Mit Kamerasystemen kann die Erdoberfläche im sichtbaren Licht sowie im unmittelbar angrenzenden infraroten Spektralbereich und mit Scannern auch in weiteren Spektralbereichen u. a. im thermischen Infrarot und im Bereich der Mikrowellen aufgenommen werden. Bei allen Aufnahmesystemen wird die von den Objekten ausgehende elektromagnetische Strahlung registriert, wobei Scannersysteme eine direkte Strahlungsmessung und Kamerasysteme die Registrierung des Logarithmus der Strahlung als photographische Schwärzung ermöglichen.

Mit passiven Fernerkundungssystemen kann die von den Objekten remittierte Sonnenstrahlung, die Fluoreszenzstrahlung oder die Eigenstrahlung der Erdoberfläche erfaßt werden, bei aktiven Systemen wird elektromagnetische Strahlung von aerokosmischen Plattformen aus auf die Erdoberfläche gerichtet und ihr reflektierter Anteil gemessen. Die Intensität der von den Objekten reflektierten Strahlung ist wellenlängenabhängig, so daß in den verschiedenen Wellenlängenbereichen unterschiedliche Objekteigenschaften widerspiegelt werden. Insofern hat die Fernerkundung mit multispektralen Sensorsystemen besondere Bedeutung [23, 33, 34, 37].

Zur Fernerkundung von konkreten Objekten und Erscheinungen der Erdoberfläche lassen sich also im Prinzip immer optimale Aufnahmeverfahren auswählen, so daß bereits durch das Aufnahmesystem die Qualität und Quantität der gewinnbaren Informationen über unsere Umwelt bestimmt werden. Inwieweit diese Information vom Menschen erfaßt werden kann, hängt einerseits von der Qualifikation des Bildinterpreten und andererseits von den ihm zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln zur Aufbereitung und Auswertung dieser Informationen ab [27, 29, 35, 38, 40, 67].

Die mit Fernerkundungsverfahren registrierten Informationen entsprechen im allgemeinen einem zweidimensionalen Abbild von dreidimensionalen Objekten und Erscheinungen der Erdoberfläche. In welcher Form diese Informationen gespeichert sind, ob als unmittelbares analoges Bild oder als digitale Zahlenwerte, ist vom Aufnahmesystem abhängig. Die Menge der abgespeicherten Daten ist dabei außerordentlich groß und kann mehrere 10^7 bit pro Bild betragen.

Die optimale Abfrage dieser riesigen Datenmenge erfordert ein sehr kompliziertes System der Entscheidungsfindung. Das effektivste aller bisher bekannten Systeme zur Lösung dieser komplizierten Aufgabe stellt der Komplex Auge-Gehirn eines auf bestimmte Fragestellungen trainierten Bildinterpreten dar.

In diesem Zusammenhang erhält die visuelle Bildverbesserung bzw. die interpretationsgerechte Aufbereitung des Datenmaterials besondere Wichtigkeit. Von entscheidender Bedeutung für die Objektivität, Qualität und Quantität des Interpretationsertrages ist dabei die Aufbereitung der Originaldaten zu einer Abbildungsform, die für das angestrebte Interpretationsziel dem menschlichen Wahrnehmungsvermögen optimal angepaßt ist. Für die Ausarbeitung des dazu erforderlichen mathematisch-physikalischen Formalismus spielen die naturwissenschaftliche Thematik der Interpretation und die physiologischen und psychologischen Eigenschaften der Wahrnehmungskette des Komplexes Auge-Gehirn bei der Bildinterpretation eine bedeutende Rolle. Am Ausgang des Gesamtprozesses der Bildauswertung stehen dabei immer die physikalischen Originalmeßdaten (z. B. in Form von Multispektralfotografien), danach erfolgt die Bildaufbereitung und letztlich die visuelle Betrachtung bzw. Interpretation. Ein wesentliches Kriterium zur Optimierung der Abbildungsform ist die Bildqualität, die durch die prinzipiell meßbaren Eigenschaften: Bildschärfe (Detailerkennbarkeit), Grauwert- bzw. Farbdifferenzierung und bei Stereobildpaaren durch die Güte der Parallaxe beeinflusst wird. Auf Grund spezieller Eigenschaften des Komplexes Auge-Gehirn bei der Wahrnehmung von Farbbildern spielt zur interpretationsgerechten Aufbereitung die farbige bildmäßige Darstellung der Fernerkundungsdaten eine wichtige Rolle, wobei die interpretationsgerechte Darstellung von Multispektraldaten in Form von Farbbildern von besonderer Bedeutung ist [30, 33, 34].

Im allgemeinen lassen sich die mit Fernerkundungsaufnahmesystemen gewonnenen Primärdaten als zweidimensionale analoge bzw. digitale Bildfunktion beschreiben. Bei Multispektralaufnahmen ist diese Bildfunktion mehrparametrig. Die determinierte Änderung der Bildfunktion zum Zwecke einer objektiven und optimalen Auswertung der gespeicherten Informationen ist Aufgabe und Inhalt der Bildbearbeitung [7, 11, 47, 75]. Hierbei unterscheidet man nach drei Hauptkomplexen [6]:

- Bildrestaurierung
- visuelle Bildverbesserung und
- automatische Bildauswertung [8, 30, 70, 72, 73, 74, 78].

Aufgabe der Bildrestaurierung ist es, systematische Fehler des Aufnahmesystems, die die primäre Bildfunktion verfälschen, zu eliminieren. Die Bildrestaurierung stellt insofern eine Bildvorverarbeitung für die anschließende Bildauswertung dar. Automatische Verfahren der Bildauswertung finden überall dort Anwendung, wo es gelingt, den Interpretationsvorgang einschließlich der Darstellungsform des gewünschten Interpretationsergebnisses vollständig zu formalisieren. Bei der Geofernerkundung ist die Formalisierung bisher nur bei wenigen, sehr speziellen Anwendungsbeispielen möglich geworden, weil bei der Interpretation von Fernerkundungsaufnahmen der schöpferische Vorgang der Analyse und Beschreibung des Bildinhaltes überwiegt. Insofern erhält die interpretationsgerechte Aufbereitung von Fernerkundungsdaten als thematisch orientierte qualitative Bildverbesserung für die visuelle Interpretation besondere Bedeutung. Eines der modernsten, den Weltmaßstab mitbestimmenden Verfahren zur Fernerkundung der Erdoberfläche ist die Gewinnung von Multispektraldaten mit Hilfe der Kamera MKF-6 [65]. Mit dieser Multispektralkamera werden primäre Multispektraldaten in Form von sechs analogen Schwarzweißbildern erhalten. Die Optimierung der Auswertung dieses Datenmaterials ist von grundlegender Bedeutung für die Erschließung des hochkomprimierten Informationsgehaltes einer solchen Aufnahme und zeichnet letztlich verantwortlich für die effektive Nutzung dieser Multispektraltechnik zur Erkundung unserer Naturressourcen. Routinemäßig erfolgt die Auswertung des mit der MKF-6 gewonnenen Datenmaterials durch visuelle Interpretation der einzelnen vergrößerten Schwarzweißbilder eines multispektralen Aufnahmesatzes oder durch visuelle Interpretation von sogenannten Farbsynthesen, die mit Hilfe des Multispektralprojektors MSP-4 aus drei dieser Schwarzweißbilder synthetisiert werden können [38, 61, 80]. Wegen der hohen geometrischen und radiometrischen Präzision der Aufnahme ist eine Bildrestaurierung im allgemeinen nicht erforderlich. Im Multispektralprojektor wird die Bildaufbereitung durch analoge Rechenoperationen realisiert. Durch Auswahl von drei Spektralkanälen entsprechend der Interpretationsthematik und durch Optimierung ihrer Farbcodierung sind dabei einfache Farbsynthesen herstellbar, bei denen die Erkennbarkeit bestimmter Objekte im Bild verbessert ist. Bezüglich der Flexibilität der Bildoperationen zur determinierten Änderung der primären Bildfunktion für spezielle thematische Interpretationsaufgaben sind gegenüber dieser analogen Verarbeitungstechnik bei der digitalen Datenaufbereitung nahezu keinerlei Grenzen gesetzt. In diesem Zusammenhang stellt ein Hybrid-System zur digitalen Datenvorverarbeitung und zur analog-optischen Farbbilddarstellung eine optimale Variante dar, um die Anwendung von beliebigen Operatoren auf die primäre mehrparametrig Bildfunktion zu ermöglichen und

mit hoher geometrischer und radiometrischer Präzision die sekundäre dreiparametrische Bildfunktion darzustellen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, für ein relativ einfaches off-line Hybrid-System, bestehend aus dem Multispektralprojektor MSP-4 und einer digitalen Bildverarbeitungsanlage mit einem Minicomputer, zwei peripheren Magnetbandeinheiten, einem Floppy-Disk und einem Bildscanner Algorithmen zur interpretationsgerechten Aufbereitung von mit der Multispektralkamera MKF-6 gewonnenen Multispektralfotografien zu entwickeln und hinsichtlich ihrer Eignung an ausgewählten thematischen Interpretationsaufgaben zu untersuchen. Ausgehend von den Wahrnehmungseigenschaften des Komplexes Auge-Gehirn wird gezeigt, daß die mit der MKF-6 gewonnenen Daten so in farbigen zweidimensionalen Abbildungen dargestellt werden können, daß sie entsprechend dem Interpretationsziel dem menschlichen Wahrnehmungsvermögen angepaßt sind. Die Güte solcher Farbbilder für die visuelle Interpretation wird im wesentlichen bestimmt durch die Farbdifferenzierung bzw. durch den mittleren Farbabstand von benachbarten repräsentativen Objekten des durch die Interpretationsthematik bestimmten Bildinhaltes. Durch Optimierung der Farbdifferenzierung bzw. der Farbentropie eines Bildes wird einerseits die Spezifik des Komplexes Auge-Gehirn bei der Farbwahrnehmung berücksichtigt und andererseits eine thematische Informationsauslese erreicht. Beispielsweise wird dadurch die räumliche Gliederung eines Bildes unterdrückt, während die flächenhafte Gliederung als Träger der Multispektralinformation hervorgehoben wird, was insbesondere für die thematische stoffliche Bildauswertung von Bedeutung ist. Insofern ist es durch Optimierung der Farbdifferenzierung möglich, insbesondere die in Multispektralaufnahmen enthaltenen Informationen über die spektrale Gliederung einer Scene der Erdoberfläche interpretationsgerecht darzustellen. Zur Lösung dieser Problematik werden am Beispiel von MKF-6-Multispektralfotografien entsprechende mathematisch-physikalische Formalismen zur Bildverarbeitung für das o. g. Gerätesystem entwickelt bzw. aus der Literatur bekannte Verfahren auf die vorhandene Technik übertragen. Dazu werden nach der Bilddigitalisierung aus der primären Bildfunktion zunächst geeignete Interdarstellungen der MKF-6-Multispektralfotografien berechnet. Aus diesen Interdarstellungen werden automatisch bzw. manuell Operatoren und Parameter für anschließende lineare und nichtlineare homogene Bildtransformationen abgeleitet. Bei der Ausführung der digitalen Bildtransformation wird der optische Prozeß der anschließenden analogen Endverarbeitung im Multispektralprojektor MSP-4 berücksichtigt, so daß eine für die analoge Farbmischung optimale sekundäre digitale zwei- bzw. dreiparametrische Bildfunktion entsteht. Nach Ausgabe der Bildfunktion mit einem Bildschreiber können die entstehenden zwei bis drei Schwarzweißbilder im Multispektralprojektor mit Farben codiert und zu einem Farbbild weiterverarbeitet werden. Zur Realisierung der erforderlichen digitalen Bildtransformation mit dem zum Hybridsystem gehörenden Minicomputer bei möglichst optimaler Ausnutzung der radiometrischen Auflösung von MKF-6-Multispektralaufnahmen ist es notwendig, eine geringdimensionale Interdarstellung der 6-parametrischen Bildfunktion zu wählen. Das kann im allgemeinen durch Auswahl von Spektralbereichen entsprechend dem thematischen Interpretationsziel erreicht werden. Um bei speziellen thematischen Interpretationsaufgaben nahezu den gesamten Informationsgehalt einer sechskanaligen Multispektralfotografie bei der Bildverarbeitung zu erfassen,

wird in Analogie zu den in der angelsächsischen Literatur erwähnten Verfahren [14, 21, 59] zur Datenkompression von Bildern der Fernerkundungssatelliten ERTS ein Programm zur Hauptkomponententransformation für MKF-6-Multispektralfotografien entwickelt. Dadurch ist es möglich, 60 bis 90 % der Information einer Multispektralaufnahme auf zwei Hauptkomponenten zu verdichten und daraus eine geeignete zweidimensionale Interndarstellung abzuleiten. Die entwickelten Verfahren werden in verschiedenen Kombinationen zur Untersuchung ihrer Eignung für die thematische Interpretation auf ausgewählte Bildbeispiele angewandt. Als primäres Datenmaterial werden insbesondere MKF-6-Multispektralfotografien verwendet, die während des Experiments "RADUGA" aus dem Flugzeuggelaboratorium AN 30 und den Satelliten SOJUS 22 und SALUT 6 von ausgewählten Testpolygonen gewonnen wurden. Die Testung der Algorithmen ergibt eine Einteilung hinsichtlich ihrer optimalen Eignung für unterschiedliche Typen der primären Bildfunktion und damit für unterschiedliche thematische Interpretationsaufgaben. Durch entsprechende Auswahl und kombinierte Anwendung der Algorithmen wird eine wesentliche Steigerung des Interpretationsertrages gegenüber der konventionellen Bildauswertung nachgewiesen.

2. Aspekte der Bildwahrnehmung und der naturwissenschaftlichen Thematik für die interpretationsgerechte Aufbereitung von farbigen Abbildungen aus Multispektralfotografien

Für die interpretationsgerechte Aufbereitung von Multispektraldaten spielen die naturwissenschaftliche Thematik der Interpretation und die physiologisch-psychologischen Eigenschaften der Wahrnehmungskette des Komplexes Auge-Gehirn eine entscheidende Rolle. Die Bildwahrnehmung ist ein komplizierter komplexer Prozeß, der in drei Teilprozesse zerlegt werden kann, die physikalischer, physiologisch-optischer und psychologischer Natur sind. Dieser Vorgang der Fotointerpretation im Komplex Auge-Gehirn ist noch relativ wenig erforscht; einzelne Arbeiten findet man in [2, 28, 48, 49, 50, 57]. Die Analyse der Teilprozesse dieses Vorganges und die Berücksichtigung der Interpretationsthematik sind von grundlegender Bedeutung für die Optimierung der Interpretation von Multispektralaufnahmen. Aus den physikalischen, physiologischen und psychologischen Aspekten der Wahrnehmungskette und der naturwissenschaftlichen Thematik der Interpretation lassen sich in diesem Zusammenhang Anforderungen für die interpretationsgerechte Aufbereitung der Multispektralinformation ableiten.

2.1. Physikalische Aspekte der Bildwahrnehmung

2.1.1. Abbildung der Umwelt bei bilderzeugenden Fernerkundungsverfahren

Die Gewinnung von Fernerkundungsaufnahmen entspricht der Messung physikalischer Größen, die die Objekte der Erdoberfläche charakterisieren. Allgemein kann eine meßbare physikalische Größe im mehrdimensionalen Raum durch eine Vektorfunktion $f(e)$, die von den Variablen $e^T = [x_1, x_2 \dots x_m]$ abhängig ist, beschrieben werden:

$$\mathcal{F}(\mathcal{U}) = \begin{bmatrix} F_1(x_1 \dots x_m) \\ F_2(x_1 \dots x_m) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ F_n(x_1 \dots x_m) \end{bmatrix}$$

Die Gesamtheit aller meßbaren physikalischen Größen der Umwelterscheinungen bilden die Vektorfunktion $\mathcal{U}(\mathcal{U})$, mit der rein formal alle Objekte und Erscheinungen der Umwelt in jedem Punkt des Raumes und für jeden Zeitpunkt beschrieben werden können. In Wirklichkeit aber ist kein Lebewesen und kein technisches System in der Lage, diese Vektorfunktion zu verarbeiten und damit alle Umwelterscheinungen zu erfassen. Alle Systeme zur Datenerfassung übertragen lediglich einen winzigen, für eine spezielle Aufgabe interessierenden Bruchteil $\mathcal{F}(\mathcal{U})$ der realen Umwelt $\mathcal{U}(\mathcal{U})$ in eine für die Weiterverarbeitung geeignete Form $\mathcal{A}(\mathcal{U})$. Entsprechend des jeweiligen Verwendungszweckes leisten sie dabei eine wesentliche Informationsreduktion und -vorverarbeitung. Sie transformieren die eine spezielle Umwelterscheinung beschreibende Vektorfunktion $\mathcal{F}(\mathcal{U})$ in eine für die Weiterverarbeitung geeignete Form. Bei der Fernerkundung der Erde handelt es sich dabei im allgemeinen um die Abbildung eines in seinen räumlichen Variablen dreidimensionalen Teilaspektes der realen Umwelt auf zweidimensionale lichtempfindliche Signalplatten. Ein solcher Teilaspekt kann z. B. die räumliche und spektrale Verteilung der von einem Gebiet der Erdoberfläche remittierten Sonnenstrahlung sein. Die physikalischen Beschreibungsfunktionen des dabei gewonnenen zweidimensionalen Bildes sind im allgemeinen nur noch ortsabhängig. Als Bildfunktion läßt sich die Vektorfunktion $\mathcal{A}(x_1'', x_2'')$ definieren, deren Wert außerhalb des Bildbereiches Null beträgt. Der mathematische Zusammenhang zwischen dem dreidimensionalen Teilaspekt der Umwelt und der zweidimensionalen Bildfunktion läßt sich in Analogie zur Filtertheorie formulieren. Solange die Bildtransformation im Aufnahmesystem linear erfolgt, gilt zwischen der objektbeschreibenden Vektorfunktion $\mathcal{F}(x_1, x_2, x_3)$ und der Bildfunktion $\mathcal{A}(x_1'', x_2'')$ der Zusammenhang:

$$\mathcal{A}(x_1'', x_2'') = \iiint_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}(x_1, x_2, x_3) \cdot h(x_1, x_2, x_3, x_1'', x_2'') dx_1 dx_2 dx_3 + M(x_1'', x_2'')$$

$h(x_1, x_2, x_3, x_1'', x_2'')$ ist die Punktbildübertragungsfunktion des optischen Abbildungssystems; $M(x_1'', x_2'')$ beschreibt ein Bildrauschen und wird additiv überlagert.

Entsprechend den Eigenschaften des Aufnahmesystems lassen sich die Parameter $\mathcal{A}_k(x_1'', x_2'')$ ($k = 1, n$) der Bildfunktion noch näher bestimmen. Zum Beispiel reduziert sich bei Schwarzweißbildern die Bildfunktion auf einen einzigen Parameter $a_1(x_1'', x_2'')$, da durch die Angabe des Grauwertes am Punkt (x_1'', x_2'') das Bild vollständig bestimmt ist. Bei multispektralen Abbildungen sind entsprechend der Anzahl der Spektralbereiche des Aufnahmesystems mehrere Parameter in der Bildfunktion \mathcal{A} enthalten, bei farbigen Abbildungen enthält die Bildfunktion 3 Parameter.

2.1.2. Beschreibung der zweidimensionalen Bildfunktion von Schwarzweißbildern

Ein Schwarzweißbild stellt rein physikalisch eine zweidimensionale Fläche dar, die das auf sie auffallende Licht an einzelnen Stellen verschieden stark reflektiert bzw. transmittiert. Es besteht also letztlich aus Flächenteilen mit unterschiedlicher integraler Leuchtdichte und wird durch die Angabe seiner zweidimensionalen Leuchtdichte- und Leuchtdichteverteilung eindeutig bestimmt. Diese Leuchtdichteverteilung bildet eine einparametrische zweidimensionale Bildfunktion. Durch die Fähigkeit eines solchen Bildspeichermediums an verschiedenen Stellen mit unterschiedlicher Leuchtdichte zu reflektieren bzw. zu transmittieren, ist es möglich, Informationen auf einem Bild zu speichern. Faßt man, wie später noch erklärt wird, einen solchen Bildspeicher als Matrix mit M Zeilen und N Spalten auf, so stellt jedes Matrixelement einen winzigen Bildpunkt dar, der verschiedene Grauwerte annehmen kann. In Abhängigkeit von der Größe der einzelnen Bildpunkte können ca. 15 bis 300 verschiedene Grauwerte pro Bildpunkt unterschieden werden. Das bedeutet, daß ein Schwarzweißbild theoretisch eine Informationsmenge von ca. 4 bis $16 M \times N$ bit enthalten kann. Die Voraussetzung dafür, daß eine zweidimensionale Leuchtdichteverteilung Information enthält, ist, daß sie einer gewissen Systematik unterworfen ist. Ein zufälliges Leuchtdichtefeld ohne Autokorrelation stellt in diesem Zusammenhang nur ein Rauschen dar, während eine systematische Verteilung einem Signal entspricht. Diese Systematik existiert außerhalb und unabhängig vom Wahrnehmungsprozeß und wird nach Köhler [in 4] als "externe Organisation" bezeichnet. Im allgemeinen besteht ein Bild nicht nur aus Einzelsignalen, sondern aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Signalen, die ihrerseits wiederum eine noch höhere Stufe der externen Organisation bilden. Im Wahrnehmungsprozeß bei der Bildinterpretation können Einzelsignale im allgemeinen erst durch Erkennen der externen Organisation von Signalgruppen bestimmt werden. Bezieht man in die bisher rein objektive Bildbeschreibung bereits Aspekte der subjektiven Bildauffassung ein, so läßt sich der Bildinhalt weiter systematisieren:

Innerhalb eines Gesamtbildes lassen sich Bildbereiche abgrenzen, in denen alle Einzelsignale durch ihre externe Organisation im Bildbereich vollständig bestimmt werden können. Die auf diese Weise zusammenhängenden Einzelsignale bilden eine Signalgruppe. Diese Abgrenzung von Signalgruppen im Bild ist nicht mehr völlig unabhängig vom Wahrnehmungsprozeß, da verschiedene Fotointerpreten zur Erschließung der Einzelsignale unterschiedlich große Bildumgebungen hinzuziehen würden.

Die aus einem Schwarzweißbild entnehmbare Gesamtinformation setzt sich also zusammen aus der Grauwert- bzw. Leuchtdichteinformation und einer sogenannten Texturinformation, die durch die räumliche Verteilung der Mikroflächen mit unterschiedlichen Grauwerten bestimmt wird. Der Begriff Textur bezeichnet im allgemeinen eine Mikrostruktur (Muster), die im Bild durch nicht mehr getrennt wahrnehmbare Objekte hervorgerufen wird. Da letztlich auch größere Strukturen und Zeichen aus Texturen zusammengesetzt sind, wird der Begriff Textur hier allgemein für alle geometrischen Bildinhalte verwendet.

Die weitere Beschreibung der Begriffe Grauwert- und Texturinformation ist mit statistischen Methoden möglich. Eine für die Grauwertinformation eines Bildes

grundlegende Größe ist das Histogramm der Grauwerte, das die Häufigkeitsverteilung aller Grauwerte im Bild approximiert [7, 30, 47, 55].

Aus solchen Histogrammen lassen sich Aussagen über den Informationsgehalt, der allein durch die Grauwerte vermittelt wird, ableiten. Zum Beispiel entspricht ein Histogramm mit einem oder mehreren ausgeprägten Maxima einem Bild mit geringer Information, das durch wenige aber homogene Objekte gekennzeichnet ist. Ein Bild mit sehr vielen unterschiedlichen Objekten besitzt hohe Information, sein Histogramm wird annähernd eine Gleichverteilung sein. Dieser Sachverhalt wird in der Statistik durch ein Maß der Information, die Entropie, beschrieben [46, 55, 60]. Betrachtet man die Häufigkeit eines Grauwertes als Wahrscheinlichkeit, diesen Grauwert an irgend einer Stelle im Bild anzutreffen, so ist bei insgesamt K Graustufen die Normierung

$$\sum_{i=1}^K P(D_i) = 1$$

gerechtfertigt. $D_1 \dots D_K$ ist die Menge der diskreten Ereignisse (Grauwerte), die mit der Wahrscheinlichkeit $P(D_i)$ auftreten. Der Informationsgehalt eines dieser Ereignisse D_i ist durch

$$I(D_i) = \text{ld}(1/P(D_i)) \quad (\text{ld} = \text{Logarithmus zur Basis 2})$$

definiert. Nach diesem Maß ist der Informationsgehalt groß, wenn D_i selten, also unerwartet auftritt, der Informationsgehalt ist Null, wenn D_i mit der Wahrscheinlichkeit 1 auftritt.

Der mittlere Informationsgehalt der gesamten Ereignismenge wird durch

$$H[D_1, D_2 \dots D_N] = - \sum_{i=1}^N P(D_i) \cdot \text{ld} P(D_i)$$

bestimmt. H heißt Entropie der Ereignismenge. H nimmt ein Maximum an, wenn alle Grauwerte mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftreten, d. h. die Grauwertinformation ist umso größer, je mehr das Histogramm der Grauwerte einer Gleichverteilung entspricht. Die Angabe der Grauwertinformation reicht aber noch nicht aus, um den Informationsgehalt eines Bildes zu beschreiben. Offensichtlich hat ein Bild, das nur ein Rauschen darstellt, keine Information in dem zu untersuchenden Zusammenhang. Zum Beispiel sind im Rauschspektrum des Weißen Rauschens alle Grauwerte gleich häufig enthalten, die Entropie der Grauwerte ist sehr groß und es liegt maximale Grauwertinformation vor. Es ist deshalb notwendig, die Systematik der räumlichen Verteilung der Grauwerte ebenfalls mit Informationsmaßen zu erfassen und zu beschreiben. Dazu ist es sinnvoll, von der statistischen Auffassung eines Bildes als Realisierung eines räumlichen stochastischen Prozesses auszugehen.

Die Bildkoordinaten stellen dann zwei Parameter des stochastischen Prozesses dar, die Menge der möglichen Grauwerte

$$[D_1, D_2 \dots D_K]$$

entspricht der Menge der Zustände des Systems. Eine Vereinfachung wird durch die Annahme, daß dieser Prozeß stationär ist, erreicht. Stationarität bedeutet dabei, daß die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Realisierung des stochastischen Prozesses von linearen Verschiebungen der Bildkoordinaten unabhängig sind. Sind die Wahrscheinlichkeitsverteilungen des stochastischen Prozesses Normalverteilungen, so heißt dieser Prozeß Gaußscher Prozeß. Ein stationärer Gaußscher Prozeß wird durch seinen Mittelwert und seine Autokorrelationsfunktion vollständig bestimmt.

Zur Erfassung der Texturinformation bzw. der externen Organisation kann deshalb die zweidimensionale Autokorrelationsfunktion dienen. Zum Beispiel ist die Autokorrelationsfunktion eines Bildes mit völlig zufälliger Grauwertverteilung nur im Punkt Null der Verschiebungsparameter von Null verschieden, d. h. die Autokorrelationsfunktion entspricht der δ -Distribution. Liegt eine Systematik der räumlichen Grauwertverteilung vor, so fällt die Autokorrelationsfunktion mit zunehmenden Werten der Verschiebungsparameter ab. Je nach Bildinhalt kann dieser Abfall asymptotisch erfolgen oder durch schwankende Werte der Autokorrelationsfunktion gekennzeichnet sein. Der Verlauf der Autokorrelationsfunktion kann deshalb zur Charakterisierung der externen Organisation benutzt werden. Ein einfaches Maß der Texturinformation erhält man dann durch Bildung der Entropie des Power-Spektrums der Autokorrelationsfunktion. In der Literatur sind auch andere Möglichkeiten zur Erfassung der Texturinformation bekannt geworden. Zum Beispiel werden in [25] insgesamt 16 Momente zur Erfassung von Texturmerkmalen angegeben, die auf der statistischen Analyse von Histogrammen beruhen, die die Häufigkeit von Grauwertkombinationen zweier benachbarter Bildpunkte angeben. Die Vielzahl der verwendeten Beschreibungsformen ist charakteristisch dafür, daß eine eindeutige allgemeingültige Formalisierung des geometrischen Bildinhaltes sehr kompliziert und noch nicht gelöst ist. Die Kopplung der Maße für Grauwert- und Texturinformation zur Gesamtinformation ist multiplikativer Art. Das läßt sich dadurch begründen, daß beide Teilinformationen nahezu unabhängig existieren und die Gesamtinformation Null sein kann, wenn eine der beiden Teilinformationen einen maximalen Wert annimmt.

2.1.3. Grundzüge der Bildfunktion von Farbbildern und Multispektralaufnahmen

Bei vielen modernen Verfahren der Fernerkundung der Erde entstehen entweder direkt farbige Bilder, oder mehrere Schwarzweißabbildungen, die das Bild der Erdoberfläche in verschiedenen Spektralbereichen wiedergeben. Aus solchen Multispektralaufnahmen lassen sich entsprechend der Interpretationsthematik jeweils drei Spektralbereiche auswählen und ebenfalls Farbbilder herstellen. Obwohl noch nicht zu einem Farbbild verarbeitete Multispektralaufnahmen keine unmittelbare Beziehung zu Farbbildern besitzen, lassen sich einige prinzipielle Aspekte der Bildfunktion von Farbbildern

auch auf Multispektralaufnahmen übertragen. Eine ähnliche, vom Wahrnehmungsprozeß unabhängige Beschreibung der Bildfunktion wie beim Schwarzweißbild ist beim Farbbild nur unvollkommen möglich. Das begründet sich darin, daß die Wahrnehmung von Farben bereits subjektiv ist und physiologischen und psychologischen Gesetzmäßigkeiten unterworfen ist. Die Beschreibung der Bildfunktion von Farbbildern erfährt insofern ihre tiefere Begründung erst im Zusammenhang mit den Grundlagen der Physiologie der Farbwahrnehmung. An dieser Stelle sollen deshalb nur einige prinzipielle Aspekte der Farbbildfunktion beschrieben werden.

Ein Farb- bzw. Multispektralbild unterscheidet sich formal von einem Schwarzweißbild hauptsächlich dadurch, daß es nicht nur eine integrale, sondern eine spektrale zweidimensionale Leuchtdichtevertelung darstellt. Es kann deshalb potentiell mehr Information als ein Schwarzweißbild speichern [80]. Jede Farbe ist durch die Angabe von 3 Grauwerten eindeutig bestimmbar. Ist K die Anzahl der unterscheidbaren Graustufen, so erhöht sich der maximale Informationsgehalt beim Farbbild gegenüber dem Schwarzweißbild von $M : N : \text{ldk}$ auf $M : N : \text{ld } K^3$ und beim Multispektralbild auf $M \cdot N \cdot \text{ld } K^n$. M und N sind die Bildzeilen- bzw. Spaltenzahl und n die Anzahl der Spektralbereiche beim Multispektralbild. Der aktuelle Informationsgehalt realer Farb- bzw. Multispektralaufnahmen ist jedoch weitaus geringer, da verschiedene Farben mit bestimmter Wahrscheinlichkeit auftreten und somit die farbige Texturinformation mit erheblicher Redundanz verbunden ist [40]. Wie später noch am Beispiel der Hauptachsentransformation von Multispektralbildern gezeigt wird, lassen sich beispielsweise ca. 60 % des Informationsgehaltes einer sechskanaligen Multispektralaufnahme bereits auf einem einzigen Schwarzweißbild ohne Redundanz speichern. Die aus einem Farbbild entnehmbare Information setzt sich aus einer Farbinformation und ähnlich wie beim Schwarzweißbild aus einer Texturinformation zusammen. Die Farbinformation, die jedem Bildpunkt entnommen werden kann, besteht aus 3 Komponenten bzw. n -Komponenten beim Multispektralbild. Analog zum Schwarzweißbild lassen sich beim Farb- bzw. Multispektralbild drei- bzw. mehrdimensionale Histogramme bilden, die angeben, wie häufig eine Farbe bzw. eine Grauwertkombination geometrisch identischer Bildpunkte einer Multispektralaufnahme im Bild vorkommen. Die drei Komponenten des Histogrammes beim Farbbild können zum Beispiel durch drei Grauwertangaben, durch drei Farbwerte oder durch Sättigung, Farbton und Helligkeit realisiert werden. Die Farb- bzw. Multispektralinformation läßt sich dann durch eine mehrdimensionale Entropie beschreiben. Die Angabe solcher mehrdimensionaler Histogramme ist für die praktische visuelle Bildinterpretation von geringer Bedeutung, da sie nicht anschaulich ein- oder zweidimensional dargestellt werden können und findet im allgemeinen nur bei der numerischen Bildauswertung Verwendung. Die Entkopplung der drei Komponenten und ihre getrennte eindimensionale Darstellung ist beim Farbbild im allgemeinen nicht möglich.

Die Erfassung der Texturinformation ist beim Farbbild ebenfalls weitaus komplizierter als beim Schwarzweißbild. Formal gesehen besitzt die Texturinformation analog zur Farbinformation ebenfalls drei Komponenten und ist als Systematik der räumlichen Anordnung von Mikroflächen mit unterschiedlicher Farbinformation zu verstehen.

Dieser Sachverhalt wird durch folgendes einfaches Beispiel veranschaulicht:

Eine farbige Textur besteht aus kleinen aneinandergereihten Kreisflächen, die sich aus drei gleichgroßen Kreissektoren mit den Farben Rot, Grün und Blau zusammensetzen. Die Textur besteht also letztlich aus dreifarbigem Kreissektoren mit 120° Öffnungswinkel. Zerlegt man diese Textur in ihre drei Farbkomponenten, so setzen sich die einzelnen Komponenten der Textur aus Kreisflächen mit zwei Kreissektoren zusammen. Der der jeweiligen Farbkomponenten entsprechende hat einen Öffnungswinkel von 120° , der andere 240° . Die Texturkomponenten unterscheiden sich also erheblich von der ursprünglichen farbigen Textur. Bei aerokosmischen Aufnahmen der natürlichen Umwelt werden solche extremen Texturen im allgemeinen nicht vorkommen. Die Erfahrung bei der visuellen Interpretation solcher Aufnahmen zeigt, daß in aktuellen Farbaufnahmen hauptsächlich nur eine Texturkomponente enthalten ist, obwohl prinzipiell drei Komponenten gespeichert werden könnten. Das begründet sich in der erheblichen Redundanz der spektralen Texturmerkmale der natürlichen Umwelt. In Analogie zum Schwarzweißbild stellt die räumliche Verteilung der Farben im Bild nur dann ein Signal dar, wenn in ihr eine gewisse Systematik enthalten ist. Einer Erfassung dieser Systematik als externe Organisation werden durch den subjektiven Farbwahrnehmungsprozeß des Menschen ebenfalls Grenzen gesetzt. Durch die unterschiedliche Bewertung von unterschiedlichen Farben im Wahrnehmungsprozeß kann beispielsweise ein menschlicher Beobachter geometrisch gleiche und nur in der Farbgebung unterschiedliche Konfigurationen als unterschiedliche externe Organisation wahrnehmen. Aus diesen Gründen wird verständlich, daß eine ähnliche Beschreibung von Farbbildern wie bei Schwarzweißbildern ohne Berücksichtigung der physiologischen und psychologischen Prozesse bei der Reizaufnahme und Reizverarbeitung im Komplex Auge-Gehirn nur bedingt möglich ist.

2.2. Physiologisch-optische Aspekte der Bildwahrnehmung

2.2.1. Reizaufnahme und Reizverarbeitung im Auge

Ein Teil des vom Bild reflektierten Lichtes wird über die Abbildungsoptik des Auges auf die Sinneszellen der Augennetzhaut projiziert. Das ist ein rein physikalischer Prozeß. Die Sinneszellen werden entsprechend der Reizintensität und im Fall eines Farb-reizes in Abhängigkeit von den spektralen Charakteristika des Reizes erregt. Die Erregung wird über die Nervenbahnen bis ins Zentralnervensystem weitergeleitet. Diesen Vorgang nennt man physiologisch-optischen Prozeß. In einem psychologisch-optischen Prozeß erfolgt anschließend im Zentralnervensystem die optische Wahrnehmung [46, 51]. Bei der optischen Reizaufnahme werden pro Sekunde durch das Auge $10^6 \dots 10^7$ bit aufgenommen. Bei der Weiterleitung und Verknüpfung dieser Erregungszustände findet eine Reduktion dieser Informationsmenge statt, so daß lediglich 25 ... 100 bit/s in das Zentralnervensystem weitergeleitet und zu einem internen Abbild verarbeitet werden. Die Abspeicherungsrate von Information im Gedächtnis beträgt lediglich 1 bit/s. Von den Einzelheiten der Rezeptorreizmuster bis zum abgespeicherten Merkmal erfolgt also eine drastische Informationsreduktion. Das Auge als Empfangsorgan für optische Reize in Form von elektromagnetischer Strahlung enthält beim Menschen in der ersten Schicht der Retina (Netzhaut) etwa 10^8 lichtempfindliche Rezeptoren.

Diese Rezeptoren setzen sich zusammen aus den farbempfindlichen Rezeptoren für das Sehen am Tage, den sogenannten Zapfen, und weiteren besonders lichtempfindlichen, jedoch nicht farbempfindlichen Sensoren (Stäbchen) für das Sehen bei geringer Beleuchtung.

Bei normaler Beleuchtung werden Farb- und Schwarzweißbilder mit Hilfe der Zapfen wahrgenommen. Von diesen lichtempfindlichen Rezeptoren der Retina werden elektrische Impulse den darunter liegenden Neuronenschichten zugeführt. Zwischen der Reizintensität und der Stärke der elektrischen Impulse besteht ein logarithmischer Zusammenhang. Die einzelnen Neuronen und Neuronenschichten sind miteinander so verkoppelt, daß ihre Funktion im Prinzip mit aus der Informationstheorie bekannten linearen zweidimensionalen Filtern verglichen werden kann [50, 57]. Die Neuronennetze wirken als Filter für die Ortsfrequenzen der auf dem Rezeptormosaik herrschenden örtlichen Helligkeitsverteilung, indem sie hohe Frequenzen verstärken und niedrige schwächen. Damit wird eine Kontrasterhöhung und Konturverschärfung erreicht, wodurch letztlich ein Ausgleich der optischen Abbildungsfehler der Augenlinse erzielt wird. Mit diesem relativ einfachen, mit linearen Systemen vergleichbaren Prozeß bei der Reizaufnahme lassen sich bereits einige Gesetzmäßigkeiten begründen, die besonders bei der Erfassung von zweidimensionalen Abbildungen eine Rolle spielen. Zum Beispiel werden zwei sich gegenüberstehende gleich helle Flächen, die einmal von einer dunklen und einmal von einer hellen Umgebung umrandet sind, als deutlich unterschiedlich wahrgenommen. Diese sogenannte "Simultan-Kontrast-Illusion" läßt sich qualitativ dadurch erklären, daß das Bild im Auge eine lineare räumliche Hochpaßfilterung erfährt. Sinngemäß werden dabei die Helligkeitsmittelwerte der einzelnen Bildbereiche von den tatsächlichen Helligkeiten subtrahiert. Da sich diese Mittelwerte in beiden Bildbereichen stark unterscheiden, werden die beiden gleich hellen Flächen unterschiedlich hell wahrgenommen. Analog läßt sich auch erklären, daß sich eine physikalisch gleichmäßig helle Fläche in der Nähe einer Kante zu einer dunklen Fläche dem Auge heller erscheint als an den übrigen Stellen.

Ein ebenfalls mit Hilfe der Hochpaßfilterung erklärbarer Effekt ist die sogenannte "Match band-Illusion". Dieser Effekt entsteht beim Betrachten einer dunklen und einer hellen Fläche, die durch eine Fläche mit linearem Helligkeitsabfall verbunden sind (Abb. 1).

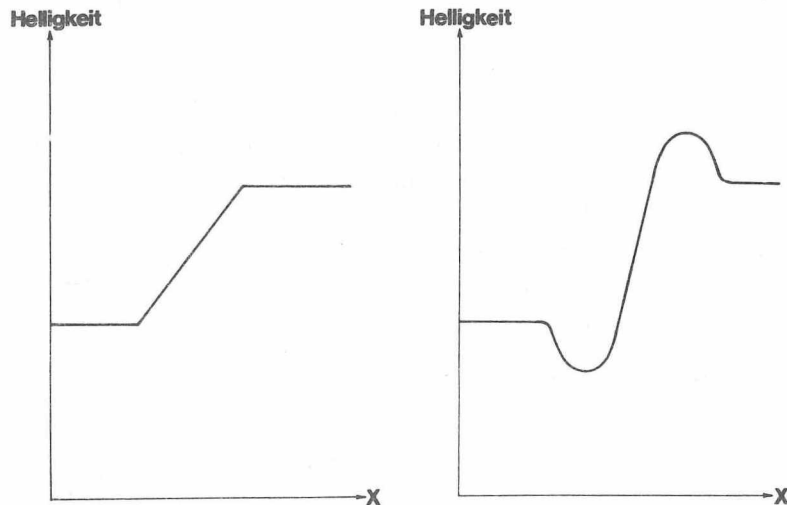


Abb. 1: Match band-Illusion

Das Auge nimmt bei einer solchen Abbildung parallel zur Koppelfläche in der hellen Fläche einen hellen Streifen und in der dunklen Fläche einen dunklen Streifen, sogenannte "Match bands" wahr. Mit Hilfe der linearen Filterung wird auch das Phänomen der Helligkeitskonstanz erklärbar. Demzufolge besitzt ein menschlicher Beobachter die Fähigkeit, nahezu unabhängig von den Beleuchtungsverhältnissen einzuschätzen, ob beispielsweise eine Fläche weiß oder grau aussieht. Dieser hohe Regelumfang des Auges begründet sich einerseits in den verschiedenen Rückkopplungs- und Regelungsmechanismen der optischen Wahrnehmungskette und andererseits in der Eigenschaft linearer Hochpaßfilter, nur auf relative Änderungen der Eingangsgröße zu reagieren. Für alle Effekte der Reizaufnahme gilt gleichermaßen, daß sie einer Sättigung unterliegen, die bei der optischen Bildwahrnehmung durch entweder zu kleine oder zu große Reizintensitäten verursacht wird. Alle Effekte existieren unbedingt gesetzmäßig und sind selbst durch "bewusste" und zielgerichtete visuelle Bildanalysen nicht ausschaltbar. Es zeigt sich sogar, daß bei intensiver und konzentrierter Betrachtung die Effekte der Reizwahrnehmung noch verstärkt werden. Bisher wurden Effekte beschrieben, die allgemein an Grenzübergängen zwischen hellen und dunklen Flächen entstehen. Tatsächlich sind diese Erscheinungen noch weitaus differenzierter, wenn man berücksichtigt, daß unterschiedlich helle Flächen zusätzlich noch verschiedene Farben besitzen können. Zur weiteren Charakterisierung der Eigenschaften des physiologisch-optischen Prozesses bei der Reizaufnahme muß auf die physiologischen Grundlagen der Farbwahrnehmung zurückgegriffen werden.

2.2.2. Physiologie der Farbwahrnehmung

Die physiologischen Eigenschaften des Auges bei der Farbwahrnehmung werden durch farbmetrische Grundgrößen und Zusammenhänge beschrieben. In der Farbmetrik versteht man unter dem Begriff "Farbe" stets eine durch das Auge vermittelte Sinnesempfindung. Aufgabe der Farbmetrik ist es, Farben zahlenmäßig zu erfassen und ihre Mischgesetze mathematisch zu formulieren. Solche zahlenmäßigen Darstellungen von Farben sind im allgemeinen nicht empfindungsgerecht und man hat deshalb an Stelle des Begriffs "Farbe" den Begriff "Farbvalenz" und entsprechend "Farbvalenzmetrik" eingeführt. In der höheren Farbtheorie wird die empfindungsgerechte metrische Darstellung von Farben berücksichtigt, so daß der Begriff "empfindungsgerechte Farbmetrik" gerechtfertigt ist. Einen allgemeinen Überblick über die Problematik des Farbensehens findet man in [3, 42, 51, 52, 58, 64].

2.2.2.1. Grundbegriffe der Farbvalenzmetrik

Strahlungen, die durch unmittelbare Reizung der Netzhaut Farbempfindungen hervorrufen können, heißen "Farbreize" und ihre spektrale Verteilung $\varphi(\lambda)$ "Farbreizfunktion". Dabei bewertet das Auge die auftreffende Strahlung nach drei voneinander unabhängigen, spektral verschiedenen Empfindlichkeitsfunktionen, woraus abgeleitet werden kann, daß zur zahlenmäßigen Beschreibung von Farben auch mindestens drei Bewertungsgrößen erforderlich sind. Die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen der für das Farbsehen verantwortlichen Zäpfchen in der Augennetzhaut ermöglichen Farbempfindungen im Spektralbereich von 380 bis 780 nm. Die augenscheinlichsten Größen zur vollständigen Charakterisierung einer Farbe sind die drei qualitativen Farbmerkmale:

Farbton, Farbsättigung und Helligkeit.

Der Farbton ist ein Maß der Buntheit einer Farbe und gibt an, ob eine Farbe rot, grün oder blau usw. aussieht. Es ist das am meisten auffallende Farbmerkmal. Unabhängig vom Farbton existiert die Farbsättigung als zweites grundlegendes psychologisches Kennzeichen der Farbe. Wird einer bunten Farbe mehr und mehr Weiß zugemischt, so bleibt die Art der Buntheit bestehen, die Farbe wird aber immer blasser. Dieser Weißanteil einer Farbe wird durch den Begriff "Sättigung" bestimmt. Je blasser und verweißlichter eine Farbe ist, desto geringer ist ihre Sättigung. Die experimentell erzeugbaren gesättigsten Farben sind die Farben des Spektrums. Das dritte psychologische Kennzeichen einer Farbe ist ihre Helligkeit. Sie kennzeichnet die Intensität des Farbreizes. Obwohl Helligkeit und Sättigung einer Farbe nicht völlig entkorreliert sind, werden sie in der Farbvalenzmetrik als zwei unabhängige Größen zur Charakterisierung einer Farbe benutzt. Beispielsweise ist blau als gesättigte Farbe relativ dunkel, gesättigtes Rot und Grün sind weniger dunkel; Gelb ist auch in maximaler Sättigung sehr hell. Es ist eine spezifisch helle Farbe.

Mit zunehmender Verweißlichung steigt die Helligkeit einer Farbe, so daß es möglich ist, durch Entsättigung von Blau die gleiche Helligkeit wie beim gesättigten Gelb zu erreichen. Zwischen Sättigungs- und Helligkeitszunahme besteht also ein umgekehrt proportionaler Zusammenhang, der aber für verschiedene Farbtöne unterschiedlich ist.

Die drei qualitativen Merkmale einer Farbe "Farbton, Farbsättigung und Helligkeit" werden in der Farbvalenzmetrik in quantitative Bewertungsgrößen umgesetzt. Für solche Größen sind Maßzahlssysteme erforderlich, die durch Transformationsgleichungen ineinander umgerechnet werden können.

2.2.2.2. Die trichromatischen Farbmaßzahlen

Für die Ermittlung von solchen Farbmaßzahlen bilden die Gesetze der additiven Farbmischung von GRASSMANN eine Grundlage:

1. Für das Ergebnis einer additiven Farbmischung sind nicht die Farbreize und deren spektrale Zusammensetzung, sondern deren drei Einzelwirkungen in der Netzhaut verantwortlich, die sich zu einer untrennbaren Gesamtwirkung zusammensetzen. Diese Gesamtwirkung ist nicht physikalischer Art, sondern hat rein physiologischen Charakter und wird Farbreiz oder Farbreizvalenz genannt.
2. Zur eindeutigen Kennzeichnung einer Farbvalenz sind jeweils drei voneinander unabhängige Maßzahlen bzw. ein Ortsvektor im dreidimensionalen Farbraum notwendig und hinreichend. Beispielsweise läßt sich die Farbe Grün durch Subtraktion von entsprechenden Teilen Rot und Blau von Weiß herstellen, während diese Farbe additiv aus Gelb und Blau zu ermiscen ist.
3. Wird in einer additiven Mischung der Anteil einer Komponente stetig verändert, so ändert sich auch das Aussehen der Mischfarbe stetig.

Nach dem zweiten GRASSMANNschen Gesetz ist es also möglich, jede Farbe durch additive Mischung dreier Bezugsfarben, sogenannter Primärvalenzen, die nicht auseinander erzeugbar sind, nachzuahmen. Unter additiver Farbmischung versteht man die summarische Wirkung von einzelnen Farbreizen. Ein einfaches Beispiel für die additive Farbmischung ist der Farbrasterdruck, bei dem die Rasterpunkte so klein und dicht benachbart angeordnet sind, daß sie das Auge nicht mehr getrennt wahrnehmen kann und sich die Farbreize der einzelnen Punkte addieren. Die additive Farbmischung ist von der subtraktiven zu unterscheiden. Die subtraktive Farbmischung läßt sich rein physikalisch, allein mit spektraler Transparenz und Remissionsfunktion von Farbpigmenten beschreiben und steht nicht im Zusammenhang mit der Psychologie und Physiologie der Farbwahrnehmung.

Wird eine Farbreizvalenz F durch die Primärvalenzen R , G und B nachgemischt, so kann diese durch Addition der Primärvalenzen in einer linearen vektoriellen Farbgleichung der Form

$$F = A \cdot R + B \cdot G + C \cdot B$$

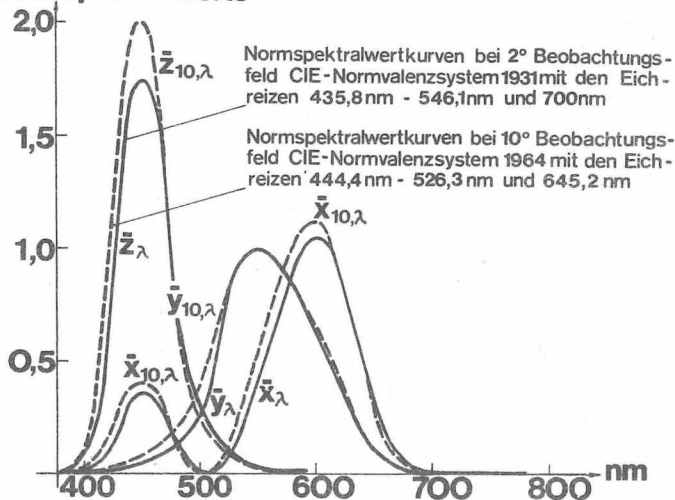
ausgedrückt werden.

A, B, C sind Farbwerte und geben an, mit welchen Gewichten die Primärvalenzen in die Mischung eingehen. Für die Auswahl der Primärvalenzen R, G, B gibt es unendlich viele Möglichkeiten. Um jedoch einheitliche Maßzahlssysteme zu schaffen, wurden 1931 von der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) die monochromatischen Strahlungen der Wellenlängen 700,0 nm; 546,1 nm und 435,8 nm mit den relativen Strahlungsleistungen 73,0420; 1,3971 und 1,000 als Primärvalenzen festgelegt [9,42,64].

Für den Zusammenhang zwischen dem physiologischen Farbmischprozeß und den physikalischen Spektralcharakteristiken besitzen die Farbwerte der Spektralfarben eine Schlüsselposition. Da man mit drei Grundfarben immer nur Farben erzeugen kann, die weniger gesättigt sind als die Grundfarben selbst und da alle Spektralfarben die am meisten gesättigtsten Farben darstellen, ist es nicht möglich, die Spektralfarben durch Mischung aus den reellen Primärvalenzen zu erzeugen.

Durch einfache lineare Transformationsbeziehungen können aber aus den reellen Primärvalenzen sogenannte virtuelle Primärvalenzen errechnet werden. Mit Hilfe dieser virtuellen Primärvalenzen, die allerdings keine reellen Farben mehr darstellen, ist es rechnerisch möglich, alle in der Natur existierenden Farben nachzumischen. Sie werden als Normalvalenzen x, y, z bezeichnet. Die unter Zugrundelegung dieses Normalvalenzsystems bestimmten Farbwerte der Spektralfarben heißen Normalspektralwerte; ihr spektraler Verlauf für ein energiegleiches Spektrum ist in Abb. 2 dargestellt.

Normspektralwerte



Die Gleichung einer Farbvalenz im Normalvalenzsystem lautet dann:

$$F = X \cdot x + Y \cdot y + Z \cdot z$$

Durch Division der Farbwerte durch ihre Summe erhält man die sogenannten Farbwertanteile.

$$x = X / (X + Y + Z)$$

$$y = Y / (X + Y + Z)$$

$$z = Z / (X + Y + Z)$$

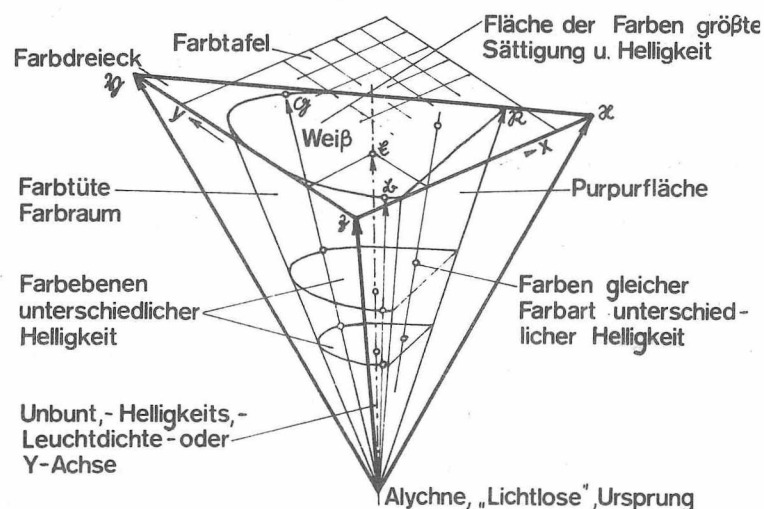
Abb. 2 Spektraler Verlauf der Normspektralwerte

Da $x + y + z = 1$ ist, genügt es, wenn nur zwei dieser Größen angegeben werden, die dritte ist damit ebenfalls bestimmt. Durch Angabe von zwei Farbwertanteilen ist eine Farbe bezüglich ihres Farbtons und ihrer Farbsättigung eindeutig bestimmt.

Zur vollständigen Charakterisierung muß dann noch eine Angabe über ihre Helligkeit hinzugefügt werden.

2.2.2.3. Die geometrische Darstellung von Farben in der Farbmetrik

Farben stellen dreidimensionale Größen dar und können demzufolge nur in einem entsprechenden Raum vollständig charakterisiert werden. In einer solchen räumlichen Darstellung, die Farbpypamide genannt wird (Abb. 3), entspricht jeder Farbe ein Vektor, durch dessen Richtung die Farbart (Farbton, Farbsättigung) und durch dessen Länge die Helligkeit gekennzeichnet ist. Den drei Primärvalenzen entsprechen die Achsvektoren. Die additive Mischung zweier Farben F_1 und F_2 läßt sich durch Addition der zugehörigen Vektoren darstellen. Die räumliche Darstellung der Farben ist zwar anschaulich und am



vollkommensten, sie ist aber kaum in der Praxis verwendbar. Geeigneter ist deshalb die Darstellung in einem zweidimensionalen System, wobei dabei natürlich auch nur zwei Farbmerkmale dargestellt werden können. Da die Helligkeit die am wenigsten charakteristische Größe darstellt, ist es zweckmäßig, sie in der Darstellung unberücksichtigt zu lassen und die Farben nur durch Farbton und Farbsättigung zu kennzeichnen.

Abb. 3 Räumliche Darstellung von Farben in einer Farbpypamide

Eine solche zweidimensionale Farbtafel entsteht, indem man die Farbpypamide mit einer ebenen Fläche schneidet. Diese Schnittfigur ist ein Dreieck; die Farbtafel heißt deshalb auch Farbdreieck. Während in der Farbpypamide jedem Vektor eine Farbe entspricht, gehören zu jedem Punkt des Farbdreiecks eine Vielzahl von Farben mit gleichem Farbton und gleicher Sättigung. Über die Helligkeit kann keine Aussage gemacht werden. Je nach Lage der Primärvalenz-Einheitsvektoren und den Winkeln, die sie miteinander einschließen, sind die aus der Farbpypamide herausgeschnittenen Dreiecke verschieden gestaltet. Es ist aber im allgemeinen üblich, für das Farbdreieck eine Darstellung in rechtwinkligen Koordinaten zu wählen (Abb. 4).

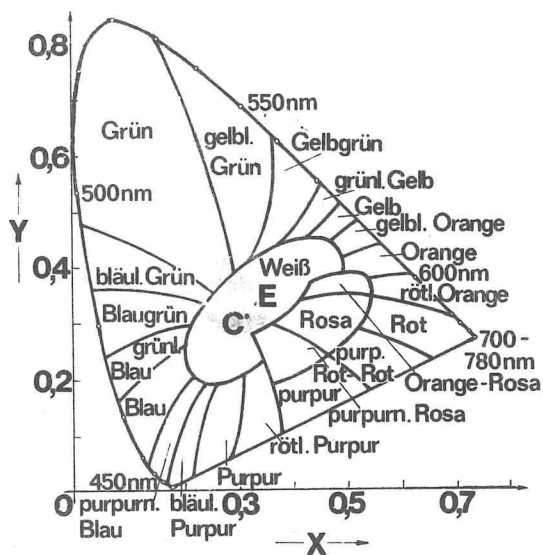


Abb. 4 Darstellung von Farben im Farbdreieck

des Unbuntpunktes mit dem Farbort einer Spektralfarbe liegen, sind farbtongleich.

Da die Farbwertanteile relativ unanschauliche und unvorstellbare Größen sind, ist es günstig, wieder den quantitativen Bezug zur Sättigung und zum Farbton herzustellen: Alle Farben, die auf einem vom Unbuntpunkt ausgehenden Strahl liegen, haben den gleichen Farbton und lassen sich durch die farbtongleiche Wellenlänge λ_f der zugehörigen Spektralfarbe quantitativ erfassen. Für die farbtongmäßige Charakterisierung der Farben, die auf Strahlen in Richtung zur Purpurgeraden liegen, benutzt man die sogenannte kompensative Wellenlänge λ_k , die durch entsprechende negative Verlängerung des Strahls in Richtung des Spektralfarbenzugs erhalten wird.

Die Sättigung läßt sich durch den spektralen Farbwertanteil p_e quantitativ kennzeichnen. p_e ergibt sich aus dem Verhältnis der Strecken zwischen Farbort und Unbuntpunkt und Farbort und Ort der farbtongleichen Spektralfarbe.

$$p_e = \overline{FU/SU}$$

Mit Hilfe der Farbwertanteile läßt sich p_e auch als

$$p_e = (x_F - x_U)/(x_S - x_U)$$

ausdrücken.

Die Farborte der Normvalenzen bilden dabei die Eckpunkte eines gleichschenkligen rechtwinkligen Dreiecks, dessen Hypotenuse im allgemeinen weggelassen wird; als Koordinaten werden die Normfarbwertanteile x und y benutzt. Im Farbdreieck kann der Spektralfarbenzug und die Purpurgerade eingetragen werden. Alle Farben innerhalb dieses Kurvenzugs sind reell. Die Farben auf dem Kurvenzug besitzen die reell existierende maximale Sättigung. Nach innen nimmt die Sättigung ab, bei $x = 1/3$ und $y = 1/3$ wird der Unbuntpunkt erreicht, der den Grautönen sowie Weiß und Schwarz zugeordnet ist. Der Farbort einer Farbe F , die aus zwei Farben F_1 und F_2 ermischt wird, liegt auf der Geraden, die deren Farborte miteinander verbindet.

Gemäß der für die Mischung gültigen "Schwerpunktregel" liegt er einer Komponente umso näher, je größer deren Anteil ist. Farben, deren Farborte auf der Verbindungsgeraden

2.2.2.4. Grundbegriffe der empfindungsgemäßen Farbmatrik

Das gewöhnliche CIE-Farbdreieck hat den Mangel, daß man aus dem Abstand zweier Punkte im Farbdreieck nicht Schlüsse auf den empfindungsgerechten Unterschied der ihnen zugrundeliegenden Farben ziehen kann. Die Empfindungsstrecken für gerade noch wahrnehmbare Farbunterschiede sind in diesem System nicht gleich groß. Die Unterscheidungsempfindlichkeit des menschlichen Auges für Farben setzt sich bei mittlerer gleicher Leuchtdichte (ca. 5000 asb) aller Farben zusammen aus den Empfindlichkeiten für Sättigungs- und Farbtonänderungen. Die Maxima der Beobachtungsempfindlichkeit für Sättigungsänderungen liegen an den Enden des Spektralfarbenzuges, die minimale Empfindlichkeit bei etwa 570 nm [45], [17]. Die Farbtonunterscheidungsempfindlichkeit des AUGES ändert sich innerhalb des Bereiches der Spektralfarben mehrmals und hat verschiedene ausgeprägte Maxima und Minima [39].

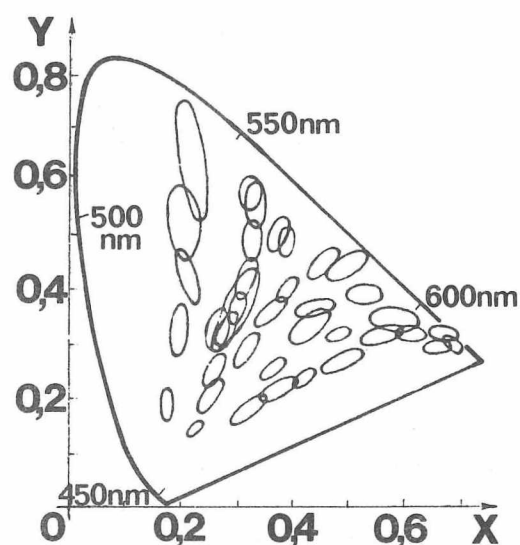


Abb. 5 Mc Adam-Ellipsen geben die Verteilung der Farbunterscheidungsempfindlichkeit des Auges an

Interessante Arbeiten zur Farbtonunterscheidung findet man auch bei Mc Adam [16]. Er erhält als Ergebnis seiner Untersuchungen Ellipsen, die für jede Farbe im Farbdreieck angeben, in welchem Bereich eine Farbe von einer anderen nicht unterschieden werden kann.

Aus Abb. 5 ist zu erkennen, daß die Farbunterscheidungsempfindlichkeit im Bereich der grünen Farben am geringsten ist.

Für eine Vielzahl von wissenschaftlichen Aufgabenstellungen, bei denen Farbwahrnehmungsprozesse eine Rolle spielen, reicht die farbvalenzmetrische Darstellung von Farben nicht mehr aus; es wurden deshalb verschiedene mathematische Transformationen entwickelt, die die farbvalenzmetrischen Farbwertanteile in empfindungsgerechte Farbwertanteile überführen. Die zweidimensionale Darstellung der Farben führt dann zu empfindungsgerechten Farbdreiecken, bei denen genau genommen die Mc Adam-Ellipsen in gleich große Kreise übergegangen sind. Eine solche exakte, mit vertretbarem Aufwand auszuführende

Transformation wurde noch nicht gefunden. Unter bestimmten Annahmen, die aber für viele Fragestellungen der Farbbewertung ausreichend sind, werden Näherungslösungen angegeben.

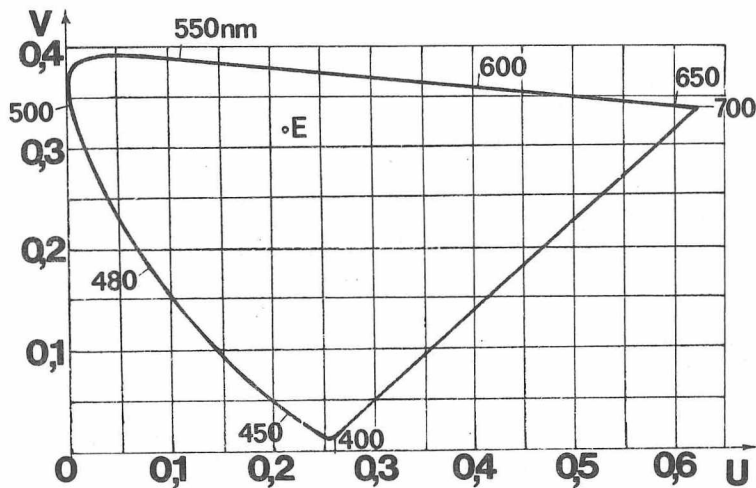


Abb. 6 CIE-UCS-Farbdreieck

Eine relativ einfache Transformation, die das CIE-Farbdreieck in ein rechtwinkliges CIE-UCS-Farbdreieck¹⁾ (Abb. 6) überführt, wurde 1960 von der Internationalen Beleuchtungskommission empfohlen. Mit Hilfe der Transformationsgleichungen

$$u = 4x/(-2x+12y+3)$$

$$v = 6y/(-2x+12y+3)$$

werden die reizvalenzmetrischen Farbwertanteile x und y des CIE-Farbdreiecks in die empfindungsgerechten Farbwertanteile u und v überführt [9]. Der Unbuntpunkt liegt bei $u_0 = 4/19$ und $v_0 = 6/19$.

Aus diesem Farbdreieck kann unter der Nebenbedingung, daß die Farben annähernd gleich hell sind, aus dem Abstand zweier Farben auf den empfindungsgerechten Farbabstand geschlossen werden.

2.2.3. Einfluß der Farbwahrnehmung auf die Bildinterpretation

Das menschliche Auge kann gegenüber etwa 30 Grautönen mehrere 10 000 verschiedene Farben unterscheiden. Deshalb ist der Informationsgehalt von Farbbildern für den Menschen auch viel größer als von Schwarzweißbildern. Gleichzeitig können bei der Wahrnehmung von Farben aber auch Erscheinungen auftreten, die bei der Interpretation von Farbbildern zu Fehlern führen, wie sie bei der Interpretation einfacher Schwarzweißbilder nicht möglich wären. Beispielsweise können beim Farbsehen Kontrasterscheinungen entstehen, die eine objektive Täuschung des Beobachters verursachen [51]. Dabei spielen Simultankontrasterscheinungen eine Rolle. Infolgedessen entsteht die "Farbe" Schwarz nur durch Kontrastwirkung; die Farben Braun und Olivgrün existieren in keiner Farbmetrik, sie können niemals als farbige Lichter wahrgenommen werden, sondern entstehen nur durch den Simultankontrast zu ihrer andersfarbigen Umgebung. Betrachtet man z. B. verschiedenfarbige Flächen durch eine Pappröhre, so wird Braun als Dunkelgelb und Olivgrün als Dunkelgelbgrün erscheinen. Erst nach Hinzuziehen der Umgebung erscheinen die Flächen Braun bzw. Olivgrün. Ähnlich können durch Simultankontrast auf weißen oder grauen Flächen nicht vorhandene Farben vorgetäuscht werden.

¹⁾ UCS - Uniform Chromatic Scale

Bei der Interpretation von Strukturen auf Multispektralaufnahmen, die sich durch feine Farbunterschiede auszeichnen, können diese Effekte eine Rolle spielen. Beispielsweise ist dann nicht zu erkennen, ob eine winzige Farbänderung einer Struktur auf tatsächliche Änderungen des Reflexionsvermögens oder nur auf Änderungen des farbigen Hintergrundes der Struktur auf dem Bild zurückzuführen ist. Farbenschwache Beobachter sind für solche Simultankontrasterscheinungen besonders anfällig.

2.3. Psychologische Aspekte der Bildwahrnehmung

Die von den Sinneszellen zum Gehirn geleiteten Reize werden im Zentralnervensystem zu Bewußtseinsinhalten verarbeitet. Dabei spielen Erfahrungen, Kenntnisse und Spezialisierung des Bildinterpretieren für die Wahrnehmung von abgebildeten Objekten eine bedeutende Rolle. Die Art und Weise bzw. die Organisation, mit der die im Gehirn ankommenden Reize weiterverarbeitet werden, heißt "interne Organisation" [43] und ist im Gegensatz zur externen Organisation nicht objektiv, sondern vom Subjekt abhängig. Die interne Organisation kann nach Albrecht [2] im wesentlichen in folgende drei Einzelprozesse unterteilt werden:

1. Reizauswahl
2. Flächenhafte Gliederung
3. Räumliche Gliederung

Aus der Wechselwirkung dieser drei Prozesse ergibt sich der komplexe psychologische Prozeß der Bildwahrnehmung. Wie bereits an anderer Stelle schon erwähnt, werden vom Auge an das Gehirn pro Sekunde 3 Mio bit Information weitergeleitet, von denen aber nur 25...100 bit bewußt wahrgenommen, also verarbeitet werden können. Dieser enormen Informationsreduktion liegt eine subjektive Reizselektion im Gehirn zu Grunde. Faktoren für die Reizauswahl im Gehirn eines Fotointerpreten können zum Beispiel die bevorzugte Wahrnehmung von hellen und dunklen Flächen, von hohen Kontrasten und von einfachen geometrischen Figuren sein.

Bei der Interpretation von Farbbildern werden helle Farben, gesättigte Farben und hohe Farbkontraste bevorzugt wahrgenommen. Zusätzlich spielt das Interpretationsziel eine wesentliche Rolle. Alles das, was man vorher im Bild vermutet oder bewußt sucht, wird leichter wahrgenommen, als das, was nicht zu vermuten ist. Mit "flächenhafter Gliederung" wird der Einzelprozeß des Erkennens von Objekten, Strukturen und Texturen, die im Bild zweidimensional, also flächenhaft wiedergegeben sind, umschrieben. Diese flächenhafte Gliederung steht bei der Interpretation von Schwarzweißbildern in enger Wechselwirkung mit der räumlichen Gliederung, denn sie kann nur auf Grund von Erfahrungen über die Verteilung von Licht und Schatten aus zweidimensionalen Bildern, also aus der flächenhaften Gliederung abgeleitet werden.

Bei Falschfarbenbildern geht die ursprüngliche Zuordnung zwischen den Farben von Licht und Schatten verloren, so daß ein Fotointerpret kaum Aussagen über die räumliche Gliederung ableiten kann. Hier spielen für die Bildwahrnehmung nur die beiden Prozesse Reizauswahl und flächenhafte Gliederung eine dominierende Rolle. Diese Unterdrückung der räumlichen Gliederung bedeutet eine erhebliche apriori Informationsreduktion, so daß im Zentralnervensystem nur noch flächenhafte Gliederungen, in denen die Multispektralinformation von Farbbildern enthalten ist, verarbeitet werden. Es wird also insbesondere eine interpretationsgerechte Aufbereitung der stofflichen Bildinformation erreicht.

2.4. Aspekte der naturwissenschaftlichen Thematik der Interpretation

Bei der Erfassung der Aspekte der naturwissenschaftlichen Thematik für die interpretationsgerechte Bildaufbereitung sind zwei prinzipielle Aufgabenrichtungen zu erkennen, die die Gewinnung von geometrisch kartographischen Informationen und von stofflichen Aussagen über die zu untersuchenden Objekte zum Inhalt haben. Während geometrisch-kartographische Informationen, wie beispielsweise die geographische Siedlungsstruktur, das Verkehrsnetz, Fotolineationen usw. bereits nahezu vollständig in der räumlichen Gliederung einfacher Schwarzweißbilder erfaßt werden, stellen stoffliche Informationen den wesentlichen zusätzlichen Bildinhalt von Multispektralaufnahmen dar. Die interpretationsgerechte Bearbeitung von Multispektraldaten ist insofern insbesondere auf die Aufbereitung der stofflichen Bildinformation orientiert. Die Aspekte der Interpretationsthematik für die Bildaufbereitung sind nur bei einzelnen Detailproblemen formalisierbar, i. a. überwiegt der nichtformalisierbare schöpferische Anteil an der Bildanalyse, in den ein komplexer, z. T. interdisziplinärer Erfahrungsschatz des jeweiligen Bildinterpreten einfließt. Fernerkundungsdaten können nach verschiedenen thematischen Gesichtspunkten analysiert werden. Beispielsweise sind in einer küstennahen Ozeanaufnahme für den Geologen die Abbildung des Unterwasserreliefs des Festlandsockels, für den Ozeanologen die Abgrenzung und Interpretation unterschiedlicher Wassermassen und für den Meteorologen die Interpretation von vorhandenen Wolkenformationen von Interesse. Bei der jeweiligen thematischen Interpretation werden dabei die im Bild erkennbaren komplexen interdisziplinären Zusammenhänge berücksichtigt und durch Korrelation mit dem Erfahrungsschatz des Interpreten erschlossen. Zum Beispiel beeinflusst die Form des Festlandes und die Verteilung der Oberflächentemperatur der angrenzenden Wassermassen die Ausbildung von Wolkenformationen, diese wiederum können durch Abschattung eine unterschiedliche Erwärmung der Wassermassen und damit verschiedene physikalische und biologische Prozesse im Wasser verursachen.

Die Bildauswertung in der Geo-Fernerkundung besteht i. a. immer in der Analyse und Interpretation von solchen komplexen Wechselwirkungen, durch die die verschiedensten Geowissenschaften miteinander verknüpft werden. Dieser Interpretationsprozess ist i. a. nicht formalisierbar. Insofern erscheint in diesem Zusammenhang die Formulierung von speziellen thematischen Anforderungen an die Bildbearbeitung weniger sinnvoll. Erfolgversprechender ist die Ableitung von formalisierbaren, den speziellen thematischen Aspekten zugeordneten Merkmalen, die eine mathematisch-formale Beschreibung der entsprechenden physikalischen Meßdaten, die in Form der Bildfunktion vorliegen, ohne

direkte Erfassung der konkreten Interpretationsthematik erlauben.

Solche Merkmale können z. B. allgemeine geometrische Form- und Texturmerkmale, radiometrische Intensitätsmerkmale und statistische Parameter der Bildfunktion sein, wie beispielsweise Grauwertmittelwerte, Grauwertvarianzen, Autokorrelationsfunktionen, Kovarianzmatrizen usw. In diesem Zusammenhang sind die hauptsächlichsten, der thematischen Interpretation zugeordneten formalisierbaren Merkmale des o. g. Beispiels die geometrische Form des zu interpretierenden Bildinhaltes, nämlich das küstennahe Wassergebiet, die Homogenität dieses Teilaspektes der Bildfunktion, das radiometrische Intensitätsintervall und die Korrelationsbeziehungen zwischen den Daten der einzelnen Spektralbereiche.

Durch Berücksichtigung der dem Interpretationsziel zugeordneten allgemeinen Merkmale kann der naturwissenschaftlichen Interpretationsthematik letztlich durch Auswahl von entsprechenden Spektralbereichen, Intensitätsintervallen, lokalen Bildbereichen und durch Festlegung von Intervallen, in denen thematische Teilaspekte der Bildfunktion bestimmte statistische Eigenschaften haben, Rechnung getragen werden. Dadurch wird für die interpretationsgerechte Bildaufbereitung eine Abgrenzung eines bestimmten thematischen Bildinhaltes ermöglicht. In diesem Zusammenhang werden die Bildfunktionen im 4. Kapitel der Arbeit, z. B. bezüglich ihres qualitativen Homogenitätsgrades unterschieden.

2.5. Ableitung einer Aufgabenstellung zur interpretationsgerechten Aufbereitung der Multispektralinformation

Die gegenwärtig effektivste Form der Auswertung von Multispektralinformation ist ihre bildmäßige Darstellung und visuelle Interpretation durch einen auf bestimmte Fragestellungen trainierten Fachexperten. Der Interpretationsertrag ist dabei aber nicht frei von Faktoren, die durch subjektive physiologisch-psychologische Eigenschaften des Komplexes Auge-Gehirn und durch Fachkenntnisse bzw. den Erfahrungsschatz des Fotointerpreten bedingt werden. Während die Computertechnik, wie gezeigt wurde, kaum zur Optimierung des psychologischen Interpretations- und Denkvorganges im Gehirn eingesetzt werden kann, ist es jedoch möglich, bei der Bildaufbereitung verschiedenen physiologischen Besonderheiten des Auges bei der Reizaufnahme und einigen formalisierbaren Aspekten der naturwissenschaftlichen Thematik der Interpretation Rechnung zu tragen und somit auch indirekt auf die Faktoren der Bildwahrnehmung im Zentralnervensystem einzuwirken [7,30,53,55,61]. Das führt letztlich zur Erleichterung und zur Objektivierung der Interpretation und zur Erhöhung der Qualität und Quantität des Interpretationsertrages.

Die Darstellung der Multispektraldaten in Bildform unter Berücksichtigung der besonderen Eigenschaften des menschlichen Auges bei der Reizaufnahme aus zweidimensionalen Bildern und unter Berücksichtigung von bestimmten thematischen Interpretationszielen heißt "interpretationsgerechte Aufbereitung von Multispektraldaten".

Die gebräuchlichste und einfachste Form der interpretationsgerechten Aufbereitung von Multispektraldaten ist die Synthese von farbigen Bildern aus drei Schwarzweiß-Spektralauszügen mit Hilfe eines Multispektralprojektors. Dabei werden die Daten aus drei Schwarzweiß-Einzelkanälen auf einem einzigen Bild verdichtet und mit den Farben Rot, Grün und Blau codiert, so daß durch additive Farbmischung im Multispektralprojektor ein Farbbild entsteht, wobei im wesentlichen drei physiologische Besonderheiten des Komplexes Auge-Gehirn berücksichtigt werden:

1. Die Aufnahme aller Informationen aus einem Bild ist für den menschlichen Fotointerpretieren einfacher und objektiver möglich als aus mehreren Bildern.
2. Das menschliche Auge ist bei der Farbwahrnehmung etwa 10^4 mal empfindlicher als bei der Unterscheidung von Grauwerten.
3. Durch die Darstellung des Bildes in Falschfarben kann die räumliche Gliederung unterdrückt werden, was letztlich die Auswertung der multispektralen Bildinformation erleichtert.

Für die Synthese von Multispektralbildern gibt es dabei zwei grundsätzliche Aufgabenstellungen:

1. Herstellung von sogenannten Standardfarbsynthesen, die der Interpretation des Bildinhaltes unter dem Gesichtspunkt der Gewinnung von Übersichtsinformationen für verschiedene thematische Interpretationsziele dienen. Bei der Verarbeitung von MKF-6-Multispektralaufnahmen haben sich dazu die Spektralbereiche 540 nm, 660 nm und 840 nm als günstig erwiesen.
2. Herstellung von sogenannten Spezialfarbsynthesen eines Bildausschnittes, die für ein bestimmtes thematisches Interpretationsziel entwickelt werden. Der naturwissenschaftlichen Thematik der Interpretation kann dabei durch Auswahl von drei geeigneten Spektralbereichen und durch entsprechende Farbcodierung Rechnung getragen werden.

Bei der Interpretation von Standardfarbsynthesen besitzt der Fotointerpret nur wenige apriori Informationen über das Aufnahmegebiet; man spricht in diesem Zusammenhang von einer unüberwachten Bildanalyse. Für Standardfarbsynthesen ist es deshalb notwendig, eine einfache Zuordnung zwischen Bildfarbe und spektralem Remissionsverhalten der Objekte herzustellen, denn nur dann kann die subjektive traditionelle Erfahrung eines Fotointerpretieren für die Interpretation von Multispektraldaten genutzt werden. Bei der überwachten Bildanalyse ist das Aufnahmegebiet bereits durch Bodenbegehungen hinreichend erschlossen, so daß es oft nur noch darauf ankommt, bestimmte stoffliche Unterschiede und Erscheinungen durch Farbabgrenzungen auf dem Multispektralbild zu rayonieren bzw. mit den terrestrischen Messungen zu korrelieren. Diese Farbabgrenzungen lassen sich umso differenzierter und exakter vornehmen, je besser die Farbdifferenzierung für den interessierenden Bildinhalt ist [41,44]; deshalb ist die Hervorhebung der den spektralen Eigenschaften der abgebildeten Objekte entsprechenden Farbinformation gegenüber der Texturinformation von größerer Bedeutung.

Mit Hilfe von Multispektralprojektoren ist eine diesen Gesichtspunkten entsprechende interpretationsgerechte Bildaufbereitung möglich [36,61]. Allerdings sind dabei die Möglichkeiten der Bildaufbereitung schnell erschöpft, da ein Multispektralprojektor im Prinzip einen Analogrechner darstellt, dessen Rechenalgorithmus - die Gesetze der additiven Farbmischung - durch die Konstruktion fest vorgegeben ist und nicht geändert werden kann. Das hat den Nachteil, daß die Information aus höchstens drei Spektralbereichen auf einem Bild reproduzierbar verdichtet werden kann und daß einzelne Bildbereiche nicht unabhängig voneinander bearbeitet werden können. Bei modernen Computerverfahren zur Bildbearbeitung bestehen diese Nachteile nicht, so daß folgende allgemeine Anforderungen für die interpretationsgerechte Aufbereitung der Multispektraldaten zur überwachten Bildanalyse abgeleitet werden können:

1. Die Information aus allen für die thematische Interpretation bedeutenden Spektralbereichen eines Multispektral-Aufnahmesatzes sollen auf ein Farbbild reduziert sein. Das bedeutet, daß je nach Interpretationsziel auch mehr als drei Spektralbereiche in einem Farbbild ohne wesentliche Informationsverluste verdichtet sein können.
2. Spezialsynthesen müssen der Forderung nach hoher Farbdifferenzierung innerhalb des durch die Interpretationsthematik bestimmten Bildinhaltes entsprechen. Dabei ist der Farbabstand zwischen einzelnen abgebildeten Objekten zu vergrößern, was insbesondere für Rayonierungsaufgaben von Bedeutung ist.
3. Effekte des Simultankontrastsehens, die die Objektivität der Interpretation beeinträchtigen, sollen vernachlässigbar sein.
4. Bei Spezialfarbsynthesen soll die Information bereits soweit reduziert sein, daß entsprechend dem Interpretationsziel die Wahrnehmung von spektralen bzw. stofflichen Unterschieden der abgebildeten Objekte erleichtert wird.

Während die erste Forderung die thematisch orientierte Datenvorauswahl mit anschließender mathematischer Informationsverdichtung beinhaltet, bedürfen die zweite, dritte und vierte Anforderung der Berücksichtigung der physiologisch-psychologischen Eigenschaften des Komplexes Auge-Gehirn bei der Reizaufnahme aus Farbbildern. Der Farbabstand zwischen zwei abgebildeten Objekten ist eine Größe, die der Strecke der beiden Objektfarben im empfindungsgerechten Farbdreieck entspricht. Durch Anwendung der empfindungsgerechten Farbmeterik zur Erhöhung der Farbdifferenzierung werden Farbwahrnehmungseigenschaften des Auges Rechnung getragen. Die qualitative Forderung nach Erhöhung der Farbdifferenzierung entspricht der mathematisch exakten Forderung nach Optimierung der Entropie, des Farbbildes. Durch Vergrößerung der Farbdifferenzierung im Bild wird außerdem die räumliche Gliederung und im Extremfall sogar die Texturinformation unterdrückt, so daß letztlich auf Grund dieser Informationsreduktion dem Zentralnervensystem für die Bildinterpretation nur noch die Multispektralinformation zur Verfügung steht. Das entspricht einer Konzentration des Komplexes Auge-Gehirn auf den wichtigsten Informationsgehalt von Multispektralbildern.

Simultan-Kontrasterscheinungen, die durch die Wirkung des Auges als lineare Hochpaßfilter hervorgerufen werden, können bei einer hohen Farbdifferenzierung, die gleich-

bedeutend mit einem großen Farbabstand zwischen benachbarten Objekten ist, vernachlässigt werden, da sie im Vergleich dazu nur zu sehr kleinen Farbänderungen führen.

Durch Einbeziehung aller wichtigen auf dem Multispektralaufnahmesatz enthaltenen spektralen Informationen und durch Verbesserung der Farbdifferenzierung bei der interpretationsgerechten Aufbereitung von Multispektralinformation können somit subjektive Faktoren der Interpretation unterdrückt werden, was letztlich zur Erhöhung der Objektivität, der Qualität und Quantität des Interpretationsertrages beiträgt.

3. Verfahren der digitalen und kombinierten digital-analogen Bildbearbeitung zur interpretationsgerechten Aufbereitung von MKF-6-Multispektralfotografien

3.1. Grundlagen der Bildbearbeitung

Unter dem Begriff "Bildbearbeitung" werden definierte mathematische Operationen verstanden, die in irgendeiner Weise auf die zweidimensionale Bildfunktion angewandt werden und zur Änderung dieser Bildfunktion führen. Die Hauptanwendungsgebiete der Bildbearbeitung sind die visuelle Bildverbesserung (interpretationsgerechte Bildaufbereitung), die Bildrestaurierung und die automatische Bildauswertung.

Bei der Bildrestaurierung werden systembedingte Fehler, die bei der Bildaufnahme entstehen, kompensiert, so daß im Endergebnis eine Bildfunktion entsteht, die frei von Fehlern des gesamten Aufnahmesystems ist. Die Bildrestaurierung trägt insofern rein mathematisch-physikalischen Charakter. Bei der automatischen Bildauswertung werden vollständig formalisierbare inhaltliche Aussagen aus der mathematischen Bildfunktion abgeleitet und als konkretes thematisches Interpretationsergebnis dargestellt. Die Bildbearbeitung zum Zwecke der gezielten Informationsänderung zur Verbesserung der visuellen Interpretierbarkeit der Bilder trägt physiologischen Charakter. Dieser Zweig der Bildbearbeitung hat im gegenwärtigen Stadium der empirischen Gewinnung von Informationen aus Fernerkundungsdaten die größte Bedeutung.

Zur technischen Realisierung von Verfahren der Bildbearbeitung stehen prinzipiell zwei Geräteklassen zur Verfügung: die analogen und die digitalen Rechenanlagen. Während Analogrechner gegenüber Digitalrechnern den Vorteil besitzen, die riesige Informationsmenge eines Bildes sehr schnell zu verarbeiten, ist bei ihnen die Flexibilität der ausführbaren definierten mathematischen Operation jedoch sehr begrenzt, so daß sie nur bei speziellen Teilproblemen der Bildbearbeitung zur Anwendung kommen; zum Beispiel bei der Durchführung der Fouriertransformation mit Hilfe analoger Laser-optischer Bildprozessoren. Die digitale Bildbearbeitung bietet hingegen nahezu unbegrenzte Möglichkeiten der Anwendung von mathematischen Operationen auf Bilder, die lediglich durch den Rechenzeitaufwand begrenzt werden. Für die interpretationsgerechte Aufbereitung von aerokosmischen Multispektralaufnahmen spielen die digitale Bildbearbeitung mit Computern und die analog-optische Bildbearbeitung mit Multispektralprojektoren eine wesentliche Rolle. Die Kombination dieser Technologien zu einem offline Hybridsystem mit digitaler Bildvorverarbeitung und analog-optischer Endbearbeitung hat dabei besondere Bedeutung, weil die Realisierung bereits mit relativ ein-

fachen Mitteln möglich ist.

3.1.1. Grundbegriffe der digitalen Bildbearbeitung

Eine ausführliche Darstellung der Grundlagen der Bildbearbeitung findet man in [6, 7, 8, 11, 30, 46, 47, 66]. Die digitale Bildbearbeitung erfolgt mit Hilfe von programmierbaren Computern. Dazu ist es erforderlich, das i. a. in analoger Form vorliegende Bild zu digitalisieren und in eine für den Rechner lesbare Form zu bringen. Dazu wird das Bild Punkt für Punkt zeilenweise abgetastet und entweder direkt als Grauwertmatrix im Computer oder zeilenweise auf Magnetband bzw. -platte abgespeichert. Die Bildabtastung kann mit einem gebündelten Lichtstrahl oder einem Laserstrahl, der zeilenweise über das Bild geführt wird, erfolgen. Für jeden Bildpunkt wird die Lichtintensität mit einem SEV gemessen. Das dabei gewonnene analoge Signal wird anschließend digitalisiert. Das Grauwertunterscheidungsvermögen wird wesentlich durch die Empfindlichkeit und das Rauschen des SEV bestimmt. Bei einer Größe der Abtastpunkte von $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ und bei vertretbaren Abtastzeiten sind gegenwärtig ca. 256 Graustufen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,6$ unterscheidbar. Das für die vorliegende Arbeit verfügbare Abtastsystem bestand aus einem kommerziellen Trommelscanner, bei dem mit einer speziellen Vorrichtung jeweils ein Schwarzweißbild des 6-kanaligen Aufnahmesatzes der Multispektralkamera MKF-6 auf eine Trommel gespannt wird. Durch Drehen der Trommel wird das Bild zeilenweise in x-Richtung durch einen in y-Richtung verschiebbaren Fotometerarm bewegt, so daß das gesamte Bild fotometrisch abgetastet werden kann. Die geometrische Auflösung des Scanners beträgt wahlweise 50, 100 und $200 \mu\text{m}$, bei einer radiometrischen Auflösung von 256 Graustufen. Mit diesem Abtastsystem sind ein Minicomputer des Typs LSI 2 mit einem 32K-Kernspeicher und weitere periphere Datenspeicher im on-line Betrieb gekoppelt.

Das auf ein peripheres Speichergerät geschriebene digitale primäre Bild kann je nach Bildgröße zeilenweise oder als Bildmatrix in den Kernspeicher des Computers eingelesen und danach verarbeitet werden. Der Aufpunkt (i, j) dieses Primärbildes wird dabei eindeutig gekennzeichnet durch die Angabe der Nummer der Abtastzeile (i) und der Abtastspalte (j) , Der Grauwert a_{ij} jedes Bildpunktes gehört infolge der Quantisierung einer endlichen Menge G von Graustufen an.

$$B = \left[(i, j) \mid 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n, a_{ij} \in G \right]$$

und ist i. a. normiert auf das Intervall Weiß bis Schwarz; außerhalb des Bildes ist $a \equiv 0$. Der Wertebereich der Bildpunktkoordinaten entspricht dem Bildfeld. Die Abhängigkeit des Grauwertes von den Bildpunktkoordinaten heißt zweidimensionale digitale Bildfunktion.

Eine digitale Bildoperation bezüglich des Aufpunktes (i, j) ist eine Verknüpfung Φ bestimmter Bildpunkte, deren Ergebnis dem Aufpunkt des Sekundärbildes zugewiesen wird. Dabei unterscheidet man nach lokalen und punktbezogenen Operationen.

Bei den lokalen Operationen treten die Bildpunkte einer Nachbarschaft $i-\mu \dots i+\mu$, $j-\nu \dots j+\nu$ des Aufpunktes i, j als Argument auf; das Ergebnis bildet den neuen Wert a_{ij}^* von (i, j) :

$$a_{ij}^* = \Phi \left[a_{kl} \mid k = i-\mu \dots i+\mu, l = j-\nu \dots j+\nu \right].$$

Φ wird als lokaler Operator und der Indexbereich als Operatorfeld bezeichnet. Bei punktbezogenen Operationen ist der Indexbereich des Operators Null, d. h. der Wert des Aufpunktes (i, j) im Sekundärbild berechnet sich durch Anwendung mathematischer Operationen auf den ihm geometrisch identischen Bildpunkt des Primärbildes.

$$a_{ij}^* = \Phi \left[a_{ij} \right]$$

Mathematische Operatoren Φ können weiterhin danach unterschieden werden, ob sie orts- bzw. informationsabhängig sind oder nicht. Ist ein Operator ortsabhängig, so gilt

$$a_{ij}^* = \Phi_{ij} \left[a_{kl} \mid k = i-\mu \dots i+\mu, l = j-\nu \dots j+\nu \right]$$

und Φ_{ij} heißt inhomogen. Ist $\Phi_{ij} = \Phi$, also räumlich stationär, so heißt Φ homogen. Die Ausführung einer lokalen Operation für eine bestimmte Aufpunktmenge wird auch als Bildtransformation bezeichnet.

Das Sekundärbild kann vom Rechner direkt über einen Bildschreiber ausgegeben oder auf einem Peripheriespeicher zwischengespeichert werden. Bildschreiber besitzen i. a. Lumineszenzdiolen, die mit der Bildfunktion moduliert werden und das Sekundärbild zeilenweise auf ein lichtempfindliches Medium ausschreiben.

3.1.2. Analog-optische Bildbearbeitung mit Multispektralprojektoren

Multispektralprojektoren dienen im wesentlichen der interpretationsgerechten Aufbereitung von analogen Schwarzweiß- Multispektralaufnahmen, die die Erdoberfläche in verschiedenen Spektralbereichen fotografiert wiedergeben [33, 34, 40, 80]. Drei dieser getrennten Schwarzweißbilder werden im Multispektralprojektor kongruent auf eine Mattscheibe projiziert und dabei durch Einschalten von Farbfiltern in jeden Projektionskanal mit den Farben Rot, Grün und Blau codiert (Abb. 7). Auf der Mattscheibe des Projektors entsteht dann durch additive Farbmischung ein farbiges Bild.

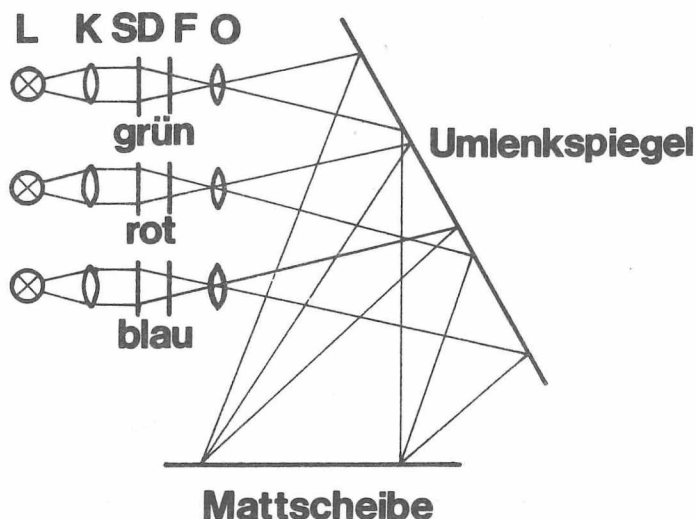


Abb. 7 Funktionsprinzip von Multispektralprojektoren

Die Farbe eines Bildpunktes im Sekundärbild wird bestimmt durch die spektrale Durchlaßkurve der Filter $\tau_i(\lambda)$, durch die spektrale Strahldichtevertellung $S_i(\lambda)$ der Projektionslampen und durch die Transparenzen T_i der entsprechenden Bildpunkte in den drei Primärbildern [15]. i bedeutet die Kanalzahl, $i = 1 \dots 3$. Zur Berechnung der Farbwerte bzw. Farbwertanteile im Sekundärbild ist es deshalb erforderlich, die Farbwerte des Lichtes zu bestimmen, mit dem die Primärbilder durchstrahlt werden.

Der Zusammenhang zwischen diesen rein physikalischen Angaben und dem rein physiologischen Charakter der entstehenden Mischfarbe kann über die Normspektralwerte $X(\lambda)$, $Y(\lambda)$, $Z(\lambda)$ hergestellt werden. Für die Farbwerte des Projektionslichtes im Kanal i gilt dann:

$$\begin{aligned} X_i &= \sum_{\lambda} S_i(\lambda) \cdot \tau_i(\lambda) \cdot \bar{X}(\lambda) \\ Y_i &= \sum_{\lambda} S_i(\lambda) \cdot \tau_i(\lambda) \cdot \bar{Y}(\lambda) \\ Z_i &= \sum_{\lambda} S_i(\lambda) \cdot \tau_i(\lambda) \cdot \bar{Z}(\lambda) \end{aligned}$$

Speziell für die Verarbeitung von Multispektralaufnahmen der Kamera MKF-6 wurde vom VEB Carl Zeiss Jena der Multispektralprojektor MSP 4 entwickelt. Dieser Multispektralprojektor hat 4 Projektionskanäle. Der 4. Projektionskanal dient der Erweiterung der Möglichkeiten zur experimentellen Bestimmung von 3 zur interpretationsgerechten Bildaufbereitung geeigneten Spektralbereichen. Die Verwendung des 4. Projektionskanals zur Farbmischung mit 4 Spektralbereichen und 4 Codefarben kann zwar zur einer scheinbaren Farbverbesserung des entsprechenden Mischbildes führen, die Farbcodierung ist dabei jedoch nicht mehr eindeutig.

Bei diesem Farbmischprozeß kann der Multispektralprojektor als Analogrechner aufgefaßt werden, der auf alle Punkte der getrennten Primärbilder die mathematischen Gesetze der additiven Farbmischung kontinuierlich anwendet und allen Bildpunkten des Sekundärbildes entsprechende Farben zuweist. Der Wertevorrat der Farben wird dabei bestimmt durch die zur Codierung verwendeten Farbfilter. Geometrisch läßt sich dieser Wertevorrat veranschaulichen durch die Fläche zwischen den äußeren Verbindungsgeraden der Filterpunkte im Farbdreieck.

Für ausgewählte Filter des Multispektralprojektors MSP 4 ergeben sich mit der Näherung, daß die spektrale Strahldichtevertelung durch das Strahlungsgesetz des Schwarzen Körpers bei 3400 K beschrieben werden, folgende Farbwerte:

| Kanal | X | Y | Z |
|----------|-------|-------|-------|
| 1 (grün) | 0,104 | 0,489 | 0,091 |
| 2 (blau) | 0,764 | 0,547 | 3,155 |
| 3 (rot) | 0,718 | 0,282 | 0,000 |

Werden in drei Kanälen drei Objektflächen mit den Transparenzen T_1, T_2, T_3 auf dem Projektionsschirm übereinander abgebildet und wird dabei jedem Kanal eine Farbe, die durch die Farbwerte X_i, Y_i, Z_i definiert ist, zugeordnet, so entsteht eine Mischfarbe, die sich mathematisch durch Anwendung des 2. Graßmannschen Gesetzes beschreiben läßt.

Die Farbwerte dieser Mischfarbe sind:

$$X_M = T_1 \cdot X_1 + T_2 \cdot X_2 + T_3 \cdot X_3$$

$$Y_M = T_1 \cdot Y_1 + T_2 \cdot Y_2 + T_3 \cdot Y_3$$

$$Z_M = T_1 \cdot Z_1 + T_2 \cdot Z_2 + T_3 \cdot Z_3;$$

wobei sich die Indizes auf die Numerierung der Kanäle beziehen. Die Farbwertanteile der Mischfarbe sind

$$x_M = \frac{T_1 \cdot X_1 + T_2 \cdot X_2 + T_3 \cdot X_3}{T_1 \cdot (X_1 + Y_1 + Z_1) + T_2 \cdot (X_2 + Y_2 + Z_2) + T_3 \cdot (X_3 + Y_3 + Z_3)}$$

$$y_M = \frac{T_1 \cdot Y_1 + T_2 \cdot Y_2 + T_3 \cdot Y_3}{T_1 \cdot (X_1 + Y_1 + Z_1) + T_2 \cdot (X_2 + Y_2 + Z_2) + T_3 \cdot (X_3 + Y_3 + Z_3)}$$

3.1.3. Kombinierte analog-optische Bildbearbeitung

Viele Aufgaben der Bildverarbeitung sind mit Analogrechnern effektiver, billiger und genauer ausführbar, als mit digitalen Computern. International diskutiert man deshalb bereits jetzt über Hybridsysteme, die eine Kombination von Digital- und Analogrechnern im on-line Betrieb darstellen und vor allem bei umfangreichen komplizierten Bildtransformationen eingesetzt werden können.

Bei der interpretationsgerechten Aufbereitung von Bildfunktionen spielt die Darstellung des Sekundärbildes als Farbbild eine dominierende Rolle. Diese Bildausgabe wird i. a. realisiert durch Farbbildschreiber und Farbdisplays. Der Wertevorrat an Farben und die geometrische Genauigkeit der ausgegebenen Bilder ist dabei für viele Aufgabenstellungen noch unzureichend. Den höchsten Anforderungen an die Qualität des Farbbildes kann durch eine kombinierte analog-optische Bildbearbeitung Rechnung getragen werden. Durch digitale Vorverarbeitung im Computer können die primären Multispektraldaten so aufbereitet werden, daß drei sekundäre Schwarzweißbilder entstehen, die durch Farbmischung im Multispektralprojektor zu einem geometrisch und radiometrisch exakten farbigen Bild weiterverarbeitet werden können. Diese Technologie entspricht der Verarbeitung mit einem off-line Hybridsystem, das mit relativ einfachen Mitteln realisierbar ist. Bei der Ausgabe der drei sekundären Schwarzweißbilder mit einem Schwarzweißbild-Schreiber sind i. a. 64 digitale Graustufen unterscheidbar. Durch Kombination dieser 64 Graustufen können im Farbmischprojektor theoretisch 262144 verschiedene Farben entstehen.

3.2. Aufbereitung von MKF6-Multispektralfotografien zur Verarbeitung auf numerischen Rechenanlagen

Mit der Multispektralkamera MKF-6 wird die Erdoberfläche in 6 Spektralbereichen fotografisch erfaßt. Als Primärbild für die Bildverarbeitung liegt demzufolge ein multispektraler Aufnahmesatz von 6 geometrisch identischen analogen Schwarzweißbildern vor. Zur Weiterverarbeitung auf numerischen Rechenanlagen ist die gesamte Information des multispektralen Aufnahmesatzes in eine für den Computer lesbare und den Anforderungen des Datentransfer entsprechende Form zu bringen. Die einfachste Möglichkeit besteht dabei in der Digitalisierung der einzelnen Spektralauszüge und ihrer getrennten Speicherung auf 6 verschiedenen peripheren Speichergeräten. Das setzt jedoch voraus, daß mindestens 6 periphere Speicher an den Computer angeschlossen sind. Außerdem sind komplizierte Prozeduren und Technologien zum Datentransfer erforderlich, was sich letztlich ungünstig auf ein operatives Arbeiten beispielsweise beim Dialog zwischen Mensch und Computer oder beim Anlegen von Bildbibliotheken auswirkt. Zweckmäßig ist es, die gesamte Multispektralinformation auf einem peripheren Speicher, z. B. auf Magnetband abzuspeichern. Die Datenstrukturierung kann dabei so erfolgen, daß auf dem Magnetband für jeden Bildpunkt 6 Zahlenwerte hintereinander abgespeichert werden, die den Schwärzungen der geometrisch identischen Bildpunkte der 6 Spektralbereiche entsprechen.

Zur digitalen Abspeicherung von 256 Graustufen sind 8 bit Speicherplatz erforderlich. Zur Speicherung der Multispektralinformation eines Bildpunktes werden 48 bit benötigt. Dem entsprechen 3 Wörter bei einer Wortlänge von 16 bit. Nach jeweils drei Wörtern wird also ein neuer Bildpunkt abgespeichert. Diese Art der Datenstruktur wird als "Multispektralfile" bezeichnet und hat den Vorteil, daß von einem einzigen peripheren Speicher die gesamte Multispektralinformation in den Rechner eingelassen werden kann. Das bedeutet letztlich eine erhebliche Verkürzung des Zeitaufwandes zur Datenübertragung und führt zur Vereinfachung der Programmstruktur. Zum Aufbau eines Multispektralfiles gibt es verschiedene technische Realisierungen, die im wesentlichen be-

stimmt werden durch den Umfang der zur Verfügung stehenden Computeranlage.

Zur Realisierung eines Multispektralfiles mit zwei an einen Computer angeschlossenen Magnetbaineinheiten wurde folgende Technologie entwickelt: Zunächst werden alle 6 Spektralauszüge mit einer speziellen Vorrichtung auf Paßkreuze justiert. In den Bildrand werden mit einem Präzisionslocher zwei Paßlöcher gestanzt. Danach werden die Spektralauszüge einzeln mit diesen Löchern auf Paßstifte in eine Scanvorrichtung eingespannt und digitalisiert. Vor dem Abscannen der Bilder erfolgte eine Vorjustierung, mit einem speziellen Programmsystem wurden die Bilder im Rechner numerisch nachjustiert. Das so entstandene Magnetband dient als primärer Datenträger für den Aufbau des Multispektralfiles.

In einem ersten Programmzyklus werden die Daten des ersten Spektralbereiches auf ein zweites Magnetband so ausgeschrieben, daß nach jeder Bildzeile 5 Bildzeilen auf dem zweiten Magnetband freigelassen werden. In die freien Plätze werde in darauffolgenden Programmdurchläufen die Bildzeilen der Spektralbereiche 2-6 eingeschrieben, wobei jedesmal die bereits ausgeschrieben und die noch reservierten Bildzeilen übersprungen werden. Als Ergebnis entsteht auf dem zweiten Magnetband eine Struktur, bei der die Bildzeilen aller Spektralbereiche nacheinander angeordnet sind. In einem zweiten Programmzyklus werden von diesem Magnetband jeweils 6 Bildzeilen in den Kernspeicher des Rechners eingelesen und die Daten nach der Umsortierung in einer Zeile in Form eines Multispektralfiles auf dem ersten Magnetband wieder ausgeschrieben. Man erhält somit einen auf Magnetband abgespeicherten Multispektralfile, der als primäres Datenmaterial bei allen multispektralen Bildverarbeitungsoperationen zeilenweise in den Rechner eingelesen werden kann. Der Vorteil des Verfahrens besteht in relativ geringen Anforderungen an den Umfang der Computeranlage bei einem vertretbaren Rechenzeitaufwand. Außerdem ermöglicht diese Form der Datenorganisation als Multispektralfile einen schnellen Datenzugriff bei den Prozeduren zur interpretationsgerechten Bildaufbereitung.

3.3. Anwendung der Hauptachsentransformation zur Datenverdichtung bei MKF-6-Multispektralaufnahmen

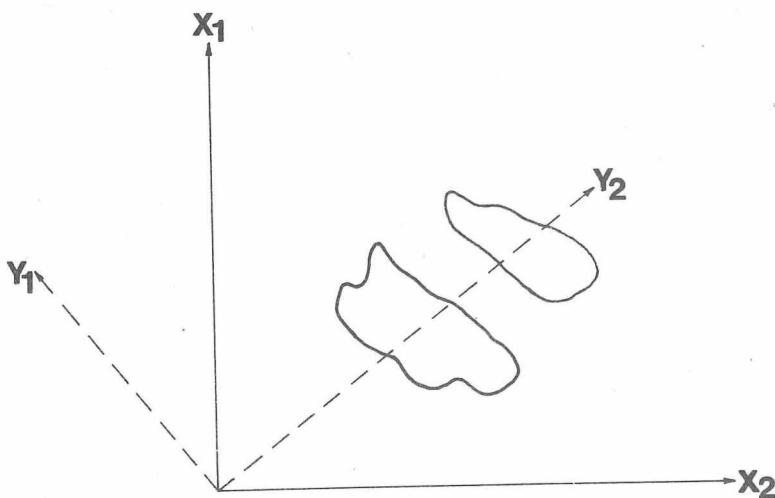
Entsprechend der im zweiten Kapitel erarbeiteten Aufgabenstellung zur interpretationsgerechten Aufbereitung von Multispektralinformation ist es oft erforderlich, die in mehreren Spektralauszügen enthaltenen Informationen auf wenige Schwarzweißbilder zu verdichten und dabei redundante Information zu beseitigen. Das bedeutendste Verfahren ist dabei die Transformation der multispektralen Bildinformation auf sogenannte Hauptkomponenten (Principal Component Transformation). In der Literatur wurden solche Transformationen beschrieben und bereits auf Aufnahmen der amerikanischen Satellitenserie ERTS angewandt [14,21,59,81]. Dabei konnte fast die gesamte Information (98%) der vierkanaligen ERTS-Aufnahmesätze in zwei Hauptkomponenten wiedergegeben werden. Das bedeutet bei nur 2 % Informationsverlust eine 50%-ige Datenverdichtung.

Ähnliche interessante Ergebnisse sind auch an 6-kanaligen MKF-6-Multispektralaufnahmen zu erwarten und sollen hier diskutiert werden.

3.3.1. Mathematisch-physikalische Grundlagen der Hauptachsentransformation von multispektralen Abbildungen

Alle Objekte der Erdoberfläche besitzen typische spektrale Reflexionseigenschaften, was zu unterschiedlichen Schwärzungen der Objekte in den einzelnen Spektralkanälen führt. In einem mehrdimensionalen orthogonalen Koordinatensystem, dessen Komponenten den Schwärzungen in den einzelnen Spektralbereichen entsprechen, wird ein Objekt auf Grund seiner spektralen Eigenschaften durch einen Punkt oder eine Punktwolke bestimmt. Ein solches Koordinatensystem spannt einen Merkmalsraum auf.

Das Ziel der Hauptachsentransformation ist es, durch lineare Transformation dieses Vektorraumes, also Drehung und Verschiebung, einen neuen Vektorraum zu konstruieren, bei dem unnütze Komponenten weggelassen werden und eine Dimensionsreduzierung erreicht wird [46]. In Abb. 8 wird das verdeutlicht. In diesem zweidimensionalen Beispiel müssen



im Koordinatensystem X_1X_2 beide Komponenten zur vollständigen Trennung der Merkmalsklassen C_i und C_u ausgewertet werden; im gedrehten und verschobenen System Y_2 ist Y_1 zur Klassentrennung überflüssig, was einer Dimensionsreduzierung um 50 % entspricht.

Abb. 8 Dimensionsreduktion; Im neuen Koordinatensystem der Y_1, Y_2 reicht Y_2 allein aus, um die beiden Klassen C_i und C_u zu trennen.

Mathematisch kann die lineare Transformation eines alten Koordinatensystems der $X_1 \dots X_n$ in ein neues Koordinatensystem der $Y_1 \dots Y_n$ durch eine Linearkombination beschrieben werden:

$$\mathcal{e} = A \cdot \mathcal{y}$$

$$\mathcal{e}^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad \mathcal{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

\mathcal{e}^T ist ein Zeilenvektor im alten, \mathcal{y} ein Spaltenvektor im neuen System und A eine Transformationsmatrix, wobei die Spaltenvektoren der Transformationsmatrix die Basisvektoren des neuen Systems bilden. Bei der Hauptachsentransformation sind nun die Elemente der Transformationsmatrix so zu bestimmen, daß der mittlere quadratische Beschreibungsfehler von \mathcal{e} minimal wird, wenn zur Beschreibung von \mathcal{e} nur die erste μ Komponenten benutzt werden.

$$F_{\mu} = E \left[(\mathcal{e} - \sum_{j=1}^{\mu} \vec{a}_j \cdot y_j)^2 \right] \longrightarrow \text{Minimum}$$

Außerdem ist bei einer Transformation wie in Abb. 3.2. gefordert, daß das neue Koordinatensystem wieder orthonormal ist, also

$$\vec{a}_i \cdot \vec{a}_k = \begin{cases} 1 & \text{für } i = k \\ 0 & \text{für } i \neq k \end{cases}$$

gilt.

Durch weitere mathematische Umformung läßt sich diese Extremwertaufgabe auf die Lösung eines Eigenwertproblems zurückführen.

$$(K - \lambda_j \cdot \mathcal{E}) \vec{a}_j = 0 \quad j = 1 \dots n$$

wobei K die Kovarianzmatrix des Originalvektorraumes und \mathcal{E} die Einheitsmatrix bedeuten. λ_j sind Eigenwerte und \vec{a}_j Eigenvektoren des zu lösenden Eigenwertproblems. Nach der Lösung des Eigenwertproblems sind die Eigenvektoren \vec{a}_j bekannt, und die neue datenverdichtete Multispektralabbildung kann durch einfache Linearkombination berechnet werden.

$$y_j = \sum_{i=1}^n a_{ji} \cdot x_i \quad j = 1 \dots n$$

3.3.2. Technische Realisierung der Hauptachsentransformation für Multispektraldaten

Die multispektralen Primärdaten werden vom Magnetband "1" eingelesen und in einem ersten Programmzyklus die Varianzen V_i und die Korrelationskoeffizienten r_{ij} der einzelnen Kanalkombinationen gebildet.

$$V_i = \sum_{k=1}^n (a_k - \bar{a})^2 \quad (\text{Varianz der Grauwerte } a \text{ im Kanal } i.)$$

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n V_{ik} \cdot V_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n V_{ik}^2 \cdot \sum_{k=1}^n V_{jk}^2}} \quad (\text{Korrelationskoeffizient für die Kanal- kombination } i, j)$$

Durch entsprechende Normierung kann aus den Korrelationskoeffizienten die Korrelations- bzw. Kovarianzmatrix bestimmt werden. Zur Lösung des Eigenwertproblems bei der Hauptachsentransformation wurden von vielen Autoren bereits unterschiedliche Verfahren der numerischen Mathematik angewandt. Bekannte Verfahren wurden von Hessenberg, Krylow und Samuelson [22] entwickelt. Für die Lösung des Problems mit Rechenautomaten sind Iterationsmethoden vorteilhaft. Hier sind der QD-Algorithmus und das Jacobische Verfahren von Bedeutung. Beim Jacobischen Verfahren wird die Kovarianzmatrix einer Reihe von Ähnlichkeitstransformationen unterzogen, so daß als Ergebnis eine Diagonalmatrix entsteht, die die gesuchten Eigenwerte auf der Hauptdiagonalen enthält. Das Verfahren ist dabei folgendes:

Ausgehend von der ursprünglichen Kovarianzmatrix K konstruiert man eine Folge von Matrizen $K^{(1)}, K^{(2)}, \dots$, wobei jede Matrix durch Transformation mit einer orthogonalen Rotationsmatrix aus ihrer vorhergehenden Matrix entsteht. Die Rotationsmatrizen werden dabei so gewählt, daß die Matrizen $K^{(k)}$ für $k \rightarrow \infty$ gegen eine Diagonalmatrix konvergieren. Die oben angegebene Eigenwertgleichung ist gleichbedeutend mit:

$$\det(K - \lambda_j \cdot E) = \begin{vmatrix} K_{11} - \lambda_1 & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} - \lambda_2 & \dots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} - \lambda_n \end{vmatrix} = 0$$

Wird die Matrix K zur Diagonalmatrix rotiert, so ergibt sich

$$(K_{11}^{(k)} - \lambda_1) (K_{22}^{(k)} - \lambda_2) \dots (K_{nn}^{(k)} - \lambda_n) = 0$$

Da diese Gleichung für alle Eigenwerte erfüllt sein muß, stehen in ihrer Hauptdiagonalen die Eigenwerte des Eigenwertproblems. Die Eigenvektoren können durch Ausmultiplizieren der Rotationsmatrizen näherungsweise bestimmt werden. Bei der technischen Realisierung des Bildbearbeitungsprogramms zur Hauptachsentransformation wird die Eigenwertaufgabe

im zweiten Programmabschnitt unmittelbar nach der Bestimmung der Kovarianzmatrix gelöst. Anschließend wird eine Transformationstabelle berechnet, die alle möglichen Produkte $a_{ij}x_j$ aus Eigenvektoren und Grauwerten (0 bis 255) angibt. Dadurch wird erreicht, daß im dritten Programmabschnitt bei der Ausführung der Bildtransformation für jeden Bildpunkt sechs Produktbildungen eingespart werden, und nur noch sechs einfache INTEGER-Additionen erforderlich sind. Das hat eine erhebliche Zeiteinsparung zur Folge, was letztlich die Hauptachsentransformation für die praktische Nutzenanwendung überhaupt praktikabel macht. Das Ergebnis wird auf einem zweiten Magnetband als Multispektralfile ausgeschrieben.

3.3.3. Beispiel zur Hauptachsentransformation von MKF-6-Multispektralaufnahmen

Das Programm zur Hauptachsentransformation wurde unter anderem an einem Ausschnitt einer Multispektralaufnahme des Nordteils der DDR (LFB-Nr. 105/77, Aufnahmehöhe ca. 250 km) getestet. Die einzelnen Spektralauszüge (Abb. 3.3.) wurden dazu in eine Bildmatrix mit 300 Bildzeilen und 540 Bildspalten mit einer Pixelgröße von $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ zerlegt und als Multispektralfile auf Magnetband abgespeichert. Die berechneten Grauwertmittel der einzelnen Spektralbereiche sowie die Kovarianz- und Korrelationsmatrix dieser Multispektralaufnahme sind in Tabelle 1 wiedergegeben.

Tabelle 1: Statistische Werte des Ausschnittes der Multispektralaufnahme der Ostseeküste der DDR

Grauwertmittel der Kanäle 1-6:

| | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 149.43 | 148.73 | 138.06 | 151.28 | 101.55 | 113.51 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|

Kovarianzmatrix:

| | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
| 1987.81 | 1290.69 | 1003.15 | 1374.32 | 729.89 | 811.60 |
| 0.00 | 1223.10 | 909.67 | 1186.96 | 602.62 | 864.64 |
| 0.00 | 0.00 | 767.52 | 954.47 | 472.41 | 632.99 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1467.02 | 636.95 | 795.97 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 564.89 | 980.62 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2575.89 |

Korrelationsmatrix:

| | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|
| 1.00 | .83 | .81 | .80 | .69 | .36 |
| 0.00 | 1.00 | .94 | .89 | .72 | .49 |
| 0.00 | 0.00 | 1.00 | .90 | .72 | .45 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | .70 | .41 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | .81 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 |

Auf der Hauptdiagonalen der Kovarianzmatrix befinden sich die Grauwertvarianzen in den einzelnen Spektralbereichen. Die größten Standardabweichungen liegen mit 44,60 und 50,7 in den Kanälen 1 und 6, die niedrigsten Varianzen in den Kanälen 3 und 5 vor.

Durch Normierung kann aus der Kovarianzmatrix die Korrelationsmatrix berechnet werden. Die Koeffizienten der Korrelationsmatrix sind ein Maß der Identität zweier Spektralauszüge. Ein Korrelationskoeffizient von 1,0 bedeutet, daß zwei Spektralbereiche bezüglich ihres Informationsgehaltes völlig identisch sind, bei einem Korrelationskoeffizient von null sind die beiden Bilder entkorreliert und besitzen keine gemeinsame Information.

Aus Tabelle 1 wird erkennbar, daß beim betrachteten Beispiel die größte Korrelation jeweils zwischen spektral benachbarten Spektralauszügen vorliegt. Die geringste Korrelation besteht zwischen den Kanälen 1 und 6.

In Tabelle 2 sind die aus der Kovarianzmatrix berechneten Eigenwerte und Eigenvektoren dargestellt.

Tabelle 2: Ergebnisse des Eigenwertproblems zur Hauptachsentransformation des betrachteten Beispiels

Eigenwerte:

6066.06
1853.80
382.60
158.37
74.22
51.17

Eigenvektoren:

| | | | | | |
|-----|------|------|------|------|------|
| .50 | -.37 | -.76 | -.04 | -.15 | .08 |
| .42 | -.18 | .29 | .64 | -.12 | -.53 |
| .32 | -.16 | .29 | .31 | .34 | .76 |
| .44 | -.26 | .49 | -.67 | -.22 | -.06 |
| .27 | .16 | -.10 | -.20 | .86 | -.34 |
| .45 | .84 | -.05 | .01 | -.26 | .12 |

Aus den Eigenwerten läßt sich ableiten, daß ca. 71 % der Gesamtvarianz und damit näherungsweise auch der gesamten Information der Multispektralaufnahme in der 1. Hauptkomponente, 21,5 % in der 2. Hauptkomponente, ca. 44 % in der 3. Hauptkomponente, ca. 1,8 % in der 4. Hauptkomponente und näherungsweise keine Informationen in der 5. und 6. Hauptkomponente enthalten sind. Damit sind bereits ca. 92 % der Gesamtinformation der Multispektralaufnahme in zwei Schwarzweißbildern darstellbar, was einer erheblichen Datenreduktion entspricht. Eine einfache Addition der Varianz- bzw. Informationsanteile in den einzelnen Hauptkomponenten begründet sich mathematisch dadurch, daß Hauptkomponenten miteinander nicht korreliert sind.

In Tabelle 3 sind Grauwertmittel, Kovarianz- und Korrelationsmatrix des auf Hauptachsen transformierten Bildes dargestellt.

Tabelle 3: Statistische Werte der Multispektralaufnahme nach der Hauptachsentransformation

Grauwertmittel der Hauptkomponenten 1-6:

131.95 17.92 12.01 5.63 13.25 3.74

Kovarianzmatrix:

| | | | | | |
|---------|--------|-------|--------|------|-------|
| 1050.17 | 152.64 | -7.28 | -15.85 | 1.85 | -3.16 |
| 0.00 | 149.90 | 3.76 | -13.12 | 3.58 | .02 |
| 0.00 | 0.00 | 51.10 | -2.66 | .43 | .72 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 17.85 | .39 | .51 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 13.8 | -.27 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 6.39 |

Korrelationsmatrix:

| | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|
| 1.00 | .38 | -.03 | -.12 | .02 | -.04 |
| 0.00 | 1.00 | .04 | -.26 | .08 | .00 |
| 0.00 | 0.00 | 1.00 | -.09 | .02 | .04 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | .03 | .05 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | -.03 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 |

Die Grauwertmittel behalten ihre relativen Größenunterschiede entsprechend dem Originalbild, die Standardabweichungen nehmen jedoch in der Reihenfolge der Hauptachsen sukzessive ab und betragen:

32,4 12,2 7,2 4,2 3,7 2,5

Das ist näherungsweise gleichbedeutend mit der Reduktion des Informationsgehaltes in der Reihenfolge der Hauptachsen. Die Korrelation der einzelnen Hauptachsen erreicht zum Teil nur noch 1/100 der Werte vor der Transformation. Die noch vorhandene Restkorrelation resultiert aus Fehlern bei der Schätzung der Kovarianzmatrix des Gesamtbildes mit Hilfe eines über das Gesamtbild gelegten groben Punktrasters, wobei in Zeilen- und Spaltenrichtung nur jeder dritte Bildpunkt erfaßt wird. Da bei einem Punktraster von $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ die mittlere Objektgröße mehr als 3 Bildpunkte in einer Richtung umfaßt, ist diese Schätzung gerechtfertigt.

In Beilage 1 sind die Bilder der ersten drei Hauptkomponenten dargestellt.

3.4. Interpretationsgerechte Aufbereitung von farbigen Abbildungen aus Multispektral- aufnahmen durch lineare Grauwerttransformation im zweidimensionalen Merkmalsraum

3.4.1. Mathematisch-physikalische Grundlagen des Verfahrens

Bereits aus der Verteilung der zu den Bodenobjekten gehörigen spektralen Meßwerte im mehrdimensionalen Merkmalsraum kann qualitativ auf die Art der Farbdifferenzierung in dem entsprechenden Farbsynthesebild geschlossen werden.

Werden die Meßwerte aus zwei Spektralbereichen in einen zweidimensionalen Merkmalsraum eingetragen, so entspricht der Winkel zwischen der Verbindungsgeraden und dem Koordinatenursprung, Meßpunkt und einer Achse des Merkmalsraumes der typischen Multispektralinformation des Meßpunktes und der Abstand des Meßpunktes vom Koordinatenursprung stellt ein allgemeines Strahldichtemerkmale des Bodenobjektes ohne spektrale Information dar (Abb. 9).

Ordnet man den beiden Spektralbereichen bei der Farbsynthese im Multispektralprojektor zwei Farben, z. B. Rot und Grün zu, so wird durch den Winkel α der Schwerpunkt der Farbmischung, also der Farbort (Farbton, Farbsättigung) der entstehenden Mischfarbe festgelegt.

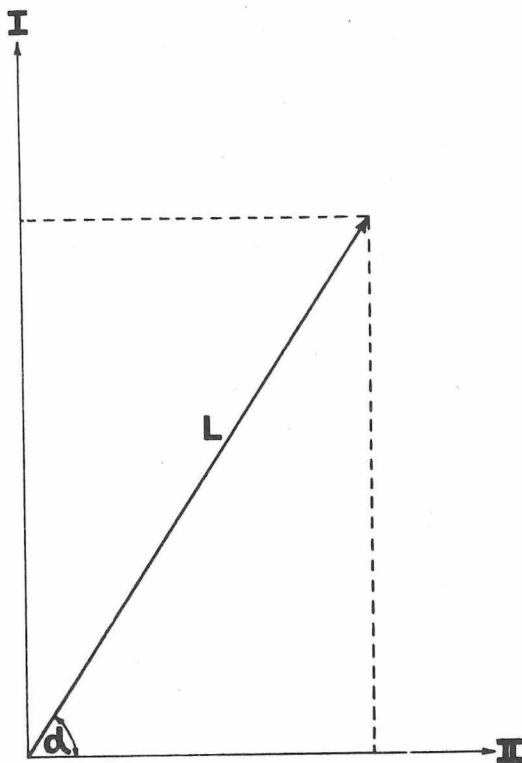


Abb. 9 Schematische Darstellung der
Trennung vom Spektral- und
Helligkeitsinformation im zweidi-
mensionalen Merkmalsraum

Wählt man die beiden Grundfarben so, daß ihre Verbindungsgerade im Farbdreieck nahezu parallel zum Spektralfarbenzug verläuft, wird durch den Winkel α nur der Farbton bestimmt, die Farbsättigung ist für alle Mischfarben nahezu konstant (Abb. 10).

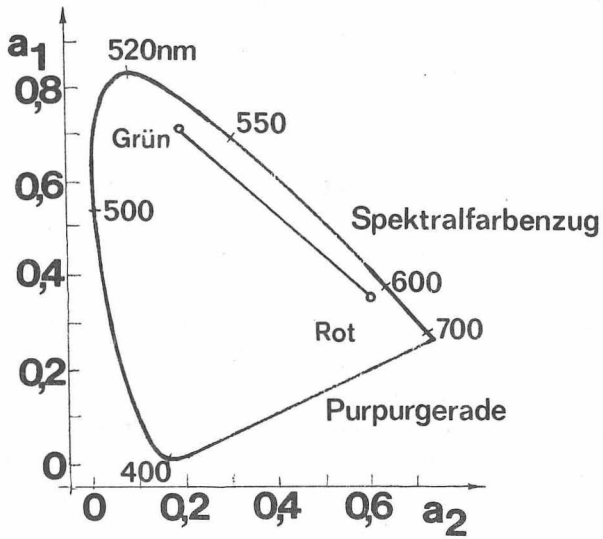


Abb. 10 Beispiel der Wahl der Grundfarben (Rot und Grün), bei dem sich die Sättigung der entstehenden Mischfarbe nur minimal ändert.

Die Helligkeit der entstehenden Mischfarbe ist durch den Abstand des Meßpunktes zum Koordinatenursprung bestimmt. Trägt man zu allen Objekten die Meßpunkte aus zwei Spektralbereichen einer Multispektralaufnahme in den zweidimensionalen Merkmalsraum ein, so entstehen deutliche Merkmalswolken, die verschiedenen Objektklassen entsprechen. Aus der geometrischen Lage dieser Merkmalsverteilungen kann auf die Farbdifferenzierung im zugeordneten Mischbild geschlossen werden.

Sind die Merkmalspunkte auf einem Strahl oder wenigen Strahlen ausgehend vom Koordinatenursprung im Merkmalsraum verteilt (Abb. 11), so ergibt sich im Farbbild eine andere Farbdifferenzierung als bei einer senkrecht dazu orientierten Verteilungsrichtung der Merkmalspunkte.

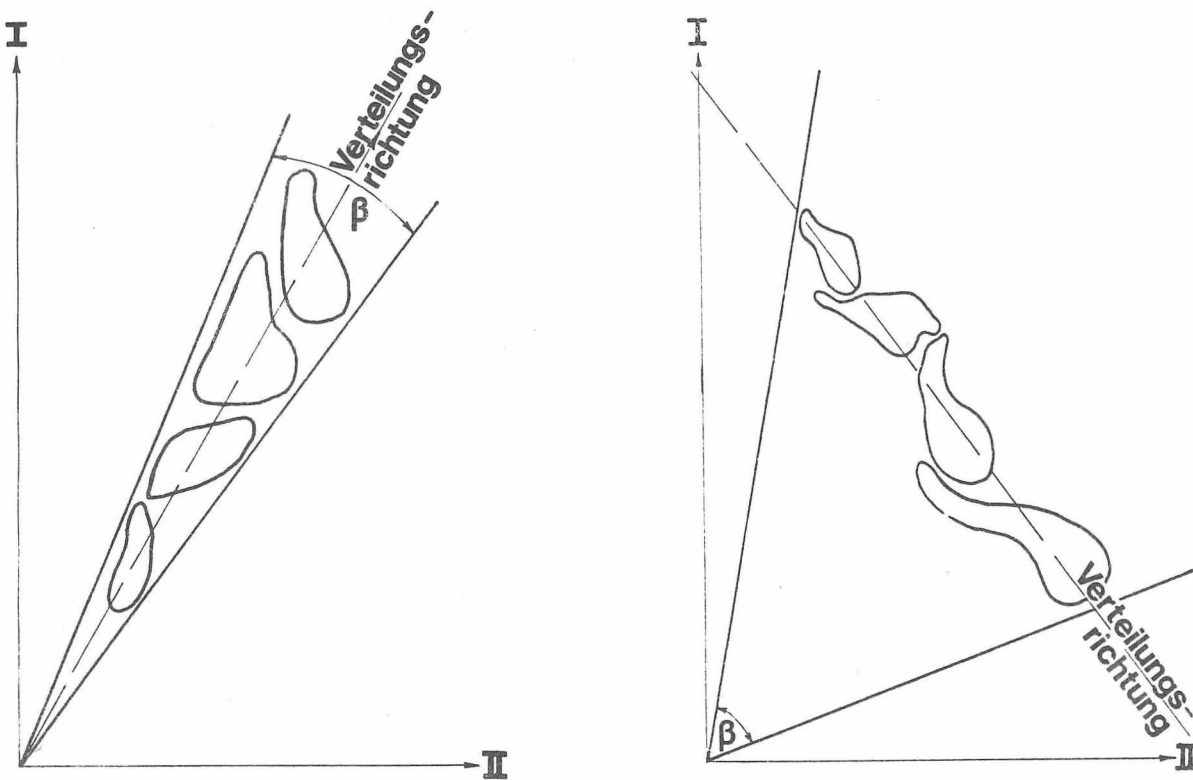


Abb. 11 Verschiedene Formen der Merkmalsverteilung im zweidimensionalen Merkmalsraum

Der Umfang der in den zugeordneten Farbbildern auftretenden Farbtöne wird bestimmt durch den Winkel β , durch den die Merkmalsverteilung eingeschlossen wird. Das bedeutet, daß im ersten Fall die relativ geringe Farbtendifferenzierung entsteht, und die Objekte im Bild hauptsächlich durch ihre unterschiedlichen Helligkeiten getrennt werden können. Die Farbtendifferenzierung reicht bei Verwendung der Grundfarben Rot und Grün nur von Gelborange bis Gelbgrün. Im zweiten Fall werden alle möglichen Mischfarbtöne (Rot bis Grün) erfaßt, so daß die Objekte im Farbbild durch unterschiedliche Farbtongebung getrennt werden können.

Nach den im Kapitel 2 abgeleiteten Aufgaben zur interpretationsgerechten Bildaufbereitung ist die Erhöhung der Farbtendifferenzierung ein wesentlicher Schritt zur

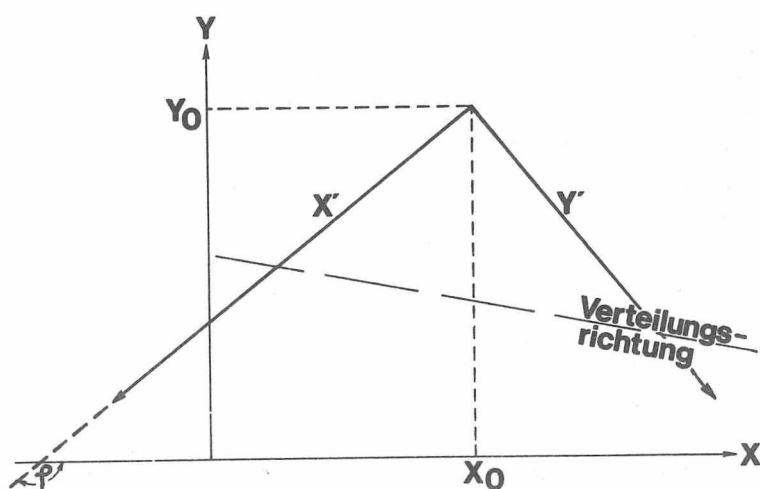


Abb. 12 Durch lineare Verschiebung und Drehung des Original-Merkmalraumes wird ein neuer Raum gebildet, in dem sich eine optimale Farbtendifferenzierung ergibt.

Erleichterung und Objektivierung der Bildinterpretation. Mit Hilfe digitaler Bildverarbeitungsmethoden ist es möglich, die beiden Primärbildkomponenten so umzutransformieren, daß zwei Schwarzweiß-Sekundärbilder entstehen, die bei der Farbsynthese im Multispektralprojektor für einen bestimmten thematischen Bildinhalt immer eine optimale Farbtendifferenzierung ergeben. Das wird erreicht durch Überführung des alten Merkmalsraumes in einen neuen, in dem die Verteilungsrichtung der für die Interpretationsthematik wesentlichen Merkmale senkrecht zur Winkelhalbierenden seiner Achsen verläuft (Abb. 12). Mathematisch läßt sich diese "Überführung des

Merkmalsraumes" durch eine lineare Transformation beschreiben.

$$X' = (X - X_0) \cdot \cos \varphi + (Y - Y_0) \cdot \sin \varphi$$

$$Y' = (Y - Y_0) \cdot \cos \varphi - (X - X_0) \cdot \sin \varphi$$

X_0, Y_0 sind die Koordinaten des Ursprungs des neuen Koordinatensystems und φ ist der Winkel, um den das alte Koordinatensystem gedreht wird.

3.4.2. Technische Realisierung

Das beschriebene Verfahren läßt sich prinzipiell auch auf mehrdimensionale Merkmalsräume erweitern. Allerdings ist dann eine übersichtliche Darstellung der Merkmalsverteilung nicht mehr möglich, so daß nur die Anwendung des Verfahrens auf zweidimensionale Merkmalsräume praktikabel ist. In einem ersten Programmabschnitt wird das zwei-

dimensionale Histogramm, das die Merkmalsverteilung wiedergibt, berechnet und sowohl als Zahlenmatrix als auch als Grauwertmatrix ausgeschrieben. Aus diesen Merkmalsverteilungen können die geometrischen Beziehungen für die Transformation abgeleitet werden. Im zweiten Programmabschnitt werden in Form von Transformationstabellen alle möglichen Produkte, die bei der Transformation auftreten können, berechnet. Dadurch wird im dritten Programmabschnitt Rechenzeit bei der Ausführung der Transformation eingespart. Die Sekundärbilder werden als Multispektralfiler ausgegeben.

3.5. Interpretationsgerechte Aufbereitung von farbigen Abbildungen aus MKF-6-Multispektralfotografien unter Berücksichtigung der empfindungsgerechten Farbmatrik

Das Verfahren der linearen Transformation des zweidimensionalen Merkmalsraumes bewirkt im wesentlichen eine qualitative Verbesserung der Farbtondifferenzierung im Farbmischbild aus zwei Komponenten. Eine optimale Farbbildverbesserung ist aber erst dann erreicht, wenn der gesamte Bereich der mit den Filtern eines Farbmischprojektors erzeugbaren Farben ausgenutzt wird. In diesem Zusammenhang wird im folgenden ein Verfahren entwickelt, das diese Forderung berücksichtigt und zur Optimierung der Farbtondifferenzierung einer Farbsynthese aus drei Spektralbereichen dient.

3.5.1. Mathematisch-physikalische Grundlagen des Verfahrens

3.5.1.1. Unabhängige Optimierung der Grauwertdifferenzierung in 3 Komponenten mit anschließender Farbmischung im Multispektralprojektor

Als einfachste Möglichkeit wurde zunächst die Änderung der Farbdifferenzierung durch getrennte Optimierung der Grauwertdifferenzierung in den Einzelkanälen untersucht. Ein wichtiges Verfahren zur Verbesserung der Differenzierung in Schwarzweiß-Einzelbildern ist die Histogrammegalisierung [6,7,55]. Ausgangspunkt dieses Verfahrens ist die Bildung des Bildhistogramms. Der Grauwertinformationsgehalt eines Bildes ist um so größer, je mehr sein Histogramm einer Gleichverteilung entspricht. Die Entropie als Maß der Grauwertinformation nimmt dann ein Maximum an. I. a. wird je nach Bildinhalt das Histogramm nur sehr wenig einer Gleichverteilung entsprechen und vielmehr durch ausgeprägte Maxima gekennzeichnet sein.

Mit Hilfe von punktbezogenen nichtlinearen homogenen Bildoperationen ist es möglich, die Grauwerte eines Bildes und damit die Häufigkeitsverteilung der Grauwerte so zu ändern, daß alle Grauwerte möglichst gleich oft vorkommen. Auf den Bildpunkt B_{ij} mit den Koordinaten i, j wird ein Operator mit der Grauwertübertragungseigenschaft $f(B_{ij})$ angewandt, so daß sich der Grauwert des neuen geometrisch identischen Bildpunktes zu

$$B_{ij}^* = f(B_{ij})$$

ergibt.

Die Bestimmung der nichtlinearen Funktion $f(B_{ij})$ erfolgt dabei so, daß einer gleichen Anzahl von Bildpunkten eine gleiche Zahl von Schwärzungsstufen zugeordnet wird (Abb.13).

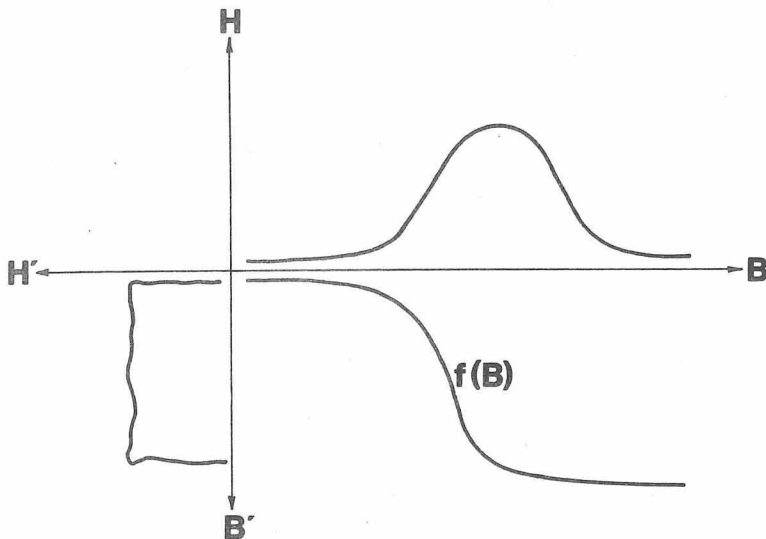


Abb. 13 Bestimmung des nichtlinearen homogenen Operators zur Histogrammegalisierung (B - Graustufe, H - Häufigkeit)

Wendet man diese Verarbeitungstechnik auf drei ausgewählte Spektralbereiche einer Multispektralaufnahme an, so erhält man drei bezüglich der Grauwertdifferenzierung optimierte Schwarzweißvorlagen, die anschließend im Multispektralprojektor mit Farben codiert und gemischt werden können. Das Ergebnis ist jedoch unbefriedigend und zeigt im Gesamtbild eine geringere Farbdifferenzierung als das Originalmischbild. Die Ursache dafür liegt in der unabhängigen Verarbeitung der drei Kanäle.

Das soll am Beispiel einer Zweikanalmischung erklärt werden. Benutzt man für die Farbmischung zwei Schwarzweißvorlagen und codiert diese mit den Farben Grün und Rot, so entsteht ein Farbmischbild mit Mischfarben, die auf der Verbindungsgeraden der Filterfarben Rot und Grün im Farbdreieck liegen. Es entstehen also beispielsweise die Farben Rot, Orange, Gelb, Gelbgrün und Grün. Die Häufigkeit, mit der solche Farben im Mischbild vorkommen, hängt davon ab, wie oft eine zur Entstehung dieser Mischfarbe notwendige Kombination von geometrisch identischen Bildtransparenzen auftritt. D. h. die Verteilung der Mischfarben läßt sich beschreiben durch ein Histogramm, das angibt, wie häufig eine bestimmte Grauwertkombination auftritt.

In Abb. 14 ist ein Beispiel für einen horizontalen Schnitt durch ein solches zweidimensionales Histogramm dargestellt.

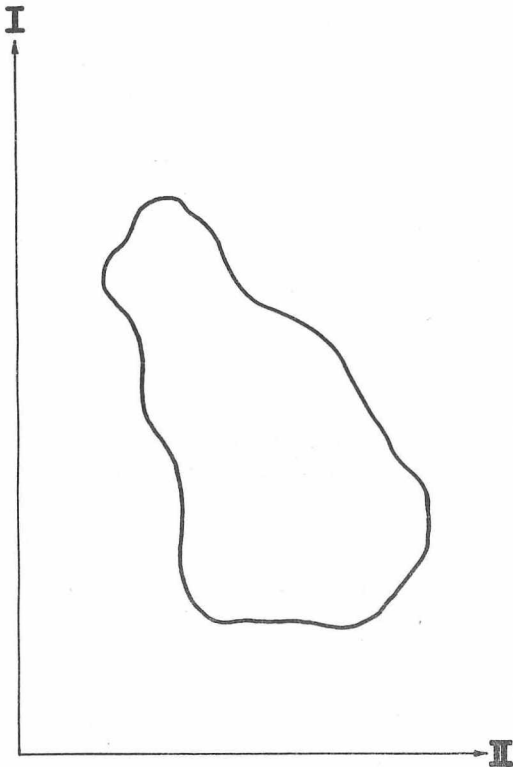


Abb. 14 Schnittdarstellung eines zweidimensionalen Histogramms

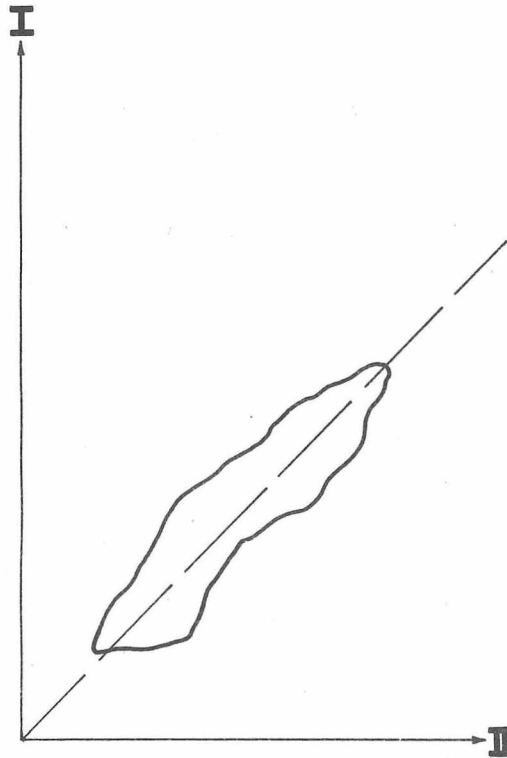


Abb. 15 Schnittdarstellung eines zweidimensionalen Histogramms nach getrennter Egalisierung der Einzelkanäle

Alle häufig vorkommenden Grauwertkombinationen liegen innerhalb des durch die Kurve abgeschlossenen Bereiches. Für die Farbdifferenzierung im Mischbild ist es jedoch vorteilhaft, wenn nicht nur ein begrenzter Farbbereich vorkommt, sondern wenn alle möglichen Farben im Bild gleich häufig vorkommen. Dazu ist es notwendig, das Histogramm der Grauwertkombinationen zu egalisieren. Bei unabhängiger Egalisierung der Einzelkanäle werden die häufig vorkommenden Grauwerte gespreizt. Bildet man von den so vorbereiteten Einzelkanälen wieder ein Histogramm der Grauwertkombinationen, so zeigt sich, daß die im Original relativ breit verteilte Wolke zu einer länglichen schmalen Verteilung auf der Winkelhalbierenden zwischen den beiden Histogrammachsen umgebildet wurde (Abb.15). Das liegt darin begründet, daß die Zahl der Punkte in der Punktwolke konstant bleibt, während in den beiden Einzelkanälen die Grauwertmaxima unabhängig gespreizt werden. Ein solches Histogramm läßt sofort erkennen, daß die Farbdifferenzierung in einem aus den so verarbeiteten Schwarzweißvorlagen gebildeten Farbmischbild nur sehr gering ist; es wird im wesentlichen nur ein Farbton (entsprechend der obigen Farbcodierung Gelb) in verschiedenen Helligkeitsstufen auftreten. Für den dreidimensionalen Fall, bei der Benutzung von drei Spektralbereichen, gilt das entsprechende. Um die optimale Farbdifferenzierung im Farbmischbild zu erhalten, muß also das Histogramm der Grauwertkombinationen egalisiert werden. Wenn in den einzelnen Schwarzweiß-

bildern ca. 20 Graustufen unterschieden werden können, dann sind damit bei Benutzung von 3 Spektralbereichen ca. 8000 verschiedene Farben erzeugbar. Es müßte also ein Histogramm mit 8000 möglichen Grauwertkombinationen egalisiert werden. Dabei ist die Zahl der unterscheidbaren Graustufen noch als sehr gering angenommen. Außerdem werden bei einer solchen Egalisierung die Eigenschaften des empfindungsgerechten Sehens des Komplexes Auge-Gehirn nicht berücksichtigt.

3.5.1.2. Optimierung der Farbdifferenzierung durch Egalisierung des zweidimensionalen Histogramms der Farbwertanteile

Aus dem vorhergehenden Abschnitt bestehen drei Forderungen an ein Verfahren zur Verbesserung der Farbdifferenzierung in Multispektralbildern:

1. Das sehr viel Speicherplatz erfordernde 3-dimensionale Histogramm der Grauwertkombinationen muß auf ein 2-dimensionales Histogramm reduziert werden, wobei die Farbmischung aus drei Spektralbereichen noch erfaßt werden soll.
2. Das unterschiedliche Farbunterscheidungsvermögen des Komplexes Auge-Gehirn für verschiedene Farben soll berücksichtigt werden.
3. Im ersten Schritt der Bildabtastung und bei der Histogrammbildung sollen wesentlich mehr als 20 Graustufenunterschiede erfaßt werden.

Diese 3 Forderungen lassen sich realisieren, wenn statt des dreidimensionalen Histogramms der Grauwertkombinationen das zweidimensionale Histogramm der durch die Grauwertkombinationen entstehenden Farbwertanteile gebildet wird. Dabei kann die Anzahl der unterscheidbaren Graustufen noch beliebig hoch sein, denn die Zusammenfassung der Grauwertkombinationen zu einer begrenzten Anzahl von Farben erfolgt erst im zweiten Schritt, bei der Bildung des Histogramms der Farbwertanteile. Das ist wesentlich vorteilhafter als eine Zusammenfassung der Grauwerte, wie es bei der Bildung des dreidimensionalen Histogramms erforderlich wäre. Die Farbwertanteile werden empfindungsgerecht berechnet, so daß das entstehende zweidimensionale Histogramm die empfindungsgerechte Verteilung der Farben wiedergibt. In einem zweiten Schritt werden die zur Egalisierung des Histogramms notwendigen zweidimensionalen Übertragungscharakteristiken berechnet. Es ist zu beachten, daß zur exakten Charakterisierung einer Farbe drei Zahlenangaben nötig sind. Da bei der hier beschriebenen Methode nur die beiden Farbwertanteile zur Verfügung stehen, muß für die Berechnung der neuen Farbkoordinaten noch eine Randbedingung eingeführt werden, die die dritte fehlende Farbmaßzahl ersetzt. Durch die beiden Farbwertanteile werden die Farben nur bezüglich Sättigung und Farbton zahlenmäßig erfaßt. Aus den im Abschnitt 3.1.2. angegebenen Gleichungen zur Berechnung der im Multispektralprojektor entstehenden Farben lassen sich zwei Gleichungen zur Bestimmung der Transparenzen T_1 , T_2 , T_3 ableiten für den Fall, daß zwei bestimmte Farbwertanteile x und y realisiert werden sollen.

Es gilt:

$$T_1 = \frac{T_2 \cdot X_B + T_3 \cdot X_R - X[T_2(X_B + Y_B + Z_B) + T_3(X_R + Y_R + Z_R)]}{X(X_G + Y_G + Z_G) - X_G}$$

$$T_2 = \frac{T_2 \cdot Y_B + T_3 \cdot Y_R - y[T_2(X_B + Y_B + Z_B) + T_3(X_R + Y_R + Z_R)]}{y(X_G + Y_G + Z_G) - Y_G}$$

mit $A = X(X_G + Y_G + Z_G) - X_G$ und $B = y(X_G + Y_G + Z_G) - Y_G$

folgt:

$$T_2 = T_3 \cdot \frac{A[Y_R - y(X_R + Y_R + Z_R)] - B[X_R - X(X_R + Y_R + Z_R)]}{B[X_B - X(X_B + Y_B + Z_B)] - A[Y_B - y(X_B + Y_B + Z_B)]}$$

$$T_1 = T_3 \cdot \frac{D[Y_R - y(X_R + Y_R + Z_R)] - E[X_R - X(X_R + Y_R + Z_R)]}{E[X_G - X(X_G + Y_G + Z_G)] - D[Y_G - y(X_G + Y_G + Z_G)]}$$

mit $D = X(X_B + Y_B + Z_B) - X_B$ und $E = y(X_B + Y_B + Z_B) - Y_B$

Faßt man die rechten Seiten dieser Gleichungen weiter zusammen, so ergibt sich

$$T_1 = \alpha \cdot T_3$$

$$T_2 = \beta \cdot T_3$$

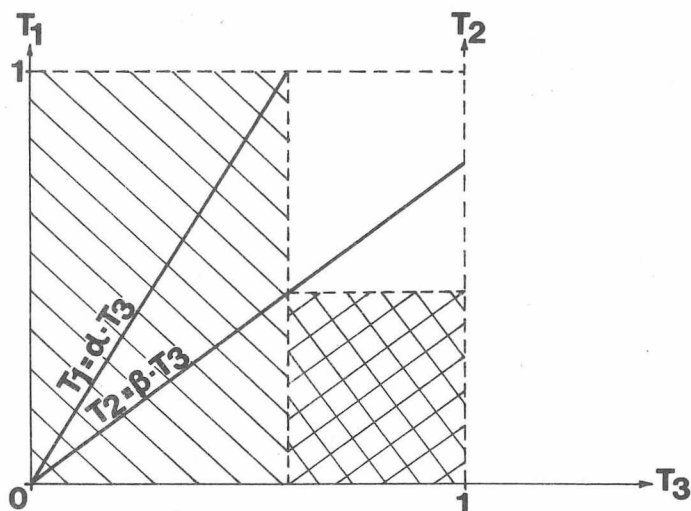


Abb. 16 Geometrische Darstellung des Problems zur Optimierung der Bildpunkthelligkeit

$$\begin{array}{ll} \text{Für } d > \beta \text{ und } d > 1 \text{ gilt } T_3 = 1/d \\ \text{für } \beta > d \text{ und } \beta > 1 \text{ gilt } T_3 = 1/\beta \\ \text{für } d < 1 \text{ und } \beta < 1 \text{ gilt } T_3 = 1 \end{array}$$

Mit dieser Randbedingung wird eine der Transparenzen immer so bestimmt, daß bei gegebener Konfiguration der Anstiege immer die größtmögliche Gesamttransparenz $T_1 + T_2 + T_3$ ausgewählt wird.

Die Farbwertanteile x und y werden durch Egalisierung des Histogramms der empfindungsgerechten Farbwertanteile u und v bestimmt. Aus der primären dreiparametrischen Bildfunktion lassen sich somit drei Schwarzweißbilder berechnen und farbcodieren. Mit dieser Verarbeitungsmethodik erhält man also ein Farbbild, in dem alle vorkommenden Farben über den Wertevorrat der mit dem Mischprojektor erzeugbaren Farben verteilt sind. Diese Verteilung berücksichtigt empfindungsgerechte Seheigenschaften des Komplexes Auge-Gehirn.

3.5.2. Programmtechnische Realisierung des Verfahrens

Das Programm besteht aus drei Hauptabschnitten. Im ersten Teil werden die primären Datensätze als Multispektraldatei zeilenweise in den Rechner eingelesen, die empfindungsgerechten Farbwertanteile berechnet und deren Häufigkeit in einem 2-dimensionalen Feld abgespeichert. Das erfolgt zeilenweise, so daß nach Einlesen des gesamten Multispektraldatei die Verteilung der empfindungsgerechten Farbwertanteile bekannt ist.

In einem zweiten Programmzyklus erfolgt die Berechnung der zur Egalisierung des Histogramms notwendigen Übertragungscharakteristik. Dabei bezieht sich die Egalisierung

Es besteht nun die Aufgabe, zur Lösung dieser beiden Gleichungen mit drei Unbekannten eine Bedingung zu finden, die gewährleistet, daß die entstehende Farbe mit den Farbwertanteilen x und y immer maximal hell wird. In einem zweidimensionalen Koordinatensystem mit den Achsen T_1 bzw. T_2 und T_3 (Abb. 16) ergeben sich entsprechend den obigen Gleichungen zwei Geraden durch den Nullpunkt mit den Anstiegen d und β . Aus der Abbildung wird die Einführung folgender Randbedingungen verständlich:

nur auf den Teil des Farbdreiecks, der auch mit den im Multispektralprojektor vorhandenen Farbfiltern erfaßt werden kann. Die Egalisierung des 2-dimensionalen Histogramms erfolgt zunächst zeilen- und nach Umsortierung spaltenweise.

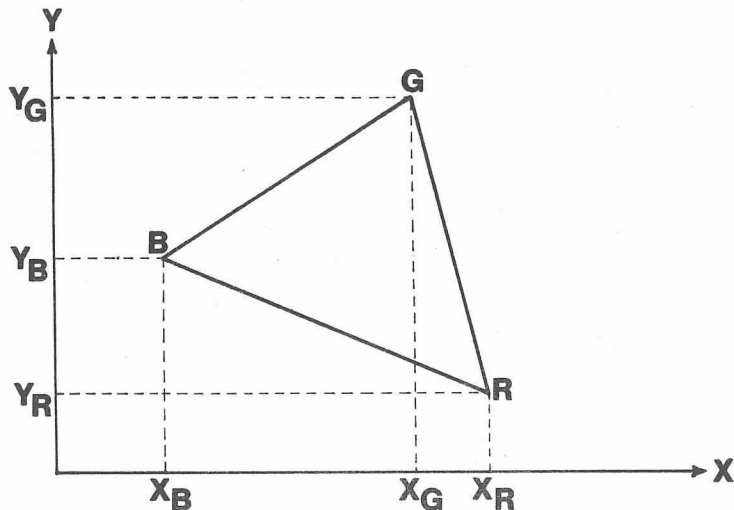


Abb. 17 Ermittlung von drei Geradengleichungen zur Abgrenzung des Farbbereiches eines Multispektralprojektors

Im reizvalenzmetrischen Farbdreieck gilt:

$$y \geq \frac{Y_R - Y_B}{X_R - X_B} \cdot (X - X_B) + Y_B$$

$$x \geq Y \cdot \frac{X_G - X_B}{Y_G - Y_B} + X_B - Y_B$$

$$z \geq \frac{Y_R - Y_G}{X_R - X_G} \cdot (X - X_G) + Y_G$$

Erfüllt ein Punkt im empfindungsgerechten Dreieck nach der Rücktransformation diese Bedingungen nicht, so läßt sich die ihm entsprechende Farbe mit den Filtern des Multispektralprojektors experimentell nicht realisieren.

Werden diese Ungleichungen erfüllt, so wird der Bereich der mit den Filtern erzeugbaren Farben im empfindungsgerechten Dreieck durch Abspeichern des Anfangspunktes, der Länge, der Häufigkeit der auftretenden Farben und der mittleren Belegung jedes Histogrammpunktes dieser Zeile markiert. Die Egalisierung erfolgt danach zunächst zeilenweise für dieses Gebiet, indem zwei benachbarte Farben jeder Zeile entsprechend dem Verhältnis ihrer Häufigkeiten zur mittleren Zeilenhäufigkeit auseinandergerückt werden. Die dabei errechnete Transformationsmatrix für die Zeilenegalierung wird abgespeichert und an-

Bei der Egalisierung wird getestet, ob der entsprechende Farbpunkt noch in dem mit den Farbfiltern erzeugbaren Farbbereich liegt. Dieser Test erfolgt durch Rücktransformation der empfindungsgerechten Farbwertanteile in das reizvalenzmetrische Farbdreieck, weil in diesem Farbdreieck der Wertevorrat an Farben durch drei Geradengleichungen (Abb. 17) beschrieben werden kann.

schließlich das ursprüngliche Histogramm entsprechend dieser Transformationsvorschrift umsortiert. Auf das daraus entstehende neue Histogramm wird die gleiche Egalisierungsprozedur spaltenweise angewandt und die dabei errechnete Transformationsmatrix zur Spaltenegalierung wieder abgespeichert. Nach der zeilen- und spaltenweisen Egalisierung ist also bekannt, wie die Farbwertanteile des Originalbildes in die neuen Farbwertanteile des verbesserten Bildes zu transformieren sind.

Im nächsten Programmschritt wird der primäre Multispektralfile ein zweites Mal zeilenweise eingelesen, werden die Farbwertanteile punktweise berechnet und entsprechend den ihnen zugehörigen neuen Farbwertanteilen unter Berücksichtigung der Helligkeitsbedingung die drei neuen Grauwerte für jeden Bildpunkt gebildet.

3.5.3. Vergleich mit einem bekannten ähnlichen Verfahren

Wegen der Größe des Kernspeichers des verwendeten Computers kann immer nur eine begrenzte Anzahl von Farbwertanteilen erfaßt werden. Insofern bedeutet dieser Algorithmus zur Egalisierung der Farbwertanteile letztlich eine Zuordnung von vorrätigen Farbmerkmalen zu bestimmten Schwärzungskombinationen, wobei diese Zuordnung einerseits durch die empfindungsgerechte Farbverteilung und andererseits durch die Häufigkeitsverteilung der Schwärzungskombinationen im Primärbild bestimmt wird. Der Nachteil des Verfahrens besteht in der Begrenzung der Größe des 2-dimensionalen Histogramms der Farbwertanteile durch das Kernspeichervolumen des verwendeten Computers. Die Farbtrennungsempfindlichkeit des Algorithmus läßt sich bei Verwendung von größeren Computern prinzipiell erhöhen und wird dann letztlich durch die Anzahl der unterscheidbaren Grauwerte in den einzelnen Spektralbereichen bestimmt.

Aus der Literatur [14] ist ein Verfahren zur Verbesserung von Farbsynthesen aus Multispektralaufnahmen bekannt geworden, bei dem der Nachteil des hohen Speicherplatzbedarfs nicht besteht. Ziel des Verfahrens ist es ebenfalls, die Farbdifferenzierung im Bild zu erhöhen. Dazu werden aus drei Spektralbereichen für jeden Bildpixel drei Farbwertanteile berechnet. Daraus werden die Farbmerkmale Farbton, Farbsättigung und Helligkeit ermittelt, auf Schwärzungen normiert und als drei unabhängige Bilder mit der Farbton-, Farbsättigungs- und Helligkeitsinformation wieder pixelweise ausgeschrieben. Diese drei Schwarzweißbilder können nun mit einfachen Verfahren der Grauwertspreizung verbessert werden. Die verbesserten Bilder mit der Farbton-, Sättigungs- und Helligkeitsinformation werden in einem nächsten Schritt wieder pixelweise eingelesen, für jeden Bildpunkt werden die neuen Farbwertanteile abgeleitet und daraus drei Schwärzungen zur Realisierung der entsprechenden Farbe berechnet. Die drei Schwärzungswerte werden pixelweise ausgeschrieben. Die entstehenden drei Schwarzweißbilder können anschließend zu einem Farbbild weiterverarbeitet werden. Der Grundgedanke des Verfahrens beruht auf der Zerlegung der Farbinformation in drei unabhängige Größen: Farbton, Farbsättigung und Helligkeit.

Wie im Kapitel 2 gezeigt wurde, ist diese Zerlegung jedoch nicht unproblematisch, da die Unabhängigkeit dieser Größen nur in kleinen Farbbereichen und nicht über den

gesamten Farbraum erklärt ist. Das bedeutet wiederum, daß dieses Verfahren eigentlich nur bei kleinen Grauwertspreizungen der einzelnen Schwarzweißauszüge eine exakte und definierte Farbverbesserung ermöglicht. Ein anderer Nachteil besteht offenbar darin, daß mit der Darstellung der Farbtoninformation Farbtöne durch Grautöne charakterisiert werden und dadurch die Anzahl der unterscheidbaren Farbtöne auf den Wertevorrat an Grautönen begrenzt wird. Die Farbtoninformation erhält insofern das gleiche Gewicht, wie die zur Interpretation von Multispektraldaten weniger wichtige Helligkeitsinformation. Die empfindungsgerechten Seheigenschaften des Komplexes Auge-Gehirn bleiben unberücksichtigt.

Der Hauptvorteil des Algorithmus besteht in seiner Einfachheit und der daraus resultierenden Möglichkeit, ihn bereits mit Mikrocomputern zu realisieren. Die Farbuunterscheidungsempfindlichkeit des Algorithmus wird nicht durch die Speicherkapazität des Computers, sondern durch die in Schwarzweißbildern speicherbare Grauwertinformation bestimmt, also prinzipiell begrenzt.

Der Vergleich des Verfahrens mit dem in 3.5.1. und 3.5.2. vorgestellten Algorithmus fällt deshalb in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Computers aus. Bei Verwendung von Mini- und Mikrocomputern ist das in [14] beschriebene Verfahren besser geeignet. Bei Verwendung größerer Computer werden die Vorteile des hier entwickelten Algorithmus zur exakten objektiven empfindungsgerechten Aufbereitung des Datenmaterials nachweisbar und ermöglichen eine bessere interpretationsgerechte Datenaufbereitung als letzteres Verfahren.

3.6. Interpretationsgerechte Aufbereitung von farbigen Abbildungen aus Multispektralaufnahmen durch unüberwachte Klassifizierung nach repräsentativen Objektklassen

3.6.1. Mathematisch-physikalische Grundlagen des Verfahrens

Die bisher beschriebenen Verfahren dienten der Verbesserung der Farbdifferenzierung in Farbsynthesen aus Multispektralaufnahmen, wodurch vor allem eine Erleichterung der Rayonierung bestimmter Erscheinungen erreicht wurde. Der Fotointerpret hatte dabei aber beispielsweise noch subjektiv zu entscheiden, an welcher Stelle im Bild eine erkennbare Erscheinung begrenzt wird und ein neues Objekt beginnt. Diese Entscheidung ist vergleichbar mit einer Klassifizierungsaufgabe, d. h. mit der Bildung von Objektklassen auf der Grundlage ihrer Bildfarbe.

Während das Problem der überwachten Spektralklassifizierung, d. h. die Objekterkennung aus den Objektschwärzungen in den einzelnen Spektralbereichen, nur unter Berücksichtigung von apriori Objekteigenschaften realisierbar ist, kann eine unüberwachte Klassifizierung davon unabhängig zur interpretationsgerechten Aufbereitung der Multispektralinformation benutzt werden. Bei der überwachten Klassifizierung werden Schwärzungsklassen gebildet und diesen Klassen bestimmte Objekte zugewiesen [19,20]. Da die Schwärzung abhängig ist von den Remissionseigenschaften der Objekte, von den physikalischen Aufnahmebedingungen und bei fotografischen Multispektralaufnahmen vom chemischen

Entwicklungsprozeß, ist die Übertragung eines solchen absoluten Klassifizierungsverfahrens auf mehrere Aufnahmen nur bedingt möglich und deshalb kaum praktikabel.

Bei der unüberwachten Klassifizierung werden zwar ebenfalls bestimmte Schwärzungskombinationen zu Klassen zusammengeschlossen, aber diesen Klassen wird kein Objekt, sondern nur ein vorher vereinbartes Merkmal zugewiesen. Ein solches Merkmal kann z. B. eine vorher vereinbarte Farbe sein.

Werden verschiedenen Schwärzungsklassen unterschiedliche Farben zugeordnet, so entsteht als Ergebnis ein farbiges Bild, in dem sich durch spektrale Merkmale unterscheidende Objekte durch unterschiedliche Farben wiedergegeben werden, was letztlich zur Objektivierung des Interpretationsergebnisses bei Rayonierungsaufgaben beiträgt; denn unterschiedliche Farben entsprechen dann Objekten mit unterschiedlichen spektralen Eigenschaften. Werden die den Schwärzungsklassen zugeordneten Farben so gewählt, daß zwischen ihnen ein großer Farbabstand besteht, dann können diese dicht benachbarten Schwärzungsklassen z. B. durch die Farben Rot und Grün unterschieden werden, was für die Rayonierung der ihnen zugeordneten Objekte eine wesentliche Erleichterung darstellt.

Die Darstellung von Objekten im Merkmalsraum ist eine geeignete Interndarstellung zur Lösung von Klassifizierungsproblemen. Dabei wird ein Objekt durch einen Objektvektor im Merkmalsraum eindeutig beschrieben. In vielen Fällen gruppieren sich wegen der statistischen Natur von Meßfehlern, auf Grund von Objekteigenschaften und auf Grund von Störungen diese Objektvektoren zu Ballungen. Das hauptsächlichste Kennzeichen einer solchen Ballung ist ihr Mittelwert- oder Prototypvektor, der ein bestimmtes Objekt repräsentiert. Eine Klassifizierungsaufgabe besteht nun darin, zu unterscheiden, ob ein bestimmter Objektvektor, d. h. ein bestimmtes Objekt noch zu einer Klasse gehört oder nicht. Dabei werden zwei Arten von Klassifizierungsaufgaben unterschieden:

1. Überwachte Klassifizierung

Die Klassengrenzen sind vorgegeben; die Objektvektoren im Merkmalsraum sind diesen Klassen zuzuordnen. Eine solche Aufgabe besteht z. B., wenn die spektralen Objekteigenschaften und ihre Streuungen bekannt sind, und wenn die im Multispektralbild auftretenden Schwärzungskombinationen danach zu untersuchen sind, ob sie in den Streubereich (Klassenbereich) eines bestimmten Objektes fallen oder nicht.

2. Unüberwachte Klassifizierung

Es ist eine nichtklassifizierte Entwurfsstichprobe von N Objekten im Merkmalsraum vorgegeben, ihre Klassenzuordnung ist unbekannt. Die Bestimmung der Klassen erfolgt aus der Entwurfsstichprobe. Die unüberwachte Klassifizierung kann zur interpretationsgerechten Aufbereitung von Multispektralaufnahmen angewandt werden. Der nichtklassifizierte Entwurfsstichprobe \vec{X}_j , $j = 1 \dots N$ entspricht dabei ein mehrdimensionales Histogramm. Im Histogramm treten bestimmte Schwärzungskombinationen sehr häufig auf, andere seltener oder gar nicht. In Abhängigkeit von der Häufung bestimmter Objektvektoren kann diese Verteilung in verschiedene Klassen C_k zerlegt werden. Da dabei die Klassenprototypen zunächst unbekannt sind, muß eine selbstlernende Klassifizierung erfolgen. Das kann z. B. durch eine iterative Berechnung der Prototypvektoren \vec{P}_i ; $i = 1 \dots m$ reali-

siert werden [46]. Jeder Iterationsschritt enthält dabei zwei Aufgaben:

a) Weise \vec{x}_j in Klasse $C_k(\mathcal{V})$, falls

$$d(\vec{x}_j, \vec{r}_k(\mathcal{V})) = \min_i d(\vec{x}_j, \vec{r}_i(\mathcal{V})); \quad i = 1 \dots m, \quad j = 1 \dots N$$

b) Bestimme so neue Prototypen, $\vec{r}_i(\mathcal{V} + 1)$; $i = 1 \dots m$, daß gilt

$$\sum_{\vec{x}_j \in C_i(\mathcal{V})} d(\vec{x}_j, \vec{r}_i(\mathcal{V} + 1)) = \min_y \left[\sum_{\vec{x}_j \in C_i(\mathcal{V})} d(\vec{x}_j, \vec{y}) \right]$$

\mathcal{V} bezeichnet den Iterationsschritt, $d(\vec{x}_i, \vec{x}_j)$ ist eine Metrik und kann beispielsweise durch das euklidische Abstandsmaß realisiert werden:

$$d(\vec{x}_i, \vec{x}_j(\mathcal{V})) = \left[\sum_{l=1}^n (x_{il} - x_{jl})^2 \right]^{1/2}$$

In diesem Fall bedeutet Aufgabe b die Berechnung des Mittelwertvektors der $\vec{x}_j \in C_i(\mathcal{V})$. Im mehrdimensionalen Histogramm entsprechen diese Mittelwertvektoren $\vec{r}_i(\mathcal{V} + 1)$ den Schwerpunktvektoren der Verteilung über bestimmte Klassen $C_i(\mathcal{V})$. Zu Beginn des Iterationsverfahrens sind Startvektoren $\vec{r}_i^0(0)$ vorzugeben. Die Wahl dieser Startvektoren bestimmt die Zahl der notwendigen Iterationsschritte. Eine gute Anfangsnäherung $\vec{r}_i^0(0)$ wird dabei durch die lokalen Maxima des Histogramms erreicht. Nach Vorgabe der Klassenzahl k findet der Algorithmus nach \mathcal{V} Iterationsschritten ein lokales Minimum des mittleren Abstandes aller Objektvektoren zum nächstgelegenen ermittelten Prototyp $\vec{r}_i(\mathcal{V})$. Durch Vorgabe der Klassenzahl wird erreicht, daß nur eine bestimmte Anzahl von Prototypen gefunden wird, wobei durch die Schwerpunktbildung die Klassentrennung bei sehr häufig vorkommenden Objektvektoren sehr detailliert erfolgt, während seltene Objektvektoren zu größeren Klassen zusammengeschlossen werden.

3.6.2. Programmtechnische Realisierung des Verfahrens

Das Verfahren der unüberwachten Klassifizierung von Multispektraldaten wurde für zweidimensionale Histogramme entwickelt. Das hat den Vorteil, daß auch in einem Mini-computer ein Histogramm mit relativ feinen Grauwertabstufungen abgespeichert werden kann. Bei Unterscheidung von 100 Graustufen werden zur Abspeicherung des 2-dimensionalen Histogramms 10000 16 bit Worte Speicherplatz benötigt. Mit dem gleichen Speicherplatz könnte dagegen ein 4-dimensionales Histogramm nur mit 10 Graustufen abgespeichert werden. Da mit dem unter 3.3. beschriebenen Verfahren der Hauptachsentransformation in zwei Komponenten i. a. 70-90 % der Gesamtinformation aktueller MKF-6 Multispektralaufnahmen verdichtet werden können, bedeutet die Beschränkung des Verfahrens auf zweidimensionale Histogramme keine wesentliche Einschränkung für die praktische Nutzanwendung.

Um die Variabilität des Verfahrens bei Anwendung auf unterschiedliche Grauwertbereiche zu gewährleisten, können unabhängig voneinander für beide Komponenten Grauwertgrenzen im Bereich 0 bis 255 angegeben werden. Innerhalb dieser Grenzen erfolgt dann eine lineare Spreizung auf 100 Graustufen des Histogramms. Dadurch kann u. a. die Empfindlich-

keit des Verfahrens geregelt werden. Sind z. B. die vorgewählten Grauwertintervalle kleiner als 100, so erfolgt eine detailliertere Klassifizierung, als bei einer Intervallgröße über 100.

Das Programm besteht aus drei Hauptteilen. Im ersten Schritt wird das zweidimensionale Histogramm berechnet. Im zweiten Teil werden die ersten k Maxima des Histogramms gesucht, das Iterationsverfahren zur Klassenbildung abgearbeitet und entsprechende Transformationstabellen berechnet. Dabei können wahlweise bis zu 10 Klassen gebildet werden. Im dritten Programmteil wird der Multispektralfile zum zweiten Mal eingelesen und den Schwärzungskombinationen die für die Klassen vereinbarten Farben zugewiesen.

4. Untersuchungen zur Applikation der beschriebenen digital-analogen Verfahren für die interpretationsgerechte Aufbereitung von Multispektralfotografien

Alle beschriebenen Algorithmen zur kombinierten digital-analogen interpretationsgerechten Bildaufbereitung sind mathematisch rein formal auf beliebige Bildfunktionen anwendbar. Die Leistungsfähigkeit der einzelnen Verfahren bezüglich der interpretationsgerechten Aufbereitung der Multispektraldaten kann jedoch bei Anwendung auf verschiedene Bildfunktionen unterschiedlich sein.

Die allgemeine Bildverbesserung des Gesamtbildes bedeutet die Aufbereitung der gesamten primären Bildfunktion, dagegen werden zur thematisch orientierten Datenaufbereitung nur einzelne Teilaspekte der Gesamtbildfunktion interpretationsgerecht dargestellt. Da der Inhalt eines Bildes allgemein durch die Bildfunktion und der thematisch orientierte formalisierbare Bildinhalt durch Teilaspekte der Bildfunktion eindeutig ist, kann die zweckmäßige Anwendung der einzelnen Verfahren an verschiedenen, der jeweiligen naturwissenschaftlichen Interpretationsthematik zuordenbaren Typen von Bildfunktionen diskutiert werden. Dabei wird als formalisierbares Hauptmerkmal die Homogenität der Bildfunktion benutzt und nach inhomogenen und relativ homogenen Bildfunktionen unterschieden. Inhomogene Bildfunktionen sind durch große Varianzen der Bildgrauwerte bzw. durch starke Verschmierung der Objektklassen im Merkmalsraum gekennzeichnet. Relativ homogenen Bildfunktionen sind niedrige Varianzen bzw. zu einer Punktwolke zusammengezogene Punkte im Merkmalsraum zugeordnet, die nur wenigen spektral benachbarten Objekten entsprechen.

4.1. Interpretationsgerechte Aufbereitung von Multispektraldaten mit inhomogener Bildfunktion

Inhomogenen Bildfunktionen können Bilder mit hoher Objektdifferenzierung bzw. mit hoher Informationsentropie zugeordnet werden. Solche Bildfunktionen können beispielsweise bei kleinmaßstäbigen Kosmosaufnahmen oder bei Flugzeugaufnahmen aus großen Höhen auftreten, mit denen verschiedenste Formen unserer natürlichen Umwelt erfaßt werden. Es treten dann i. a. eine Vielzahl von Einzelobjekten auf, die ihrerseits im Verhältnis zur Gesamtbildgröße nur winzige Bildelemente darstellen. Der Inhomogenitätsgrad solcher

Bildfunktionen ist um so größer, je weniger Objekte als repräsentativ für den Gesamtbildinhalt angesehen werden können, d. h. wenn zur Vielzahl der Objekte noch eine annähernde Gleichheit ihrer Flächenanteile im Bild hinzukommt. Die Inhomogenität eines Bildes verringert sich, wenn wenige Objekte innerhalb eines Bildes dominieren und ihnen größere Flächenanteile zugeordnet sind.

Mathematisch ist der Homogenitätsgrad eines Bildes schwierig erfaßbar. Während die Bedingungen für Homogenität noch relativ einfach formuliert werden können, ist die mathematische Umschreibung von Bedingungen für mittlere bis starke Inhomogenität offenbar nur bedingt möglich. Für die Homogenität einer Bildfunktion ist i. a. die Forderung hinreichend, daß das Histogramm der Bildfunktion gaußverteilt und die Varianz der Grauwerte klein ist. Bei inhomogenen Bildfunktionen nimmt der Anteil der Texturinformationen zu und es ist zusätzlich mindestens eine Größe zur Charakterisierung der Objektgrößenverteilung erforderlich. Diese Information kann z. B. aus der Fouriertransformierten bzw. dem Powerspektrum der Bildfunktion erhalten werden [18] . Eine Aussage über die mittlere Objektgröße kann auch aus der Autokovarianzfunktion der Bildfunktion abgeleitet werden. Aus dem prozentualen Anteil der mittleren Objektgröße am Gesamtbild und der Varianz der Bildgrauwerte sind qualitative Homogenitätsaussagen über die Bildfunktion möglich.

Eine allgemeine, nicht thematisch orientierte interpretationsgerechte Aufbereitung von stark inhomogenen Bildern ist nur bedingt sinnvoll und wenig effektiv. Die Algorithmen zur interpretationsgerechten Bildaufbereitung werden i. a. bestimmt durch mittlere statistische Merkmale des Primärbildes. Im einfachsten Fall z. B. durch Mittelwert und Varianz der Grauwerte. Die verschiedensten Verfahren der visuellen Datenaufbereitung können im Prinzip letztlich als Klassifizierung von Merkmalen der primären Bildfunktion aufgefaßt werden. Diese Klassifizierung erfolgt in Abhängigkeit von den statistischen Merkmalen, so daß auch nur der mit diesen Merkmalen beschreibbare Bildinhalt interpretationsgerecht aufbereitet wird.

Bei stark inhomogenen Bildern ist die vollständige Charakterisierung des Bildinhaltes durch statistische Bildparameter sehr kompliziert und zur Bildverbesserung nicht praktikabel. Bei Anwendung eines Algorithmus auf stark inhomogene Bilder werden zwar rein formal die statistischen Beschreibungsparameter bestimmt und das entsprechende Sekundärbild berechnet, die wirksame Bildverbesserung im Sekundärbild bezieht sich jedoch nicht auf die gesamte Primärbildinformation sondern nur auf Teilaspekte des Primärbildes, die mit diesen statistischen Beschreibungsparametern zufällig erfaßt werden. Insofern ist die Anwendung der im 3. Kapitel beschriebenen Algorithmen bei inhomogenen Bildfunktionen beschränkt.

Im folgenden werden die beschriebenen Verfahren zur kombinierten digital-analogen Bildaufbereitung an ausgewählten Beispielen untersucht und ihre Leistungsfähigkeit diskutiert.

4.1.1. Farbcodierung der Hauptkomponenten im Multispektralprojektor

Die Hauptkomponententransformation ist eine lineare Transformation, die zur Informationsverdichtung von Multispektraldaten angewandt werden kann. Es handelt sich dabei um ein Verfahren, das für den gesamten Primärbildinhalt die sekundäre Bildfunktion i. a. nicht ohne Informationsverluste berechnet. Das liegt darin begründet, daß die Koeffizienten der linearen Transformation so berechnet sind, daß der mittlere quadratische Beschreibungsfehler der sekundären Bildfunktion minimal wird. Zur Berechnung dieser Koeffizienten wird letztlich die Kovarianzmatrix der primären Bildfunktion benutzt, so daß nur der damit erfaßte Bildinhalt verlustfrei verdichtet wird. Die Berechnung der sekundären Bildfunktion stellt dabei im Prinzip eine Klassifizierung dar, bei der außerhalb des mit der Kovarianzmatrix erfaßten Grauwertbereiches liegende Grauwerte zusammengefaßt werden können, so daß dabei ein höherer Generalisierungsgrad vorhanden ist. Die effektive Anwendung der Hauptkomponententransformation setzt deshalb voraus, daß sich die primäre mehrparametrische Bildfunktion mit Hilfe der Kovarianzmatrix hinreichend gut beschreiben läßt.

Bei der Anwendung der Hauptkomponententransformation auf Multispektraldaten, die mit relativ breitbandigen Aufnahmesystemen erhalten wurden, ist unter Beachtung der o. g. Voraussetzung eine erhebliche Datenverdichtung nachweisbar. Wie in Abschnitt 3.3.3. gezeigt wurde, sind ca. 70 - 90 % der Daten einer MKF-6 Multispektralaufnahme auf zwei Hauptkomponenten verdichtbar.

Zur interpretationsgerechten Aufbereitung der nach der Hauptkomponententransformation erhaltenen Schwarzweißbilder gelten die im 2. Kapitel formulierten Anforderungen. Um eine interpretationsgerechte farbige Abbildung der verdichteten Daten zu erhalten, können die ersten drei Hauptkomponenten im Multispektralprojektor mit drei Farben codiert und durch additive Farbmischung zu einem farbigen Bild synthetisiert werden. Dabei werden auf dem Bildschirm des Multispektralprojektors die Leuchtdichten der Objekte in den Hauptkomponenten addiert. Da die zweite und dritte Hauptkomponente i. a. viel weniger Daten als die erste enthalten, ist die mittlere Schwärzung in der ersten Hauptkomponente bedeutend größer als in den anderen Komponenten. Bei der Mischung der Hauptkomponenten im Multispektralprojektor würden deshalb die weniger informativen Komponenten die erste Hauptkomponente überstrahlen. Deshalb ist zur Synthese eines Hauptkomponenten-Farbbildes die Verwendung der Negative der Hauptkomponenten-Bilder erforderlich. Dadurch wird ein indirekt proportionaler Zusammenhang zwischen Datendichte und Bildschwärzung erzeugt.

Da die einzelnen Hauptkomponenten entkorreliert sind, ergeben sich verschiedene Mischfarben, so daß die Farbdifferenzierung im gesamten Bildbereich groß ist. Im Vergleich zu konventionellen Standardfarbsynthesen aus drei Spektralbereichen ist die Objektdifferenzierung im Mittel größer. Die Entkorreliertheit der Hauptkomponenten ist eine notwendige Voraussetzung für hohe Farbdifferenzierung im entsprechenden Farbbild und auch die mathematisch formale Rechtfertigung für die Addition der Hauptkomponenten im Multispektralprojektor. Den Objekten können jedoch im Hauptkomponentenmerkmalsraum auch dicht benachbarte Punktwolken zugeordnet sein, so daß nur ein kleiner Bereich des Merkmalsraumes belegt ist. Als hinreichend für eine hohe Farbdifferenzierung muß des-

halb die möglichst gleiche Verteilung der zugeordneten Objektpunkte im Hauptkomponentenmerkmalsraum gefordert werden. Die Verteilung dieser Punkte in dem auf 256 Graustufen normierten Hauptkomponentenmerkmalsraum ist u. a. von der Normierung der Transformationskoeffizienten zur Hauptachsentransformation abhängig [76]. Bei der technischen Realisierung des in Abschnitt 3.3. beschriebenen Algorithmus wurde die Summe der Koeffizienten auf 1 normiert. Die Normierung erfolgt also unabhängig von der sekundären Bildfunktion, so daß die entsprechende Verteilung im Hauptkomponentenmerkmalsraum zwar entkorreliert, aber nicht notwendig annähernd gleichverteilt ist. Außerdem kann bei Multispektraldaten mit großer Redundanz die in der ersten bzw. in den ersten beiden Hauptkomponenten verdichtete Datenmenge im Verhältnis zur Datenmenge der folgenden Hauptkomponenten sehr groß werden. Das hat wiederum zur Folge, daß sich Varianzen und Grauwertmittelwerte der einzelnen Hauptkomponenten sehr stark unterscheiden, so daß die Abbildungen in den Hauptkomponenten bzw. ihre Negative nicht unmittelbar für eine Farbsynthese geeignet sind.

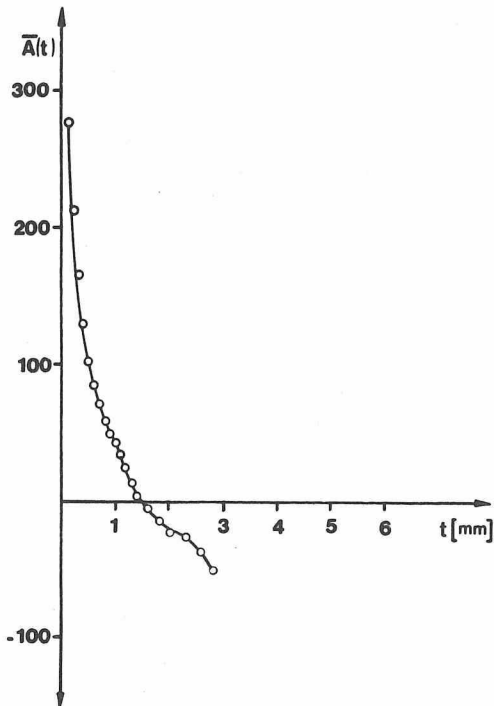
4.1.2. Farbcodierung der linear transformierten Hauptkomponenten

Durch lineare Transformation des Hauptkomponentenmerkmalsraumes kann eine Umverteilung der Belegung des Merkmalsraumes erreicht werden. Zur Ausführung dieser Transformation mit Hilfe des in Abschnitt 3.4. beschriebenen Algorithmus werden die ersten beiden Hauptkomponenten ausgewählt. Die dritte Komponente kann bei dieser 2-dimensionalen Transformation nicht erfaßt werden, eine unabhängige Verschiebungstransformation ist jedoch möglich. Die transformierten Hauptkomponenten werden anschließend im Multispektralprojektor mit den Farben Rot und Grün codiert und zu einem Farbbild gemischt [59].

Zur Testung des Algorithmus wird ein ca. 20 x 30 km² großer Ausschnitt der Multispektralaufnahme vom Nordteil der DDR ausgewählt, die im September 1976 mit der MKF-6 Multispektralkamera an Bord von SOJUS 22 aus ca. 250 km Höhe gewonnen wurde. Beilage 2 zeigt eine Standardfarbsynthese dieses Gebietes. Auf der Aufnahme ist der südliche Teil der Insel Rügen, der Bock und Stralsund mit ca. 30 km Hinterland (Landkreis Stralsund) abgebildet. Um eine Aussage über die Homogenität der Bildfunktion zu erhalten, wurde für jede Bildzeile die Autokovarianzfunktion berechnet und entsprechend gemittelt.

$$A_j(t) = \frac{1}{n-1-t} \cdot \left[\sum_{i=1}^n (P_{i,j+t} - \bar{P}_j) \cdot (P_{i,j} - \bar{P}_j) \right] \quad \begin{array}{l} i\text{-Spaltenzahl,} \\ j\text{-Zeilenzahl} \end{array}$$

$$\bar{A}(t) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m A_j(t)$$



Bei Voraussetzung der Isotropie im Bildausschnitt erhält man damit ein Maß der mittleren Objektgröße.

Abb. 18 gibt die ermittelte Autokovarianzfunktion wieder.

Der Nulldurchgang der Autokovarianzfunktion kann als halbe mittlere Objektgröße interpretiert werden.

Daraus ergibt sich für die mittlere Objektgröße des betrachteten Bildbeispiels ca. 4-5 km² bzw. ca. 2 % der Gesamtbildfläche, so daß die Bildfunktion des Bildbeispiels als stark bis mittelmäßig inhomogen betrachtet werden kann.

Tabelle 4 zeigt die Belegung der zweidimensionalen Histogramme aus den Hauptkomponenten PC1, PC2 und PC1, PC3. Sie sind die Projektion der Verteilung im dreidimensionalen Merkmalsraum auf die Koordinatenebenen dieses Raumes.

Abb. 18 Eindimensionale über alle Bildzeilen gemittelte Autokovarianzfunktion des Bildbeispiels

| |
|--------------------|
| 57 |
| 226 124 |
| 56 166 19 |
| 43 170 130 1 |
| 31 265 242 14 |
| 108 689 512 71 2 |
| 826 1708 586 67 10 |
| 165 2804 638 50 13 |
| 222 4378 756 53 2 |
| 271 5579 658 44 2 |
| 25 4186 318 13 |
| 217 1843 89 1 |
| 69 1133 27 2 |
| 36 2666 13 |
| 660 |

| |
|-----------------------|
| 57 |
| 262 87 1 |
| 111 126 4 |
| 163 174 7 |
| 276 273 2 1 |
| 797 574 11 |
| 71 1027 96 3 |
| 749 2680 661 24 1 |
| 423 3368 1976 643 1 |
| 512 2328 3740 1932 49 |
| 251 895 2628 1750 18 |
| 106 494 873 677 |
| 137 761 330 3 |
| 148 2032 534 |
| 38 651 7 |

Tabelle 4: Histogramme der Hauptkomponenten PC1, PC2 und PC1, PC3 für das Bildbeispiel "Nordteil DDR"

Zur linearen Transformation des zweidimensionalen Merkmalsraumes der ersten beiden Hauptkomponenten wurden aus dem Histogramm PC1, PC2 die Parameter:

$$x_0 = 100 \quad y_0 = 75 \quad = 250^0$$

bestimmt. Dadurch wird eine Spreizung der Gesamtverteilung bei gleichzeitiger Umkehr des Zusammenhangs zwischen Bildschwärzung und Datendichte erreicht. Aus dem Histogramm PC1, PC3 wird der Verschiebungsparameter der dritten Hauptkomponente zu

$$y_0 = 75$$

bestimmt.

Um eine unabhängige Transformation dieser Komponente zu gewährleisten, sind $x_0 = 0$ und $y_0 = 0^0$ zu setzen. Durch diese Transformation entsteht ein Bildnegativ mit einem den transformierten Komponenten PC1 und PC2 entsprechenden Grauwertmittelwert. Durch Ausführung der beiden Transformationen wird nur die Lage der Verteilung im Merkmalsraum und nicht die Verteilung selbst geändert.

Beilage 3 ist ein Beispiel zur Farbsynthese aus den transformierten Hauptkomponenten. Durch die lineare Transformation der Hauptkomponenten wird eine Erhöhung der Farbdifferenzierung im gesamten Bildbereich erzielt. Deutlich erkennbar ist die im Kapitel 2.3. beschriebene Unterdrückung bzw. Auflösung der räumlichen Gliederung des Bildes durch Erhöhung der Farbdifferenzierung, so daß die Analyse des stofflichen, typisch multispektralen Informationsgehaltes des Bildes erleichtert wird. Die Interpretation des Bildes im Sinne einer unüberwachten Bildanalyse ist nicht möglich, da die interne Organisation der Reizverarbeitung im menschlichen Gehirn entsprechend unserem Erfahrungsschatz aus der traditionellen Bildinterpretation abläuft; durch die Erhöhung der Farbdifferenzierung werden jedoch wesentliche Teilprozesse der internen Organisation gestört, so daß für die Interpretation Zusatzinformationen erforderlich sind, die aus dem Standardfarbmischbild bzw. aus der Bodenkenntnis entnommen werden können. Im Bild sind ca. 97 % der Gesamtinformation der Multispektralaufnahme verdichtet. Dadurch ist gegenüber konventionellen Standardfarbsynthesen eine Erhöhung der Farbdifferenzierung zu erwarten. Der Algorithmus zur Hauptachsentransformation mit anschließender linearer Transformation der Hauptkomponenten und ihrer Farbcodierung im Farbmischprojektor ist insofern geeignet, mehrparametrische inhomogene Bildfunktionen interpretationsgerecht aufzubereiten. Die "Klassifizierung" innerhalb des mit der Kovarianzmatrix erfaßten Grauwertbereiches erfolgt dabei in sehr feinen Stufen, so daß der Generalisierungsgrad des Algorithmus sehr gering ist und auch feine Bilddetails und geometrische Strukturen im Sekundärbild interpretationsgerecht abgebildet werden, was z. B. in Beilage 3 deutlich erkennbar ist.

Beilage 11 zeigt das Ergebnis einer thematischen Kartierung des Aufnahmegebietes [12]. Alle durch terrestrische Erkundung kartierbaren Bodenobjekte sind in Beilage 3 durch unterschiedliche Farben rayonierbar. Darüber hinaus sind durch die hohe Farbdifferenzierung weitere Details erkennbar.

4.1.3. Farboptimierung durch Egalisierung des Histogramms der Farbwertanteile

Das im Abschnitt 3.5. beschriebene Verfahren ermöglicht die Aufbereitung des Datenmaterials unter Berücksichtigung der empfindungsgerechten Seheigenschaften des Auges beim Wahrnehmen von Farbbildern. Grundlage dieser Transformation bildet das zweidimensionale Histogramm der empfindungsgerechten Farbwertanteile als Interndarstellung des Primärbildes. Aus diesem Histogramm werden die Transformationsparameter so abgeleitet, daß die Häufigkeitsverteilungen von Objektklassen mit großem Flächenanteil im Primärbild über größere Bereiche des Farbdreiecks gedehnt werden als die entsprechenden Punktwolken von flächenmäßig kleineren Objekten. Dadurch können im Primärbild selten vorkommende Objekte einer größeren, im Farbbild benachbarten Objektklasse zugeordnet oder mit spektral benachbarten seltenen Objekten zu einer Klasse zusammengefaßt werden. Es erfolgt also eine Generalisierung der Objekte in Abhängigkeit von ihrer Häufigkeit im Primärbild, wobei der Generalisierungsgrad bei flächenmäßig seltenen Objekten größer ist als bei Objekten, die im Primärbild sehr oft vorkommen, also quasi repräsentativ für den Bildinhalt sind. Auf Grund der Quantisierung des Wertevorrats der Farbwertanteile kann das Verfahren auch als Klassifizierung aufgefaßt werden, wobei das Schrittmäß der Farbwertanteile die Differenziertheit der Klassifizierung, also letztlich eine apriori Generalisierung des Bildes bestimmt. Die verschiedenen Generalisierungsgrade für flächenmäßig unterschiedlich große Objekte bestimmen im wesentlichen die Grenzen der sinnvollen und effektiven Anwendung des Verfahrens. Bei einem Bildinhalt mit einzelnen geometrischen Strukturen auf einer relativ homogenen Untergrundfläche erfolgt die Generalisierung z. B. so, daß im Sekundärbild in der Untergrundfläche unterschiedliche Teilflächen mit hohen Farbkontrasten erkennbar werden. Für die Strukturinformation erfolgt eine sehr starke Generalisierung, so daß sie u. U. im Sekundärbild nicht mehr explizit enthalten ist. Insofern ist das Verfahren für die Auswertung der geometrischen Bildstruktur, wie sie z. B. bei der Kartierung von Lineamenten in der Geologie erfolgt, ungeeignet. Dagegen können großflächige Zusammenhänge sehr differenziert erfaßt und interpretationsgerecht dargestellt werden, was vor allem für die stoffliche Bildinterpretation von Bedeutung ist. Daraus läßt sich ableiten, bei welcher Form der primären Bildfunktion der Algorithmus sich als leistungsfähig erweist. I. a. überwiegt bei stark inhomogenen Bildfunktionen die Strukturinformation, so daß die Anwendung des Algorithmus zu keinem optimalen Ergebnis führt. Grundvoraussetzung für die Anwendung des Algorithmus ist deshalb ein Überwiegen der Flächeninformation gegenüber der Strukturinformation für die thematische Interpretation. Günstigste Anwendungsbedingungen liegen vor, wenn der Bildinhalt aus mehreren gleichgroßen flächenhaften Objekten besteht, die ihrerseits relativ homogen sind.

Das Verfahren kann sowohl auf Hauptkomponenten als auch auf Primärdaten angewandt werden. Eine weitere thematisch orientierte Aufbereitung des Datenmaterials kann bei Anwendung auf Primärdaten durch Auswahl von drei geeigneten Spektralbereichen erreicht werden.

Die Beilagen 4 und 5 zeigen ein Beispiel zur Anwendung des Verfahrens zur Farboptimierung einer Echtfarbaufnahme. Die Aufnahme (Beilage 4) zeigt einen ca. $150 \times 150 \text{ km}^2$ großen Geländeausschnitt der Nordspitze der Somalihalbinsel mit Kap Guardafui und wurde

mit einer Handkamera durch den Kosmonauten S. Jähn von Bord der Raumstation SALUT 6 aufgenommen. Als Filmmaterial wurde ORWO-Negativfilm NC 19 verwendet. Durch Herstellung von Farbausügen im blauen, grünen und roten Spektralbereich wurde von diesem Farbnegativ ein Multispektralfile mit drei Spektralbereichen erhalten, auf den der Algorithmus angewendet wurde. Im bearbeiteten Sekundärbild (Beilage 5) ist eine erheblich bessere Farbdifferenzierung vor allem in den relativ homogenen Bildbereichen zu erkennen. Die Farbdifferenzierung ist so hoch, daß die räumliche Gliederung des Bildes, die im Original besonders gut erkennbar ist, verlorenght. Dadurch wird eine Informationsselektion erreicht, die sich vorteilhaft auf das Erkennen von stofflichen, spektralen Objektunterschieden auswirkt. Zur Verdeutlichung der Erhöhung der Farbdifferenzierung im Sekundärbild gegenüber dem Primärbild ist in Abbildung 19 die Belegung der Farbwerte im Farbdreieck für die primäre und sekundäre Bildfunktion dargestellt.

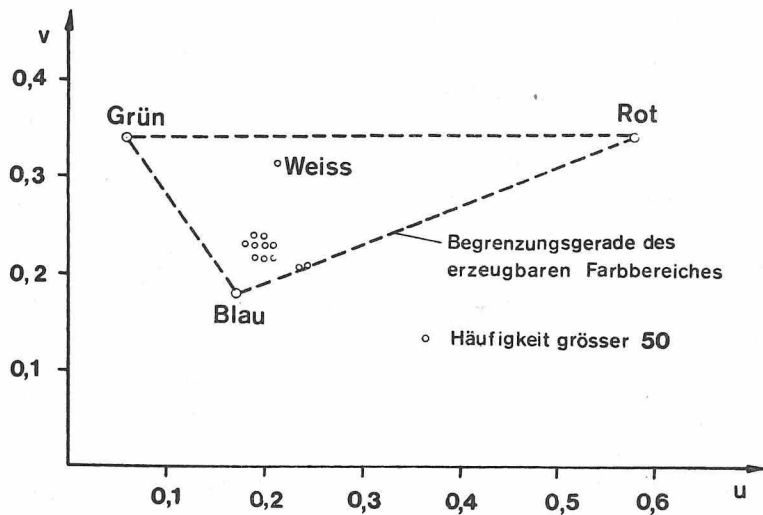
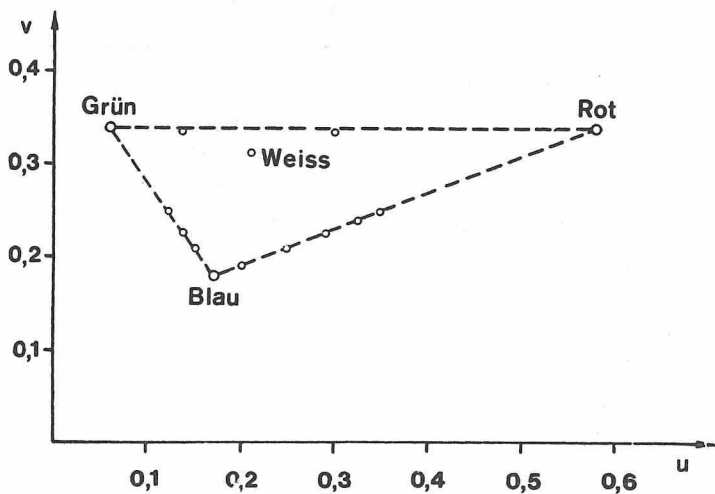


Abb. 19 : Belegung der Farbwertanteile für die primäre und sekundäre Bildfunktion der Beispiele aus Beilage 4 und 5



Innerhalb der im Bild erfaßten Wassergebiete werden mehrere farbige Strukturen sichtbar, die sich als unterschiedliche Wasserqualitäten interpretieren lassen [15]. Im interpretationsgerecht aufbereiteten Bild wird eine markante ozeanische Front sichtbar, die sich als Wassermassengrenze zwischen den Ausläufern des Somalstromes und dem salzreichen und warmen Wasser aus dem Roten Meer/Golf von Aden (längs der Nordküste von Somalia West-Ost fließend im Bild als helle, etwa 30-40 km breite Zunge sichtbar) interpretieren läßt.

Die im Festlandgebiet entstehende hohe Farbdifferenzierung ermöglicht vor allem eine ausführliche stoffliche geologische Interpretation des Aufnahmegebietes. Durch die verbesserte Darstellung von vor allem flächenhaften Objekten sind nach BANKWITZ insbesondere verschiedene Sedimentationsbecken genauer voneinander unterscheidbar [13]. Obwohl strukturgeologische Informationen weitestgehend unterdrückt oder entsprechend generalisiert wiedergegeben werden, lassen sich noch verschiedenartige Störungszonen finden, die z. B. in der betrachteten Aufnahme durch drei große Zonen in west-östlicher Richtung sichtbar werden. Der Algorithmus eignet sich besonders zur Aufbereitung von flächenhaften Effekten, die durch relativ homogene Teilaspekte der Bildfunktion beschrieben werden können.

4.1.4. Aufbereitung von Teilaspekten der Bildfunktion durch unüberwachte Klassifizierung

Bei dem im Abschnitt 3.6. beschriebenen Verfahren der unüberwachten Klassifizierung sind aus programmtechnischen Gründen maximal 10 verschiedene Spektralklassen unterscheidbar. Auf Grund der dabei erfolgenden Objektgeneralisierung ist die Anwendung des Algorithmus auf mittelmäßig bis stark inhomogene Bildfunktionen zur Rayonierung von geringen spektralen Unterschieden wenig sinnvoll. Die effektive Anwendung des Algorithmus beschränkt sich deshalb auf die Aufbereitung von schwach inhomogenen bzw. stark generalisierbaren Teilaspekten der Gesamtbildfunktion, also auf die spezielle thematische Bildaufbereitung. Das kann z. B. durch Anwendung des Algorithmus auf einzelne Bildausschnitte, durch Begrenzung des zu klassifizierenden Grauwertbereiches im zweidimensionalen Histogramm oder durch entsprechende Auswahl der Spektralbereiche erreicht werden. Der Generalisierungsgrad des Verfahrens kann primär durch Vorgabe der zu unterscheidenden Klassenzahl oder sekundär durch Anwendung auf entsprechend vorverarbeitete (z. B. hauptachsentransformierte) Primärdaten beeinflusst werden. Bei der Klassifizierung erfolgt eine solche Zerlegung des 2-dimensionalen Merkmalsraumes, daß die entstehenden Klassengebiete miteinander im Gleichgewicht stehen. Dadurch wird erreicht, daß der Merkmalsraum in Spektralklassenbereiche zerlegt wird, die für den Bildinhalt repräsentativ sind.

Der Algorithmus stellt eine Minimum-Distance-Klassifizierung dar. Die Trennflächen zwischen den Spektralklassen sind linear. Dadurch können ineinander verschachtelte Cluster nicht exakt getrennt werden. Solche Fälle können insbesondere bei Teilaspekten mit stark inhomogener Bildfunktion auftreten. Da auf Grund des Generalisierungseffektes bei der Hauptachsentransformation eine Homogenisierung der Bildfunktion erreicht werden kann, erweist sich in diesem Zusammenhang eine Datenvorverarbeitung durch Hauptachsen-

transformation als sinnvoll.

Im folgenden wird die Anwendung des Algorithmus mit vier verschiedenen Generalisierungsstufen auf die Hauptkomponenten des Bildbeispiels aus Abschnitt 4.1.2. betrachtet. Durch Anwendung der Hauptachsentransformation wurde eine Homogenisierung der primären Bildfunktion erreicht. Während der Algorithmus bei Anwendung auf die beiden Originalkanäle mit geringster Korrelation (K1 und K6) ca. 160 maximal unterscheidbare Objektklassen findet, sind in den ersten beiden Hauptkomponenten nur noch 62 Klassen unterscheidbar. Hauptkomponenten sind insofern besser zur Klassifizierung geeignet, als bei diesem Beispiel die Spektralbereiche 1 und 6.

In den Beilagen 6 bis 9 sind die Ergebnisse der Klassifizierung mit 4 verschiedenen Generalisierungsstufen (10 Klassen, 5 Klassen, 3 Klassen und 2 Klassen) dargestellt. In den Tabellen 5 bis 8 sind die Koordinaten der vom Algorithmus gefundenen Maxima des zweidimensionalen Histogramms und die durch iterative Minimum-Distance-Klassifizierung berechneten Koordinaten der gesuchten Repräsentanten wiedergegeben.

Bei einer 2-Klassen-Generalisierung findet der Algorithmus 2 repräsentative Klassen, denen durch Gebietskenntnis die Objekte Wasser und Land zugewiesen werden können. In Beilage 5 sind Wasserkörper durch die Farbe Rot und Festland durch Blau wiedergegeben. Einzelne Punkte, denen die Farbe Schwarz zugewiesen wurde, liegen außerhalb des Klassifizierungsintervalls (PC1: 1...200, PC2: 1...100). Fehlklassifikationen treten insbesondere an den Stellen der Wolken und Wolkenschatten auf, die auch in entsprechenden Farbsynthesen durch ihre Farbe nicht von Wasser unterschieden werden können. In den Grenzgebieten zwischen Wasser und Festland, z. B. im Bereich des Boddens und kleinerer Seen (Borgwall-See, Günzer See) erfolgt eine exakte Trennung, so daß eine Rayonierung der Wasserkörper des Aufnahmegebietes möglich ist.

Den bei der 3-Klassen-Generalisierung des Bildbeispiels entstehenden repräsentativen Klassen können die Objekte Wasser (rot), vegetationslose Gebiete (grün) und Gebiete mit Vegetation (blau) zugeordnet werden. Die thematische Karte in Beilage 10 wurde unmittelbar aus Beilage 7 abgeleitet. Klassifizierungsfehler, die durch Wolken und Wolkenschatten verursacht wurden, wurden dabei eliminiert. Zum Vergleich des durch unüberwachte Klassifizierung rayonierten Gebietes ist in Beilage 11 eine entsprechende thematische Karte der Landnutzung dieses Gebietes dargestellt. Diese Karte wurde als Bestandteil einer Diplomarbeit [12] aus vorhandenen thematischen Karten abgeleitet und durch stichprobenartige Bodenbegehungen präzisiert. Dabei konzentrierten sich die Bodenbegehungen auf das südwestliche Territorium des Kreisgebietes Stralsund/Land und ein ca. 20 km weiter nördlich liegendes Gebiet. Die als Ergebnis der unüberwachten Klassifizierung mit 3 Generalisierungsstufen in der Farbe Blau erscheinenden Flächen stimmen im wesentlichen mit den in der thematischen Karte erkennbaren Freiflächen überein. Einzelne Abweichungen begründen sich darin, daß bei der Bodenbegehung nur prinzipiell zwischen Freiflächen und bebauten Äckern unterschieden und nicht nach der Biomasse der bebauten Äcker differenziert wurde. Bei der unüberwachten Klassifizierung wird aber bei diesem Beispiel die Trennung zwischen vegetationslosen und bewachsenen Boden bei einer bestimmten Biomassenkonzentration pro Ackerfläche vollzogen, so daß ein Teil der in der

Tabelle 5: Koordinaten der Startvektoren und Repräsentanten bei der unüberwachten Klassifizierung des Bildbeispiels aus Beilage 1 mit 2 Objektklassen

Koordinaten der Startvektoren

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 59.000 | 97.000 | 70.000 | 66.000 | 77.000 | 71.000 | 64.000 | 69.000 | 66.000 | 68.000 |
| 16.000 | 49.000 | 10.000 | 12.000 | 4.000 | 2.000 | 5.000 | 4.000 | 5.000 | 9.000 |

Koordinaten der Repräsentanten

| | |
|-------|-------|
| 61.57 | 67.42 |
| 10.00 | 32.45 |

Tabelle 6: Koordinaten der Startvektoren und Repräsentanten bei der unüberwachten Klassifizierung des Bildbeispiels aus Beilage 1 mit 3 Objektklassen

Koordinaten der Startvektoren

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 59.000 | 97.000 | 70.000 | 66.000 | 77.000 | 71.000 | 64.000 | 69.000 | 66.000 | 68.000 |
| 16.000 | 49.000 | 10.000 | 12.000 | 4.000 | 2.000 | 5.000 | 4.000 | 5.000 | 9.000 |

Koordinaten der Repräsentanten

| | | |
|-------|-------|-------|
| 52.01 | 70.29 | 64.18 |
| 18.50 | 33.29 | 7.60 |

Tabelle 7: Koordinaten der Startvektoren und Repräsentanten bei der unüberwachten Klassifizierung des Bildbeispiels aus Beilage 1 mit 5 Objektklassen

Koordinaten der Startvektoren

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 59.000 | 97.000 | 70.000 | 66.000 | 77.000 | 71.000 | 64.000 | 69.000 | 66.000 | 68.000 |
| 16.000 | 49.000 | 10.000 | 12.000 | 4.000 | 2.000 | 5.000 | 4.000 | 5.000 | 9.000 |

Koordinaten der Repräsentanten

| | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 43.29 | 70.39 | 55.42 | 56.49 | 66.00 |
| 19.28 | 33.79 | 19.30 | 8.29 | 7.13 |

Tabelle 8: Koordinaten der Startvektoren und Repräsentanten bei der unüberwachten Klassifizierung des Bildbeispiels aus Beilage 1 mit 10 Objektklassen

Koordinaten der Startvektoren

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 72.000 | 73.000 | 72.000 | 59.000 | 66.000 | 98.000 | 78.000 | 66.000 | 72.000 | 70.000 |
| 10.000 | 6.000 | 8.000 | 16.000 | 2.000 | 49.000 | 4.000 | 5.000 | 2.000 | 7.000 |

Koordinaten der Repräsentanten

| | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 55.13 | 60.26 | 46.76 | 29.74 | 70.29 | 70.85 | 53.71 | 55.27 | 64.20 | 54.25 |
| 27.16 | 5.73 | 19.04 | 15.64 | 2.29 | 33.79 | 9.08 | 19.44 | 9.50 | 16.12 |

thematischen Karte als bebauter bzw. bewachsener Boden ausgewiesenen Flächen scheinbar falsch klassifiziert wird.

Eine detailliertere Rayonierung des Aufnahmegebietes ist durch unüberwachte Klassifizierung mit 5 Generalisierungsstufen möglich (Beilage 8). Durch Vergleich mit der thematischen Karte und durch entsprechende Bodenkenntnis können dabei die entstehenden Klassen z. T. als Unterklassen der mit 3 Generalisierungsstufen erfaßten Klassen aufgefaßt werden.

Mit 5 Generalisierungsstufen sind bei diesem Beispiel 2 Arten "Bewachsener Boden", 2 Arten "Unbewachsener Boden" und Wasser unterscheidbar. Grünland, Wald und Acker mit hoher Biomasse wurde in Beilage 8 gelb wiedergegeben, bestellter Acker mit geringer Biomasse hellblau, vegetationsloser Boden dunkelblau bzw. grünschwartz und Wasser rot. In der grünschwartz wiedergegebenen Klasse treten im Sinne der überwachten Klassifizierung Fehler auf, denn dieser Klasse werden z. T. Wolken und Wolkenschatten zugewiesen, da sie ähnliche Spektraleigenschaften wie vegetationsloser Boden besitzen.

Bei Ausführung der unüberwachten Klassifizierung mit 10 Generalisierungsstufen (Beilage 9) werden insbesondere Vegetationsgebiete, aber auch vegetationslose Böden weiter differenziert. Im Wasser erfolgt im Vergleich zu Beilage 6 keine höhere Differenzierung. Die Differenzierung innerhalb der land- und forstwirtschaftlich genutzten Gebiete erfolgt dabei so, daß zum Beispiel allen gelben Flächen der Beilage 9 die Vegetationsart "Wald" zugeordnet werden kann, so daß mit großer Genauigkeit eine unmittelbare Rayonierung der Waldbestände des Aufnahmegebietes möglich ist. Die in Beilage 12 dargestellte thematische Karte der Waldbestände des Aufnahmegebietes wurde aus Beilage 9 abgeleitet. Durch Vergleich mit der thematischen Karte aus Beilage 11 ist insbesondere in den durch Bodenbegehungen gesicherten Waldgebieten eine gute Übereinstimmung mit Beilage 11 erkennbar. Darüber hinaus sind mit 10 Generalisierungsstufen zum Beispiel auch verschiedene landwirtschaftliche Anbauarten unterscheidbar. Durch Vergleich mit der thematischen Karte sind in Beilage 9 u. a. Raps-, Rüben- und Maiskulturen zu unterscheiden. Neben den bereits bei drei und 5 Generalisierungsstufen aufgetretenen scheinbaren Klassifizierungsfehlern, die dadurch verursacht wurden, daß bei der Bodenbegehung die Klassifizierung nach fachspezifisch relevanten und nicht nach physikalischen Gesichtspunkten vorgenommen wurde, können bei mehr als 5 Generalisierungsstufen u. U. bereits Fehler des mathematischen Klassifizierungsformalismus erkennbar werden. Beispielsweise können bei flächenmäßig sehr kleinen Objekten Klassifizierungsfehler in den einzelnen Generalisierungsstufen auftreten, so daß diese Objekte bei verschiedenen Generalisierungsstufen unterschiedlichen Klassen zugewiesen werden.

Für jede Generalisierungsstufe erfolgt die Aufteilung des Merkmalsraumes in repräsentative Spektralklassen neu. Da flächenmäßig sehr kleine Objekte im Bildbeispiel für den Bildinhalt nicht repräsentativ sind, werden sie u. U. bei unterschiedlichen Generalisierungsstufen in unterschiedliche Klassen eingeordnet. Auf Grund der Linearität der Trennfunktion kann die Punktverteilung von nicht repräsentativen Objekten im Merkmalsraum zerschnitten und in unterschiedliche Klassen aufgespaltet werden.

Die Realisierung eines genaueren Klassifikators mit nichtlinearen bzw. stückweisen linearen Trennflächen ist zwar prinzipiell möglich, würde aber sehr aufwendig und kaum praktikabel sein. Außerdem sind bei der unüberwachten Klassifizierung prinzipiell keine apriori Kenntnisse über den Bildinhalt vorhanden. Die Klassifizierung erfolgt deshalb mathematisch rein formal, also nicht inhaltlich und ohne Zugrundelegung von allgemeinen und speziellen Objektmerkmalen, so daß die weitere Verbesserung des Klassifikators zu keiner sicheren Klassifizierung führen muß. Insofern kann das Ergebnis der unüberwachten Klassifizierung i. a. nur einen Näherungsvorschlag zur Bildrayonierung bzw. eine interpretationsgerechte Aufbereitung der Multispektraldaten in Form eines Farbbildes bedeuten. Aufgaben der anschließenden Bildinterpretation werden durch die unüberwachte Klassifizierung nicht gelöst.

4.2. Interpretationsgerechte Aufbereitung von Multispektralfotografien mit relativ homogener Bildfunktion

Relativ homogene Bildfunktionen lassen sich durch einfache statistische Parameter hinreichend genau beschreiben; die Bildobjekte sind i. a. großflächig und besitzen geringe Grauwertvarianzen. Im folgenden wird die Anwendung der einzelnen Verfahren auf einen Ausschnitt der MKF-6-Multispektralaufnahme des Süßen Sees mit der Ortschaft Seeburg bei Eisleben im Bezirk Halle diskutiert und insbesondere die Aufbereitung der Multispektraldaten im relativ homogenen Wassergebiet untersucht.

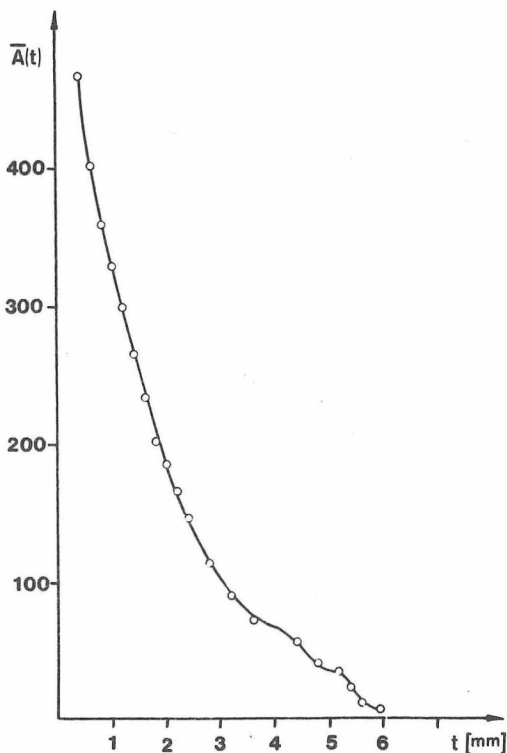


Abb. 20 Eindimensionale Autokovarianzfunktion des Bildbeispiels nach Beilage 13

Beilage 13 zeigt eine konventionelle Standardfarbsynthese des betreffenden Gebietes. In Abb. 20 ist die Autokovarianzfunktion des Bildbeispiels dargestellt.

Die mittlere Objektgröße beträgt auf dem Primärbild ca. 12 mm, das entspricht bei einem Bildmaßstab von 1 : 56000 einer Originalgröße von ca. 700 m bzw. etwa 25 % des Gesamtbildes.

In Tabelle 9 sind die Grauwertmittel der Spektralbereiche 1 bis 6, die Kovarianzmatrix und die Korrelationsmatrix des Bildbeispiels dargestellt. Einen großen Teil des Bildes bildet eine relativ homogene Wasserfläche. Aus einem 10 x 10 mm² großen Fensterbereich dieser homogenen Fläche wurden die in Tabelle 10 dargestellten statistischen Größen ermittelt. Die Standardabweichungen innerhalb des Seegebietes betragen ca. 4 bis 10 Grauwerte und damit ca. 20 % der Standardabweichungen des Gesamtbildes.

Die Häufigkeitsverteilung der Grauwerte entspricht dabei näherungsweise einer Gaußverteilung, so daß das Seegebiet als homogene Fläche angenommen werden kann. Zur interpretationsgerechten Aufbereitung sind bei

relativ homogenen Bildfunktionen vor allem der Algorithmus zur Farboptimierung durch Egalisierung des Histogramms der Farbwertanteile und unter bestimmten Bedingungen auch der Algorithmus zur unüberwachten Klassifizierung geeignet, da diese Algorithmen vor allem flächenhafte Zusammenhänge finden.

Tabelle 9: Grauwertmittelwerte, Kovarianz- und Korrelationsmatrix der Multispektralaufnahme nach Beilage 13

Grauwertmittel der Kanäle 1-6:

103.46 129.37 135.22 138.65 78.41 93.49

Kovarianzmatrix:

| | | | | | |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 980.87 | 943.14 | 901.24 | 874.44 | 904.35 | 194.19 |
| 0.00 | 1347.05 | 1142.69 | 1034.16 | 1152.51 | 308.73 |
| 0.00 | 0.00 | 1679.16 | 1220.37 | 1050.54 | 109.25 |
| 0.00 | 1.00 | 0.00 | 1758.86 | 1066.57 | 336.93 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1713.09 | 871.77 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1107.35 |

Korrelationsmatrix:

| | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|
| 1.00 | .82 | .70 | .67 | .70 | .19 |
| 0.00 | 1.00 | .76 | .67 | .76 | .25 |
| 0.00 | 0.00 | 1.00 | .71 | .62 | .08 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | .61 | .24 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | .63 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 |

Tabelle 10: Grauwertmittelwerte, Kovarianz- und Korrelationsmatrix eines innerhalb des Seegebietes der Beilage 13 liegenden Fensterbereiches

Grauwertmittel der Kanäle 1-6:

94.73 118.20 127.49 116.52 40.77 51.42

Kovarianzmatrix:

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 43.94 | 28.98 | 30.90 | 28.54 | 24.82 | 6.43 |
| 0.00 | 49.85 | 32.83 | 28.33 | 26.40 | 7.70 |
| 0.00 | 0.00 | 53.50 | 30.13 | 27.78 | 6.08 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 60.14 | 20.70 | 4.21 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 47.89 | 16.67 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 17.95 |

Korrelationsmatrix:

| | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|
| 1.00 | .62 | .64 | .56 | .54 | .23 |
| 0.00 | 1.00 | .64 | .52 | .54 | .26 |
| 0.00 | 0.00 | 1.00 | .53 | .55 | .20 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | .39 | .13 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | .57 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 |

Beilage 14 ist ein Beispiel zur thematischen Aufbereitung des beschriebenen Bildausschnittes durch Anwendung des Algorithmus zur Farboptimierung auf die wasserwirtschaftlich informativen Spektralbereiche 480, 600 und 720 nm. Der Algorithmus findet innerhalb der Wasserfläche eine Vielzahl von flächenmäßigen Zusammenhängen, die sich jeweils als unterschiedliche Wasserqualitäten und Tiefen interpretieren lassen. So wird z. B. im Bereich der Uferzonen eine sehr starke Farbdifferenzierung sichtbar, die mit Tiefenlinien des Sees stark korreliert. Durch Pseudocolorierung der Einzelkanäle waren solche Wasserstrukturen nicht nachweisbar [31], erst die Verarbeitung der Multispektralinformation aus 3 Spektralbereichen ermöglichte die Abgrenzung von unterschiedlichen Wasserqualitäten bzw. Wassertiefen, wie es Beilage 14 zeigt. Auf konventionellen Farbynthesen der Originalkanäle war eine Interpretation des Wasserkörpers nicht möglich.

Die Anwendung des Algorithmus auf andere Kombinationen von 3 Spektralbereichen führte zu ähnlichen Ergebnissen, bei denen Teilaspekte der Strukturierung des Sees nach Beilage 13 nachweisbar waren. Eine Vorverarbeitung der Primärdaten durch Hauptachsentransformation führte zu keiner weiteren Bildverbesserung. Das begründet sich darin, daß erstens die für diesen Bildausschnitt interessierenden thematischen Informationen bereits in den 3 ausgewählten Spektralbereichen enthalten sind und daß zweitens durch die Homogenisierung bei der Hauptachsentransformation die bereits geringen Grauwertvarianzen noch weiter verkleinert werden. Aus diesem Grund ist die Anwendung des Verfahrens der unüberwachten Klassifizierung auf die ersten beiden Hauptkomponenten bei homogenen Bildfunktionen wenig erfolgversprechend. Bei Anwendung auf zwei ausgewählte Spektralbereiche ist keine so komplexe Informationsaufbereitung zu erwarten, wie sie mit dem Verfahren zur Farboptimierung von 3 Spektralbereichen erzielt werden kann. Dabei ist außerdem zu beachten, daß bei homogenen Bildfunktionen die Verteilungswolken im spektralen Merkmalsraum sehr dicht benachbart, u. U. sogar ineinander verschachtelt sind. Die Aufteilung des Merkmalsraumes durch lineare Trennfunktionen kann also insbesondere bei homogenen Bildfunktionen zu Fehlklassifikationen führen. Die unüberwachte Klassifizierung von homogenen Bildfunktionen bleibt deshalb der speziellen thematischen Bildaufbereitung vorbehalten.

4.3. Prinzipielle Schlußfolgerungen zur Anwendung der beschriebenen Verfahren zu interpretationsgerechten Aufbereitung von Multispektraldaten

Die Anwendung der beschriebenen Verfahren zur interpretationsgerechten Datenaufbereitung wird einerseits bestimmt durch die Art der Bildfunktion und andererseits durch das Ziel der thematischen Interpretation. Da die Gesetze, nach denen die visuelle Bildinterpretation im Komplex Auge-Gehirn abläuft, gegenwärtig noch nicht vollständig bekannt und formalisierbar sind, ist auch die Angabe von Bedingungen für die Auswahl der einzelnen Verfahren zur Bildverbesserung nur bedingt und für sehr allgemeine Fälle möglich. Aus den in Abschnitt 4.1. und 4.2. untersuchten Beispielen wurde das in Tabelle 11 zusammengestellte Schema zur Anwendung der einzelnen Verfahren zusammengestellt. Die Klassifizierung des Bildinhaltes bzw. der Bildfunktion erfolgte dabei nach den in Abschnitt 4.1. und 4.2. herausgestellten Gesichtspunkten für die interpretationsgerechte digitale Datenaufbereitung. Die Übergänge zwischen den einzelnen Bildfunktionstypen

sind kontinuierlich. In Tabelle 11 ist außerdem für jeden Bildfunktionstyp nach prinzipiell allgemeinen Interpretationszielen unterschieden, so daß einer konkreten Interpretationsaufgabe ein entsprechender Algorithmus zurinterpretationsgerechten Datenaufbereitung zugeordnet werden kann.

Tabelle 11: Bedingungen zur optimalen Anwendung der Verfahren zur interpretationsgerechten Aufbereitung von Multispektraldaten

| Allgemeine Merkmale des Bildinhaltes | Beispiel zum Bildinhalt | Typ der Bildfunktion | Ziel der Interpretation | Algorithmus | Bemerkungen |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| große Objektmanigfaltigkeit vorwieg. Feinstruktur | Kosmosaufn. intensiv bewirtschaftet. Gebiete | inhomog. (stark i.) | Gesamtbildauswertung thematische Bildauswertung | Datenverdichtung, Transf. des reduzierten Merkmalsraumes Auswahl von Spektralbereichen, Transf. des entspr. Merkmalsraumes | bei stark inhomog. Bildfunkt. ist u. U. keine definierte Datenaufbereitung möglich |
| große Objektmanigfaltigkeit, vorwieg. Flächenstruktur | kleinmaßstäb. Aufnahm. von landw. und forstw. Gebieten | inhomog. mit relativ homogenen Teilaspekten | Gesamtbildauswertung thematische Bildauswertung Erfassung des repräsent. Bildinhaltes | Datenverdichtung a) Transf. des red. Merkmalsraumes b) Farboptimierung Auswahl der Spektralb. a) Transf. des entspr. Merkmalsraumes b) Farboptimierung Datenverdichtung, unüberwachte Klassifizier. | |
| geringe bis mittlere Objektmanigf. mit Feinstruktur | Aufn. von großflächig. Gebieten mit Strukturgeolog. Informationen | schwach inhomogen | Erfassung d. Strukturinformation Erfassung d. stoffl. Information, Rayon. von Flächen | Datenverdichtung, Transf. des reduzierten Merkmalsraumes Datenverdichtung, Farboptimierung | |
| mittlere bis geringe Objektmanigf. Einzelobjekte ohne Feinstruktur | großmaßstäb. Aufnahme von land.- und forstw. Gebieten | relativ homogen | Erfassung v. stoffl. Informationen, Rayonierung von flächenhaften Erscheinungen | Datenverdichtung a) Farboptimierung b) unüberwachte Klassifizierung | bei homog. Bildfunktion werden durch Datenverdichtung u. U. geringe Objektunterunterschiede homogenisiert. |
| großflächige Einzelobjekte | Wasserkörper, Wassergebiete | homogen | Rayonierung von großflächigen Erscheinungen | Auswahl von geeigneten Spektralbereichen, Farboptimierung | Verfahren der Klassifiz. mit linearen Trennflächen führen u. U. zu Fehlklassifizierungen |

5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

In der gegenwärtigen Etappe der internationalen Entwicklung auf dem Gebiet der Auswertung von Fernerkundungsdaten werden ca. 90% aller mit Fernerkundungssystemen erfaßten Daten durch visuelle Interpretation von entsprechend trainierten Fachexperten ausgewertet. Auf Grund der hohen Qualität und Quantität der mit Multispektralsensoren erreichbaren Informationen hat dabei die Auswertung von Multispektraldaten besondere Bedeutung. Im Rahmen der INTERKOSMOS-Kooperation wurde 1976 vom VEB Carl Zeiss Jena die Multispektralkamera MKF-6 entwickelt und während des Experimentes RADUGA zum ersten Mal im Flugzeug bzw. Satelliten eingesetzt. Die mit dieser Multispektralkamera gewonnenen Fotografien stellen einen Speicher mit sehr hohem Grad an verdichteten speziellen Informationen dar; jedoch nur ein Teil dieser Informationen ist durch direkte visuelle Interpretation erschließbar. Vom VEB Carl Zeiss Jena wurde deshalb parallel zur Multispektralkamera MKF-6 ein entsprechendes analoges Auswertegerät, der Multispektralprojektor MSP 4, konstruiert und hergestellt. Damit stand im Rahmen der IK-Kooperation erstmalig ein optimal aufeinander abgestimmtes Gerätesystem zur konventionellen Auswertung von Multispektralaufnahmen zur Verfügung. Eine umfassende visuelle Datenanalyse setzt jedoch eine weitere Vorverarbeitung der Multispektraldaten voraus, in deren Endergebnis eine Abbildungsform entsteht, durch die die Primärdaten optimal für das angestrebte Interpretationsziel an das menschliche Wahrnehmungsvermögen angepaßt werden. Dieser Forderung kann die konventionelle analoge Aufbereitung von Multispektralaufnahmen nicht vollständig gerecht werden, so daß eine zusätzliche Datenverarbeitung mit modernen Computeranlagen zur Bildbearbeitung erforderlich ist. Dabei kommt es insbesondere darauf an, dem menschlichen Bildinterpreten durch entsprechende Datenaufbereitung die Erfassung der gegenüber der konventionellen Luftbildtechnik in Multispektralaufnahmen enthaltenen zusätzlichen stofflichen Informationen zu erleichtern bzw. überhaupt erst zu ermöglichen.

Die Anpassung des Datenmaterials ist jedoch nur für spezielle formalisierbare Schritte des Interpretationsvorganges im Komplex Auge-Gehirn möglich. Insbesondere lassen sich einige physikalische und physiologische Aspekte der Bildwahrnehmung als erste Stufe der Bildinterpretation in Form von Gesetzmäßigkeiten erfassen, so daß sie als Grundlage für die Entwicklung von mathematischen Algorithmen zur interpretationsgerechten Bildaufbereitung dienen können. Rein formal ordnet sich die Problematik der Aufbereitung von Multispektralaufnahmen in das international bereits gut erforschte Gebiet der Bildverbesserung ein, es zeigt sich jedoch, daß es gegenwärtig nur wenige fundierte Erkenntnisse zur interpretationsgerechten Aufbereitung von Multispektralaufnahmen allgemein und insbesondere von Aufnahmen der Multispektralkamera MKF-6 gibt. Für die interpretationsgerechte Bildaufbereitung hat auf Grund der speziellen formalisierbaren Empfindlichkeitseigenschaften des Auges insbesondere die Darstellung der Primärdaten als Farbbild große Bedeutung. Die gegenwärtig international existierenden digitalen und analogen Gerätesysteme zur Aufbereitung von Mono- und Multispektraldaten ermöglichen zwar i. a. eine Darstellung der sekundären Bildfunktion auf Farbdisplays oder entsprechenden Bildschirmen, die zur Synthese des Farbbildes erforderlichen Parameter werden aber mehr oder weniger intuitiv vom Interpreten selbst eingestellt, so daß dadurch sowohl der Interpretationsertrag als auch das Interpretationsergebnis sub-

jektiven Einflüssen unterliegen.

Die vorliegende Arbeit hat deshalb die Problematik der interpretationsgerechten Aufbereitung von Multispektraldaten als Farbbild zum Inhalt. Das Ziel bestand darin, für ein spezielles Gerätesystem, ausgehend von den physikalischen Eigenschaften der Fernerkundungsdaten und den physiologischen Eigenschaften des Auges bei der Wahrnehmung von Farbbildern Algorithmen zur Optimierung der Darstellung von MKF 6-Multispektralfotografien als Farbbild zu entwickeln und auf ihre Leistungsfähigkeit an Aufnahmen der Multispektralkamera MKF-6 zu prüfen. Aus den physiologischen Eigenschaften des Auges bei der Interpretation von Farbbildern leitet sich ab, daß der Farbabstand zwischen benachbarten Objekten bzw. die Farbdifferenzierung im Gesamtbild von hauptsächlichster Bedeutung für die Erfassung der strukturellen und insbesondere der stofflichen Differenziertheit der abgebildeten Bodenobjekte ist. Insgesamt lassen sich aus physiologischen und psychologischen Eigenschaften des Komplexes Auge-Gehirn folgende Anforderungen an die interpretationsgerechte Aufbereitung von Multispektraldaten ableiten:

1. Die Daten aus allen für die thematische Interpretation informativen Spektralbereichen eines Multispektral-Aufnahmesatzes sind auf ein Farbbild zu reduzieren.
2. Alle für die Bildinterpretation interessierenden Bildbereiche sind optimal farbdifferenziert darzustellen.
3. Effekte des Simultankontrastsehens, die die Objektivität der Interpretation beeinträchtigen, sollen vernachlässigbar sein.
4. Für spezielle Interpretationsaufgaben ist die Information bereits soweit zu reduzieren, daß entsprechend dem Interpretationsziel die Wahrnehmung von spektralen stofflichen Eigenschaften optimiert wird.

Die Realisierung dieser Forderung setzt eine Gerätetechnik voraus, die prinzipiell beliebige mathematische Transformationen der primären Bildfunktion gestattet und eine sowohl geometrisch als auch farbmétrisch präzise Darstellung der sekundären Bildfunktion erlaubt. Mit Hilfe von speziellen Scannersystemen können analoge Multispektralaufnahmen mit hoher radiometrischer und geometrischer Präzision in digitale Bildmatrizen umgewandelt werden. Auf diese Matrizen können mit Hilfe von schnellen Computern nahezu beliebige mathematische Algorithmen angewandt werden. Eine geometrisch und farbmétrisch präzise Darstellung von Farbbildern ist mit Farbmischprojektoren möglich. Diese Farbmischprojektoren werden im allgemeinen zur Synthese von farbigen Bildern aus 3 ausgewählten Spektralbereichen einer Multispektralaufnahme genutzt. Durch Kopplung eines solchen Farbmischprojektors mit einer Computeranlage zur digitalen Bildbearbeitung erhält man ein quasi-Hybridsystem, das die o. g. Anforderungen erfüllt. Die Farbbilderzeugung erfolgt dabei so, daß der Computer die dreiparametrische sekundäre Bildfunktion errechnet und in Form von drei Schwarzweißbildern ausgibt. Durch Farbcodierung dieser Schwarzweißbilder und anschließender additiver Mischung im Farbmischprojektor entsteht eine präzise farbige Abbildung. Für eine solche Gerätetechnik, bestehend aus dem Multispektralprojektor MSP 4 des VEB Carl Zeiss Jena und einer digitalen

Bildverarbeitungsanlage der Firma Optronics (USA) wurden verschiedene Algorithmen zur interpretationsgerechten Aufbereitung von Aufnahmen der Multispektralkamera MKF 6 entwickelt und an ausgewählten Bildbeispielen, die während des RADUGA-Experimentes erhalten wurden, diskutiert.

Es zeigt sich, daß der mittlere Korrelationskoeffizient von benachbarten Spektralbereichen der mit der MKF 6 gewonnenen Aufnahmen zwischen 0,6 und 0,8 liegt. Daraus ergibt sich, daß in einem MKF 6 Aufnahmesatz auch ein entsprechend hoher Anteil an redundanter Information enthalten ist. Durch Anwendung des Verfahrens der Hauptachsen-Transformation auf MKF 6-Aufnahmen können ca. 80-95% der Gesamtinformation eines sechskanaligen Aufnahmesatzes auf 2-3 Hauptkomponenten verdichtet werden. Dadurch ist es möglich, bei der weiteren Verarbeitung der Multispektraldaten anstelle des 6-dimensionalen Objektmerkmalsraumes der MKF 6-Aufnahmen einen 2 oder 3-dimensionalen Merkmalsraum der Hauptkomponenten zu benutzen. Zur Weiterverarbeitung der verdichteten Multispektraldaten wurden für die o. g. Gerätetechnik Algorithmen entwickelt, die eine interpretationsgerechte Aufbereitung durch:

1. Egalisierung des zweidimensionalen Histogramms der Farbwertanteile
2. lineare Transformation des Merkmalsraumes und
3. unüberwachte Klassifizierung

ermöglichen. Zur Ein- und Ausgabe der primären bzw. sekundären Bildfunktion auf periphere Datenspeicher wurden die MKF-6-Multispektraldaten als Multispektral-File codiert bzw. organisiert.

Das Verfahren zur Farboptimierung durch Egalisierung des 2-dimensionalen Histogramms der Farbwertanteile wurde in Anlehnung an das bekannte Verfahren der Histogrammegalisierung bei einzelnen Schwarzweißbildern entwickelt. Im ersten Teil des Algorithmus werden für jeden Bildpunkt einer primären dreiparametrischen Bildfunktion die empfindungsgerechten Farbkoordinaten entsprechend einem Modell der Farbmischung im Farbmischprojektor MSP 4 berechnet und ihre Häufigkeiten abgespeichert. Daraus werden Transformationsbeziehungen abgeleitet mit denen eine dreiparametrische sekundäre Bildfunktion so berechnet wird, daß durch Farbcodierung der entsprechenden drei Schwarzweißbilder im Farbmischprojektor ein optimal farbdifferenziertes Bild entsteht.

Bei der linearen Transformation des Merkmalsraumes wird ein neuer Merkmalsraum so in das Koordinatensystem des alten Raumes gelegt, daß der Öffnungswinkel der der Bildfunktion entsprechenden Punktwolken möglichst 90° wird. Dadurch erreicht man, daß insbesondere die Farbtondifferenzierung im zugeordneten Farbmischbild maximal wird.

Die unüberwachte Klassifizierung wird durch Minimum-Distance-Klassifizierung realisiert. Dabei wird ein zweidimensionales Histogramm in einzelne Bereiche zerlegt, die Objekten mit ähnlichen Spektraleigenschaften entsprechen. Durch Vorgabe der Anzahl der Bereiche kann der Grad, mit dem das Bild bei der Klassifizierung generali-

siert wird, vorgegeben werden. Entsprechend der Zerlegung des Histogramms wird eine dreiparametrische Bildfunktion berechnet, so daß nach der Farbmischung im Farbmischprojektor jeder Klasse als Merkmal eine entsprechende Farbe zugewiesen wird.

Die einzelnen Verfahren zur interpretationsgerechten Aufbereitung von MKF-6-Multispektralfotografien können mathematisch rein formal auf beliebige Bildfunktionen angewandt werden. Sie erweisen sich dabei jedoch als unterschiedlich leistungsfähig. Es zeigt sich, daß die Leistungsfähigkeit im starken Maße von der Homogenität der primären Bildfunktion abhängt. An ausgewählten Beispielen wurde deshalb die Anwendung auf verschiedene Typen von Bildfunktionen diskutiert. Zur Unterscheidung der Bildfunktionstypen wurde neben dem Histogramm bzw. den Grauwertvarianzen die mittlere Objektgröße benutzt, die aus der Autokovarianzfunktion der entsprechenden Bildfunktion abgeschätzt wurde. Insbesondere zeigt sich, daß das Verfahren der Egalisierung des Histogramms der Farbwertanteile bei inhomogenen Bildfunktionen weniger leistungsfähig ist als bei relativ homogenen Bildfunktionen oder inhomogenen Bildfunktionen mit homogenen Teilaspekten. Insofern eignet es sich besonders zur Untersuchung bzw. interpretationsgerechten Aufbereitung von flächenmäßigen Effekten, wie sie z. B. bei Wasserkörpern auftreten.

Das Verfahren zur interpretationsgerechten Datenaufbereitung durch unüberwachte Klassifizierung kann auf inhomogene bis schwach homogene Bildfunktionen angewandt werden und liefert mit entsprechendem Generalisierungsgrad eine interpretationsgerechte Darstellung des repräsentativen Bildinhaltes. Bei stark inhomogenen und relativ homogenen Bildfunktionen können Klassifikationsfehler auftreten, die zu Fehlinterpretationen führen können.

Das Verfahren der linearen Transformation des Merkmalsraumes führt insbesondere bei inhomogenen Bildfunktionen zur Bildverbesserung.

Alle beschriebenen und erprobten Verfahren liefern eine rein qualitative Bildverbesserung, die Filtercharakteristika der Verfahren sind dabei so kompliziert, daß bei der Interpretation ein Rückschluß aus dem verbesserten Sekundärbild auf spektrale Objekteigenschaften kaum möglich ist. Deshalb kann die Interpretation dieser speziell aufbereiteten Bilder nur im Sinne einer überwachten Klassifizierung unter Verwendung des Ausgangsmaterials oder von konventionellen Farbsynthesen aus Multispektralaufnahmen erfolgen. Das interpretationsgerecht aufbereitete Bild ermöglicht dabei insbesondere die Wahrnehmung und Rayonierung von qualitativen stofflichen Unterschieden der abgebildeten Bodenobjekte, was zu einer umfassenden und objektiven Bildauswertung beiträgt.

Die einzelnen Verfahren zur interpretationsgerechten Aufbereitung von Multispektraldaten wurden für ein spezielles Gerätesystem und insbesondere für die Verarbeitung von Aufnahmen der Multispektralkamera MKF-6 entwickelt. Die Übertragung der Algorithmen auf ähnliche off-line Hybridsysteme sowie auf digitale Bildverarbeitungssysteme mit on-line gekoppelten Farbdisplays ist unter Berücksichtigung entsprechender Gerätespezifika prinzipiell möglich. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der

entwickelten Verfahren lassen darauf schließen, daß bei ähnlichen Bildfunktionstypen aus Multispektraldaten, die mit anderen Fernerkundungssystemen gewonnen werden, auch eine entsprechende interpretationsgerechte Bildaufbereitung erreicht werden kann. Neben der Anwendung der Algorithmen auf multitemporale Abbildungen möglich, wodurch insbesondere eine hohe Auflösung der zeitlichen dynamischen Entwicklungsabschnitte bestimmter stofflicher Objekteigenschaften erreicht werden können. Inwieweit dabei jedoch psychologische Aspekte der Bildwahrnehmung berücksichtigt werden, bleibt weiteren Arbeiten vorbehalten.

6. Literaturverzeichnis

- 1 ACKERL, F.: Remote Sensing in Österreich
Österr. Z. Vermess.-Wesen, 59 (1971)3, S. 65-68
- 2 ALBERTZ, J.: Sehen und Wahrnehmen bei der Luftbildinterpretation
Bildmess.- Luftbildwesen, 38(1970)1, S. 25-34
- 3 ALBERTZ, J.: Fernerkundung in den USA
Bildmess.- Luftbildwesen, 42(1974)3, S. 106-115
- 4 ALBERTZ, J.: Über den menschlichen Beobachter in der Fernerkundung
Festschr. Schwidersky, 1975, S. 21-37
- 5 ALBERTZ, J.: Über den gegenwärtigen Stand in der Fernerkundung
Vermess., Photogram., Kulturtechnik, 73(1975)10, S. 219-221
- 6 ANDREWS, H.: Verarbeitung von Bildinformation mit Digitalrechnern
Endeavour, 31(1972)113, S. 88-94
- 7 ANDREWS, H.: Image processing by digital computer
IEEE Spectrum, (1972)6, S. 20-32
- 8 ANDREWS, H.: Digital image restoration: A Survey
IEEE Computer Groups News, (1974)5, S. 36-45
- 9 ARENS, H.: Farbmeterik
Berlin: Akademie Verlag 1951
- 10 ASSELN, J.: Verfahren der Farbbildverarbeitung zur digitalen Speicherung von
Farbbildern und zur Colorierung von Grauwertbildern
Diss., Techn. Hochschule Aachen, Aachen 1976
- 11 AUTORENKOLLEKTIV: Automatische Bildverarbeitung in Medizin und Biologie
Dresden: Verlag Theodor Steinkopff 1975
- 12 BAGANZ, U.; ROTH, W.: Strukturen der Flächennutzung im Bezirk Rostock und ihre
Widerspiegelung in Multispektralaufnahmen aus SOJUS 22
Diplomarbeit, Pädagog. Hochschule Potsdam, Potsdam 1979
- 13 BANKWITZ, P.; BANKWITZ, E.: Bericht zur Auswertung des bemannten Kosmosexperimentes
auf SALUT 6
Zentralinst. Physik Erde, Berlin 1979
(unveröff.)
- 14 BODECHTEL, J. u.a.: Regional tectonic evaluation of the Tuscan Alpine, volcanism,
thermal anomalies and the relation to structural units. Part II: Methodological
investigations
Univ. München,
München: 1975, S. 79-134

- 15 BROSIN, H.J.: Bericht zur ozeanologischen Auswertung des bemannten Kosmosexperimentes auf SALUT 6
Inst. Meereskd., Warnemünde 1979, (unveröff.)
- 16 BROWN, W.C.J. and ADAM, D.L.: Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences
Journ. of optical Soc. of America, 39(1949)10, S. 808
- 17 CHAPANIS, A.: Spectral Saturation and its Relation to Colorvision Defects
J. exper. Psych. 34(1944), S. 24
- 18 CHEVALIER, R.; FONTANEL, A.; GRAU, G. u. a.:
Application of optical filtering to the study of aerial photographs
Photogram. 26(1970)1, S. 17
- 19 DITTEL, R.H.: Identifizierung und Behebung von Fehlern bei der kontrollierten Klassifikation multispektraler Bilddaten
Bildmess. u. Luftbildwesen, 44(1976)3, S. 99-107
- 20 KRAUS, K.: Zur Theorie der Klassifizierung multispektraler Bilder
Bildmess. u. Luftbildwesen, 47(1979)4, S. 119-128
- 21 DONKER, N.H.W.; MULDER, N.J.: Analysis of MSS digital imagery with the aid of principal component transform.
Entschede: 1976
- 22 FADDEJEW, D.K.; FADDEJEWA, W.N.: Numerische Methoden der linearen Algebra
Berlin: VEB Verlag der Wissenschaften 1964
- 23 GILBERTSON, B.; LONGSHAW, T.G.: Multispectral aerial photography as exploration tool-I: Concepts, techniques and instrumentation
Remote Sens. of Environm., 4(1975)2, S. 129-146
- 24 GOETZ, A.F.H. u.a.: Application of ERTS images and image processing to regional geologic problems and geologic mapping in northern Amazona
California instituts of technology, California 1975
- 25 HARLICK, R.M.; SHANMUGAN, K.: Combined spectral and spatial processing of ERTS imagery data
Remote sens. of Environm., 3(1974)3, S. 313
- 26 HELBIG, E.: Lichtmeßtechnik
Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1977
- 27 HELBIG, H.S.; TZSCHUPKE, W.: A new method for evaluating and mapping colours in aerial photographs
Proc. 8-th Int. Symp. Remote Sensing Env., Univ. Michigan, 2(1972), S. 959-968

- 28 HEMPENIUS, S.A.: Physiological and psychological aspects of photointerpretation
Int. Arch. Phot., (17, Teil 4), 1968
- 29 HERDA, K.: Stand der instrumentellen Technik zur Luftbildinterpretation
Vermess.-Technik, 22(1974)12, S. 441-446
- 30 HOLDERMANN, F.: Methoden der Bildverbesserung
Bildmess. u. Luftbildwesen, 44(1976)2, S. 53-61
- 31 JUNG, E.; SEIDEL, E.; SLAWIK, R.: Bericht zur Auswertung der MKF 6-Aufnahme des
Gebietes "Süßer See"
Institut für Wasserwirtschaft, Berlin 1976, (unveröff.)
- 32 KAUTZLEBEN, H. u.a.: First Results of the experiment Raduga for photographic re-
mote sensing
ESA SP-134 (OST Conference Toulouse), March 1978, S. 17-26
- 33 KAUTZLEBEN, H.; KROITZSCH, V.; WIRTH, H.: Die Fernerkundung der Erde mit der Multi-
spektralfotografie
Vermess.-Technik, 25(1977)3, S. 78-80
- 34 KAUTZLEBEN, H.; SÖLLNER, R.: Fernerkundung der Erde durch Multispektralfotografie
Wiss. u. Fortschritt, 27(1977)7, S. 320-324
- 35 KAUTZLEBEN, H.; WIRTH, H.; BANKWITZ, P.: Multispektralaufnahmen des Raduga-
Experiments. Erste Erfahrungen und Ergebnisse der Auswertung
Wiss. u. Fortschritt, 27(1977)10, S. 469-474
- 36 KROESCH, V.: Der SDC-Farbmischprojektor - ein einfaches Auswertegerät für Multi-
spektralbilder
Bildmess. u. Luftbildwesen, 42(1974)2, S. 53-56
- 37 KROITZSCH, V.: Multispektralfotografie
Bild und Ton, 30(1977)6, S. 165-173, 180
- 38 KROITZSCH, V.; SÖLLNER, R.: Zur Synthese von Multispektralaufnahmen aus MKF 6-
Bildern
Zentralinst. Physik Erde, Potsdam 1978, (unveröff.)
- 39 LAURENS, H.; HAMILTON, W.: The Sensibility of the eye in differences of wavelengths.
Amer. I. Physicl., 65(1923), S. 547-568
- 40 Manual of Remote Sensing. Vol.I: Theory, Instruments, Techniques
Falls Church, Virginia: Amer. Soc. of Photogr. 1975
- 41 MAURER, H.: Untersuchungen zur Unterscheidbarkeit landwirtschaftlicher Kulturen im
farbigen Luftbild
Dissertation, Universität Zürich, Zürich 1965

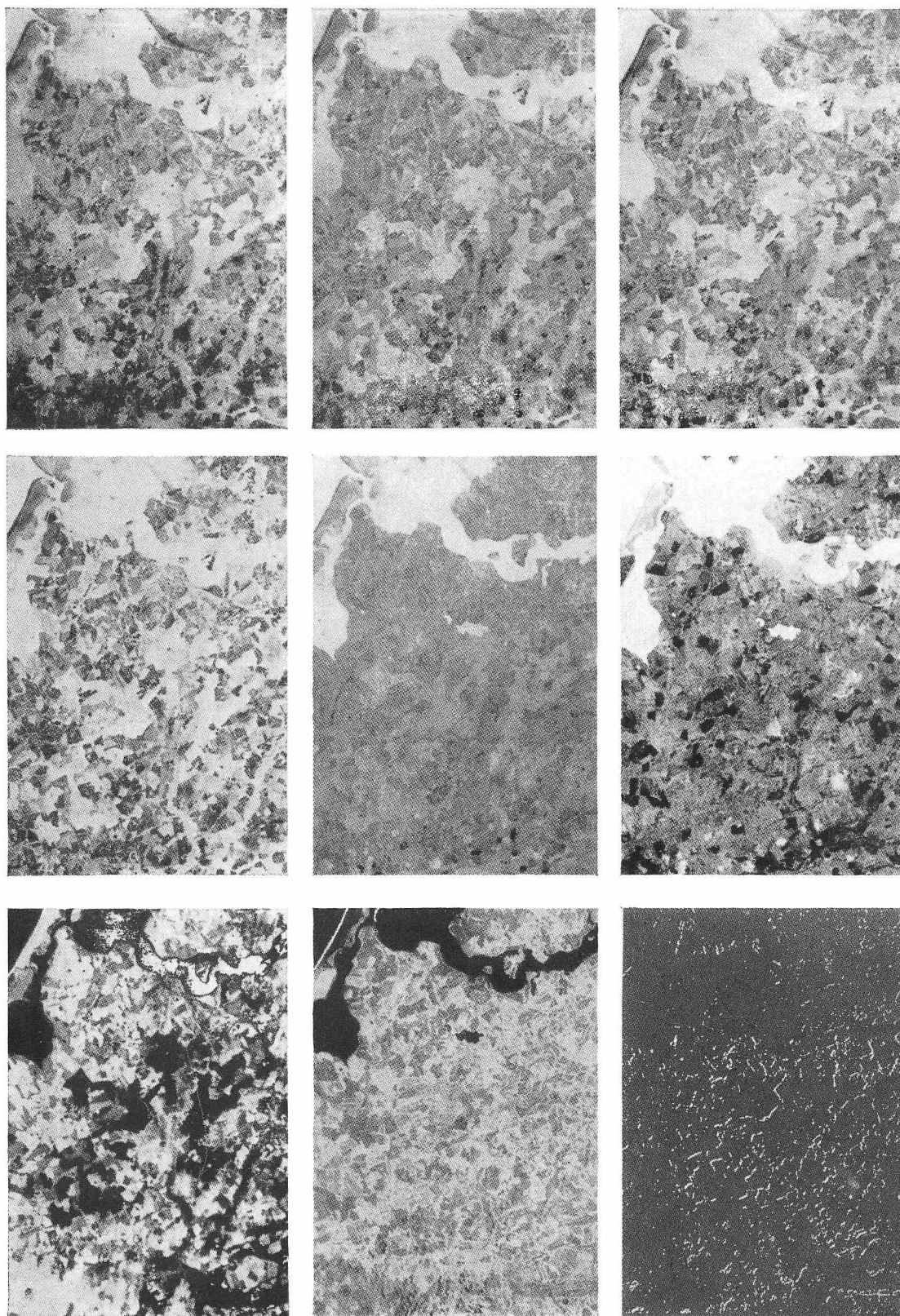
- 42 MEHNERT, H.: Die Farbe in Film und Fernsehen
Leipzig: Foto-Kino- Verlag: 1974
- 43 MEILI, R. und ROHRACHER, H.: Lehrbuch der experimentellen Psychologie
Bern-Stuttgart: 1963
- 44 MUNDAY, J.C. and ALFÖLDI, T.T.: Chromaticity Changes from isoluminous
techniques used to enhance multispectral remote sensing data
Remote Sensing of Environ., 4(1975)3, S. 221-236
- 45 NELSON, J.H.: The colour vision characteristics of a trichromat
Part 2, Proc. Phys. Soc. 49(1937), S. 332-337
- 46 PEIPMANN, R.: Grundlagen der technischen Erkennung
Berlin: VEB Verlag der Technik 1975
- 47 SCHANDA, E.: Remote sensing for environmental sciences
Berlin- Heidelberg- New York 1976
- 48 SCHMIDT - FALKENBERG, H.: Zur Theorie der Bildauffassung und zur Methodik der
Fotointerpretation
Actes du IIE Symposium Internat. de Photointerpretat. 1966
Paris 1966
- 49 SCHMIDT - FALKENBERG, H.: Interne und integrale Fotointerpretation
Bildmess. u. Luftbildwesen 38(1970)5, S. 313-318
- 50 SCHMIDT - FALKENBERG, H.: Zur Grundlagenforschung in der Fotointerpretation
Nachr. Karten und Vermess.-Wesen Reihe 1, 50(1970), S. 47-51
- 51 SCHOBER, H.: Das Sehen
Leipzig: Fachbuchverlag GmbH 1954
- 52 SCHULTZE, W.: Farbenlehre und Farbmessung
Springer-Verlag Berlin- Heidelberg- New York: 1966
- 53 SILVESTRO, F.B.: Object detection enhancement
Photogram. Eng., 35(1969)6, S. 556
- 54 SÖLLNER, R.: Beiträge zur Theorie der Farbmischung von Multispektralbildern in
Farbmischprojektoren
Vermess.-Technik, 25(1977)9, S. 301-303
- 55 SÖLLNER, R.: Verbesserung der visuellen Interpretierbarkeit von Luftbildern durch
Grauwertspreizung und Histogrammegalisierung
Vermess.-Technik, 26(1978)8, S. 260-265
- 56 STILLER, H.: Spektrale Untersuchungen der Erde und ihrer Atmosphäre aus dem Kosmos
Spektrum, 8(1977)8, S. 11-14

- 57 STOCKHAM, T.G.: Image processing in the context of a visual model
Proceedings of the IEEE, 60(1972)7, S. 828-842
- 58 STRÜBER, H.J.: Untersuchungen zur Farbentheorie
Dissertation, Univ. Tübingen, Tübingen 1966
- 59 TAYLOR, M.M.: Principal components colour display of ERTS imagery
Second Canadian Symposium on Remots Sens. Ottawa: 1974, S. 295
- 60 TRINDER, J.C.: Entropy of Aerial Photography
Photogram. Engin. & Remote Sens., 36(1970)11, S. 1172-1178
- 61 TZSCHOPPE, W.: Der Multispektralprojektor MSP 4 - ein Farbsynthesegerät zur Auswertung von Multispektralaufnahmen
Jenaer Rdsch., 21(1977)6, S. 266
- 62 WEIBRECHT, D.: Gegenwärtiger Stand und Entwicklungstendenzen der Fernerkundung Vermess.-Technik, 22(1974)11, S. 401-405 u. 22(1974)12, S. 452-454
- 63 WOLFF, G.: Perspektiven für Forschung und Praxis der Luftbildinterpretation für neue Anwendungsgebiete in der DDR unter besonderer Berücksichtigung des Umweltschutzes
Beitr. Forstwirt., 7(1973)4, S. 178-180
- 64 WYSZECKI, G. and STILES, W.S.: Colour Science
New York 1967
- 65 ZICKLER, A.: SOJUS 22 und die Multispektralkamera MKF 6 des VEB Carl-Zeiss Jena
Jenaer Rdsch., 21(1977)6, S. 263
- 66 Бармиц Л.В. и др.: Алгоритмы улучшения качества изображения
Тр. н.-и. центра изучения природных ресурсов, вып. 2, Москва 1976 г.,
стр. 107-113
- 67 Белчанкий Г.И., Соломатин М.Е.: Некоторые вопросы автоматизации дешифрирования космических снимков с использованием ЭВМ
Геодезия и картография, Москва 51(1976) 4, стр. 35-39
- 68 Бенилов Ю.Н.: Многоспектральные аэрокосмические методы исследования ресурсов Земли
Природа (1977) 10, стр. 10-23
- 69 Береговой Г.Т., Киенко Ю.П.: Изучение природных ресурсов Земли дистанционным зондированием
Геодезия и картография, Москва 52(1977) 4, стр. 1-9

- 70 Борисенко В.И., Быков А.В., Чесалин Л.С.: Некоторые виды предварительной обработки видеоинформации, Космическое исследование земных ресурсов, Москва 1976, стр. 225-245
- 71 Данюлис Е.П., Осипенко Г.С., Целетухин Ф.М.: Опыт оценки информативности многозональных аэроснимков
Геодезия и картография, Москва 51 (1976) 7, стр. 36-41
- 72 Домковская Т.: Вопросы дистанционных измерений из космоса и методов их обработки
Тр. н.-и. изучения природных ресурсов, вып. 6, Москва 1977
- 73 Керша В.О.: Обработка изображений с помощью электронных аналоговых устройств
Известия ВУЗ-ов, (1976) 6, стр. 53-56
- 74 Киенко Ю.П. и др.: Автоматическая обработка изображений дискретным способом на базе ЭЦВМ
Геодезия и аэрофотосъемка, Москва (1975) I, стр. 51-55
- 75 Коллектив авторов: Аэрокосмические исследования Земли - обработка видеоинформации на ЭВМ
Москва: Издательство "Наука", 1978
- 76 Красиков В.А., Хатунсева М.В., Штарьков Ю.М.: Метод главных компонент в задачах обработки многозональных данных. Аэрокосмическое исследование Земли - обработка видеоинформации на ЭВМ
Москва: Издательство "Наука", 1978, стр. 143-150
- 77 Кравцова В.И., Кничников Ю.Ф.: Исследование природных ресурсов Земли с помощью космических снимков
Вестник Московского университета, серия География, Москва 29 (1974) I, стр. 24-30
- 78 Лурье И.К., Тищенко А.П.: Цифровые методы обработки космической видеоинформации в тематическом картографировании
Вестник Московского университета, серия География, Москва (1976); стр. 25-30
- 79 Скатерщиков С.В.: Опыт применения космической информации для целей охраны природы и рационального использования природных ресурсов
Геодезия и картография, Москва 51 (1976) 4, стр. 39-44
- 80 Фивенский И.И.: К вопросу о синтезе цветного изображения по многозональным снимкам
Москва: Московский университет, 1976, стр. 104-109

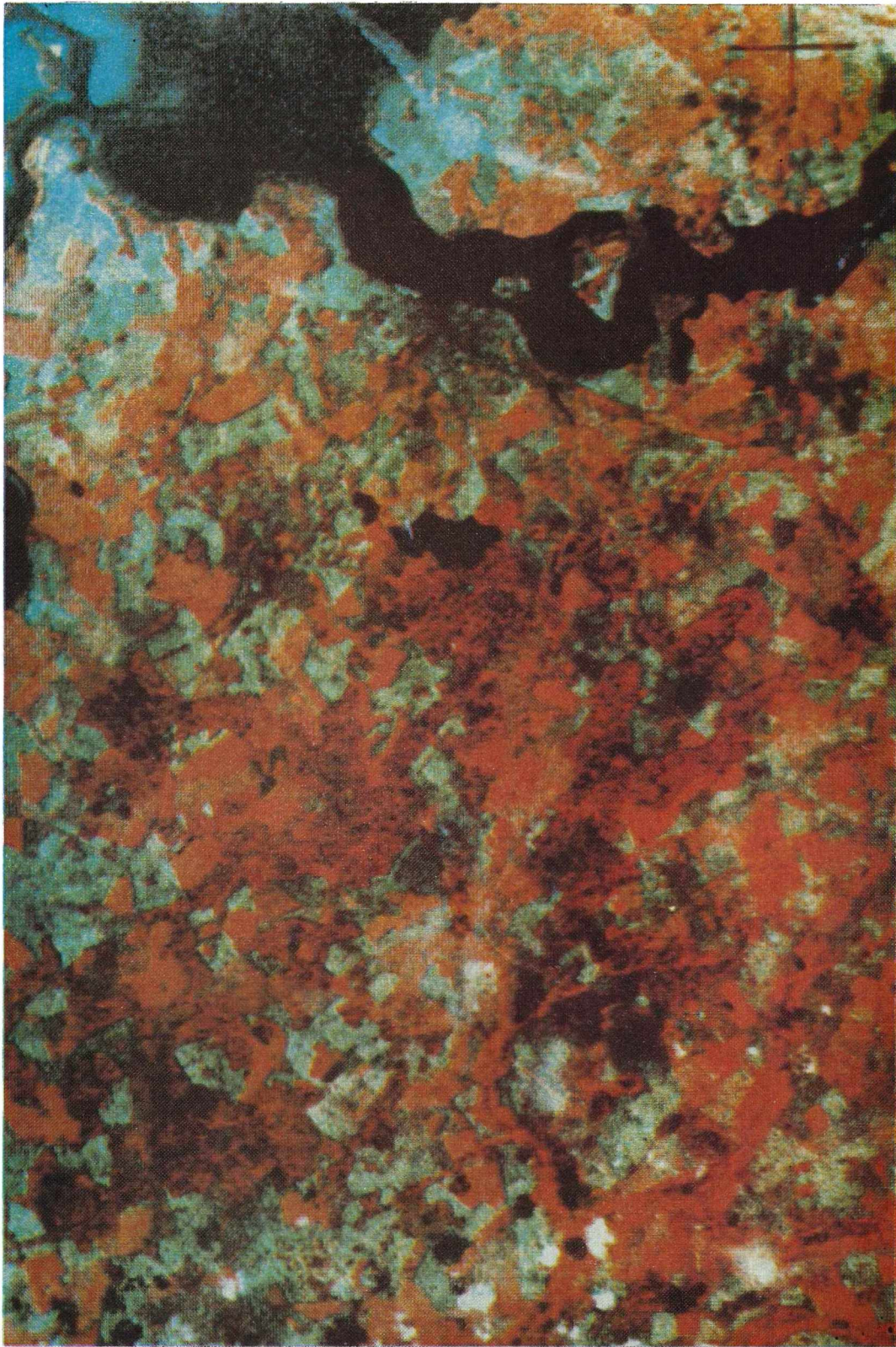
7. Verzeichnis der Beilagen

- Beilage 1: Original-Spektralauszüge des Ausschnittes der Multispektralaufnahme des Nordteils der DDR und die ersten drei Komponenten der durch Hauptachsen-
transformation gewonnenen Bilder.
(LfB-Nr. 105/77)
- Beilage 2: Standardfarbsynthese (Spektralbereiche 540, 660 und 840 nm) des Bild-
beispiels vom Nordteil der DDR (LfB.-Nr. 105/77)
- Beilage 3: Beispiel zur Farbsynthese aus linear transformierten Hauptkomponenten
(LfB.-Nr. 105/77)
- Beilage 4: Echtfarbaufnahme der Nordspitze der Somalihalbinsel
- Beilage 5: Farboptimierte Aufnahme nach Beilage 3
- Beilage 6: Ergebnis der unüberwachten Klassifizierung des Bildbeispiels aus Beilage
1 mit 2 Objektklassen
- Beilage 7: Ergebnis der unüberwachten Klassifizierung des Bildbeispiels aus Beilage
1 mit 3 Objektklassen
- Beilage 8: Ergebnis der unüberwachten Klassifizierung des Bildbeispiels aus Beilage
1 mit 5 Objektklassen
- Beilage 9: Ergebnis der unüberwachten Klassifizierung des Bildbeispiels aus Beilage
1 mit 10 Objektklassen
- Beilage 10: Aus Beilage 6 abgeleitete thematische Karte mit 3 Objektklassen
- Beilage 11: Thematische Karte der Landnutzung des Landkreises Stralsund
- Beilage 12: Kartierung der Waldgebiete des Landkreises Stralsund, abgeleitet aus Bei-
lage 9
- Beilage 13: Konventionelle Standardfarbsynthese eines Ausschnitts der Multispektral-
aufnahme des Gebietes "Süsser See" (LfB.-Nr. 205/76)
- Beilage 14: Beispiel zur thematischen Aufbereitung des Bildbeispiels nach Beilage 12
durch Anwendung des Algorithmus zur Farboptimierung des Histogramms
der Farbwertanteile



Beilage 1: Original-Spektralauszüge des Ausschnittes der Multispektralaufnahme des Nordteils der DDR und die ersten drei Komponenten der durch Hauptachsentransformation gewonnenen Bilder.

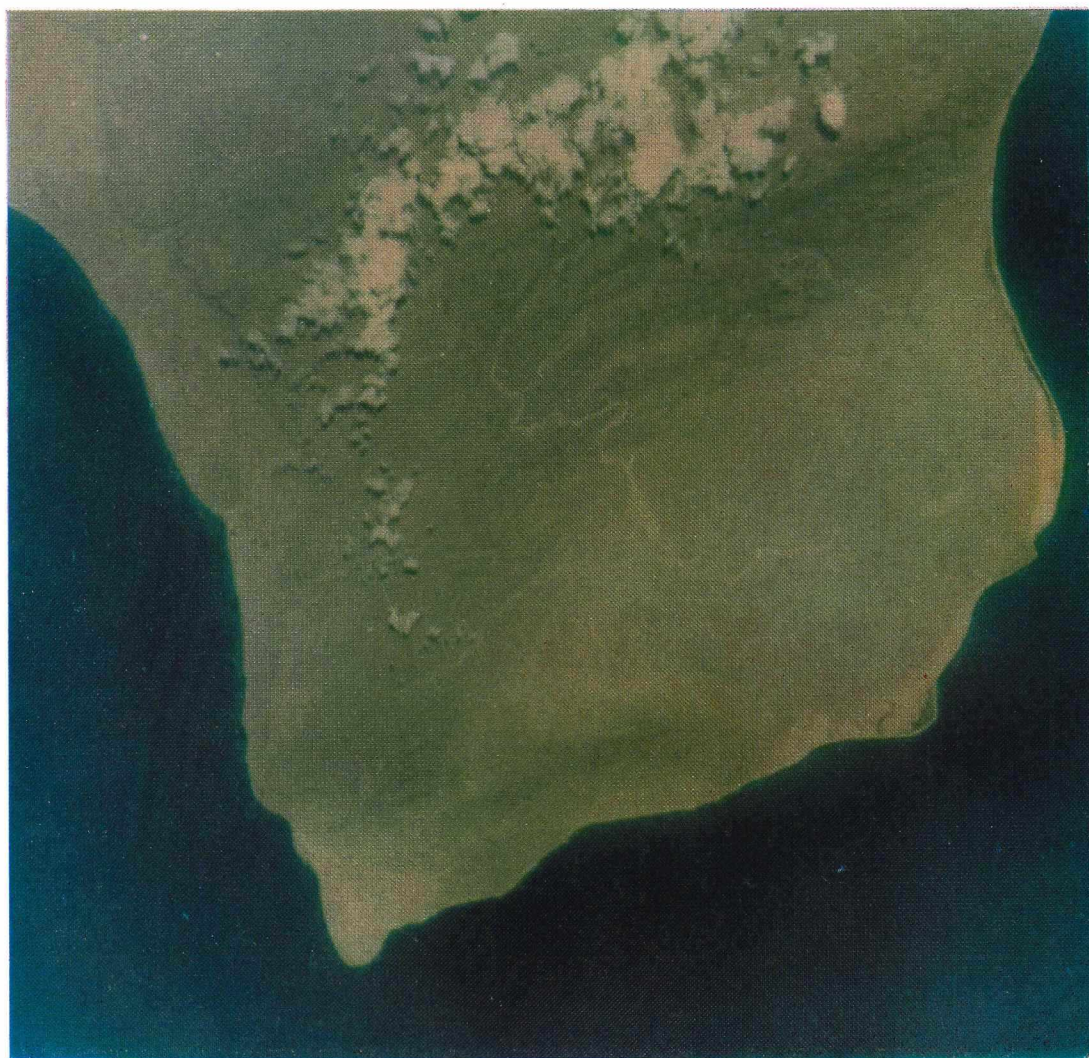
(LFB-Nr. 105/77)
DOI: <http://doi.org/10.2312/ZIPE.1982.068>

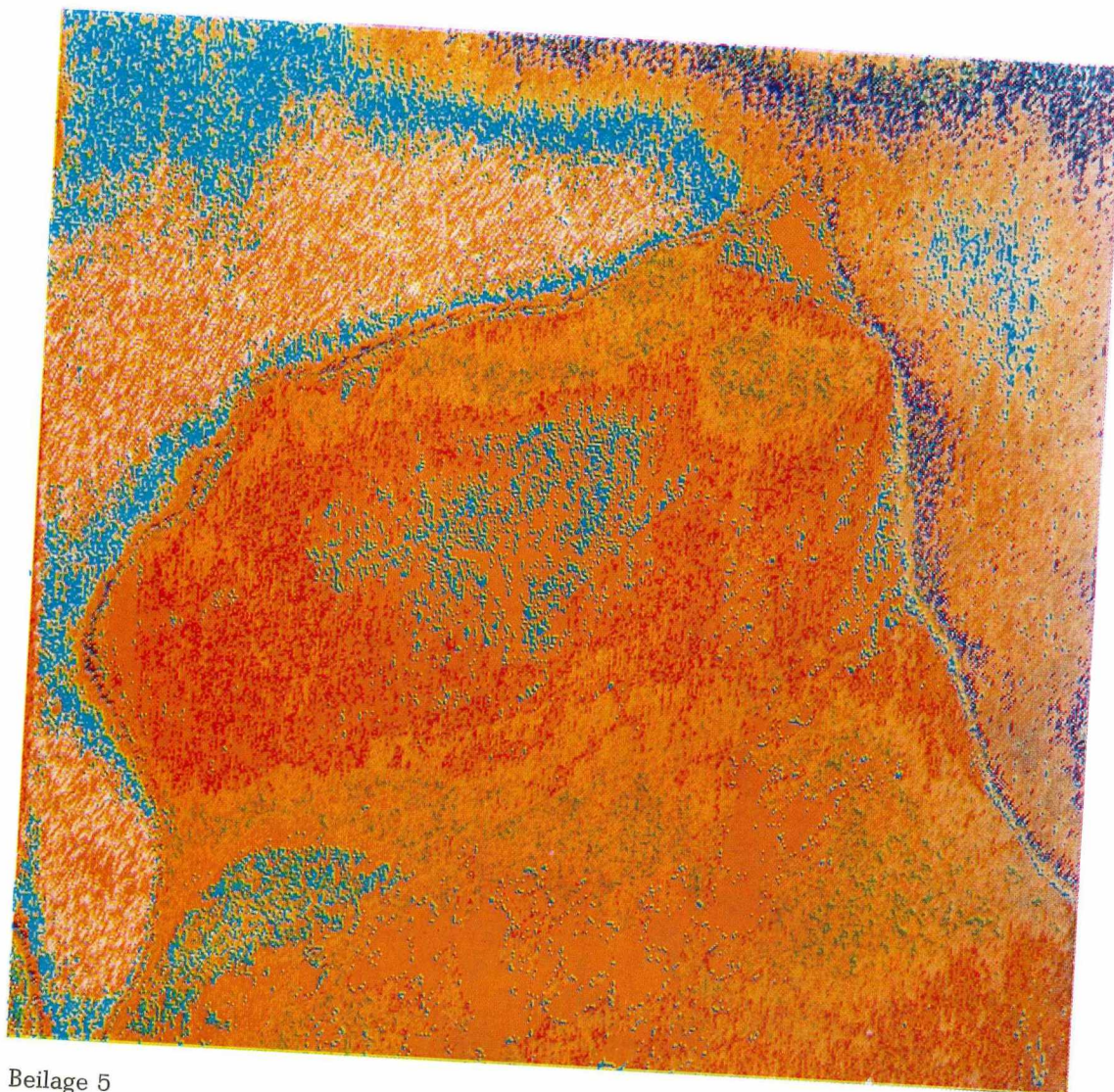


Beilage 2

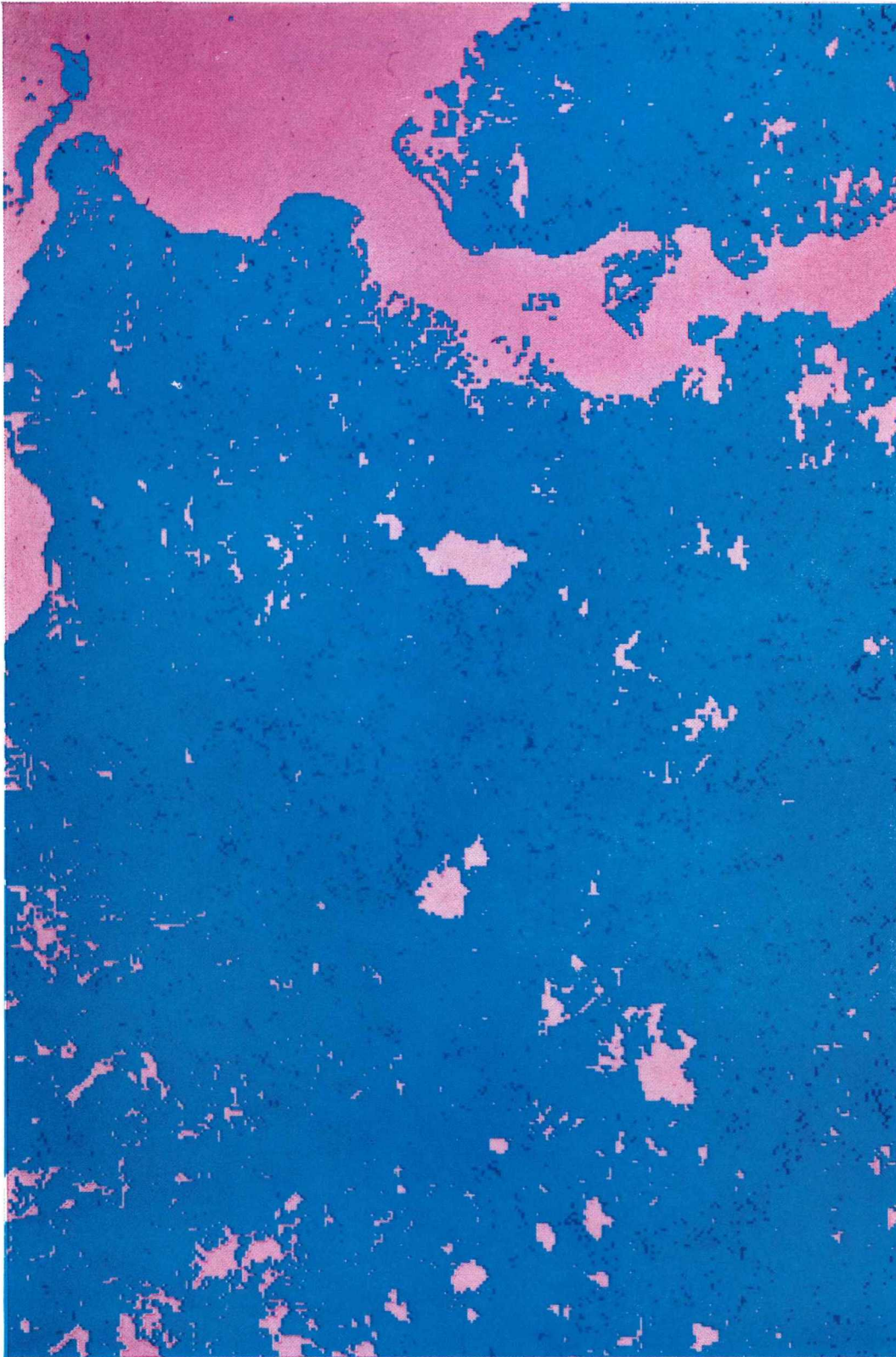


Beilage 3

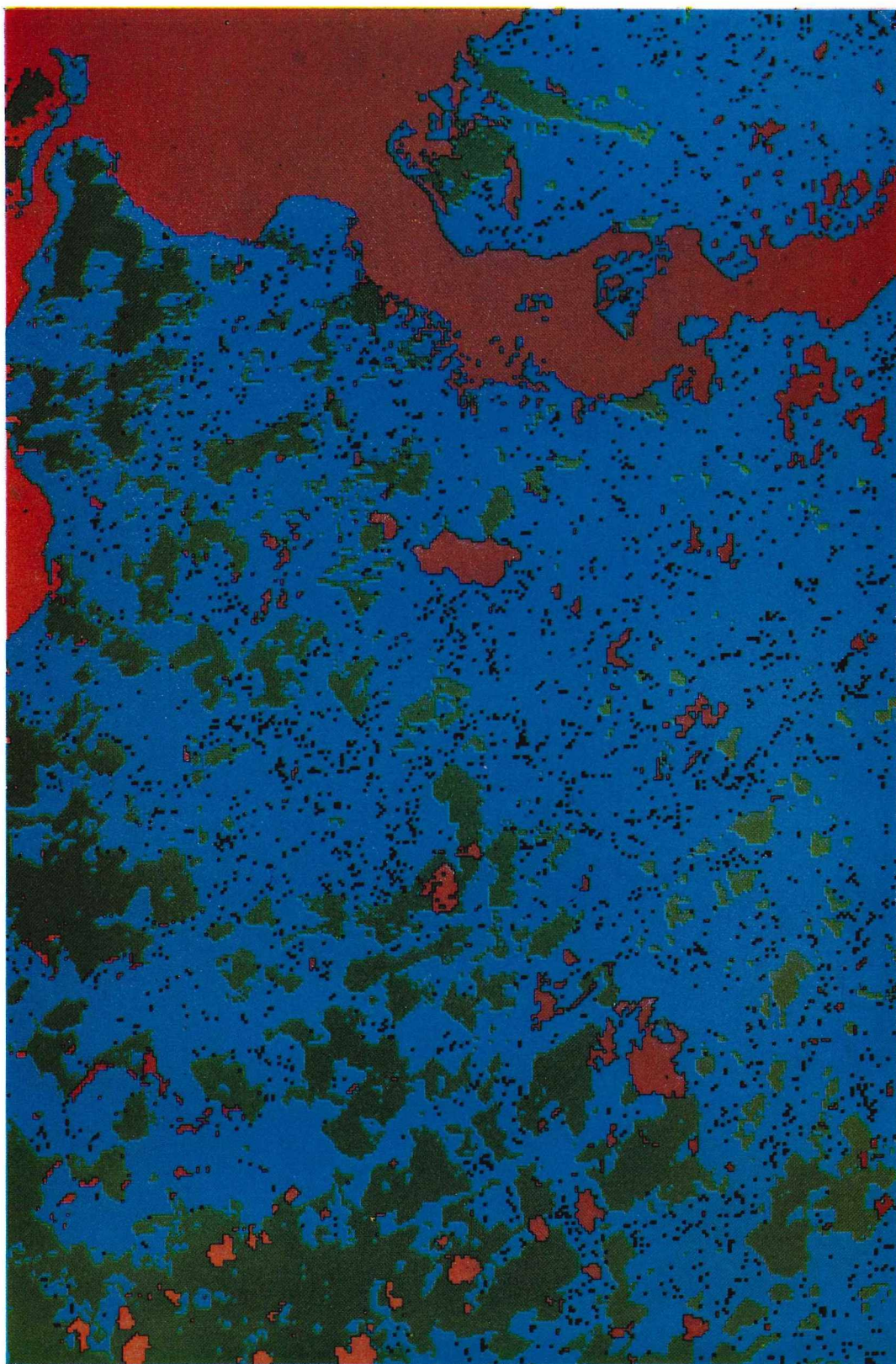




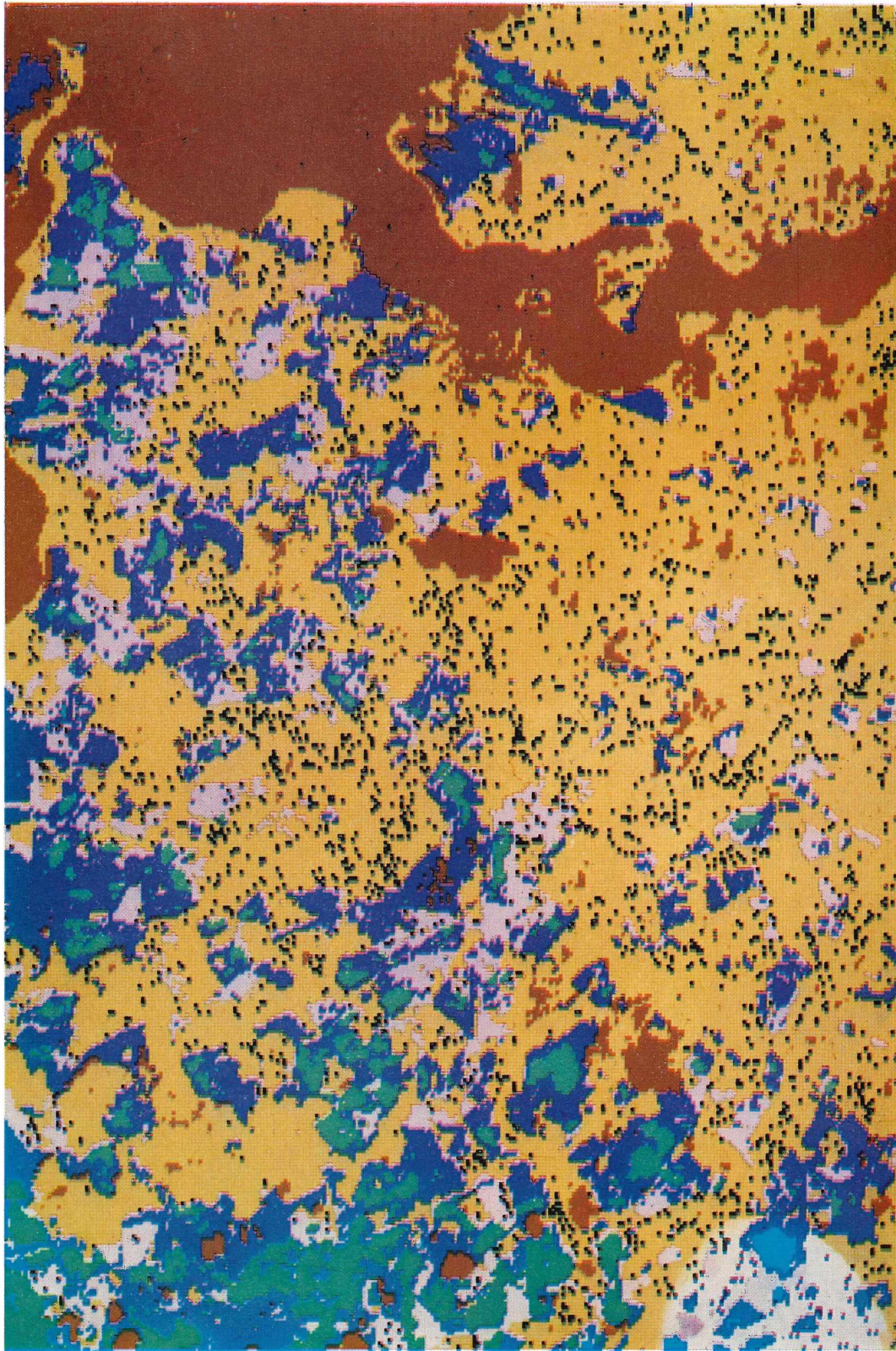
Beilage 5



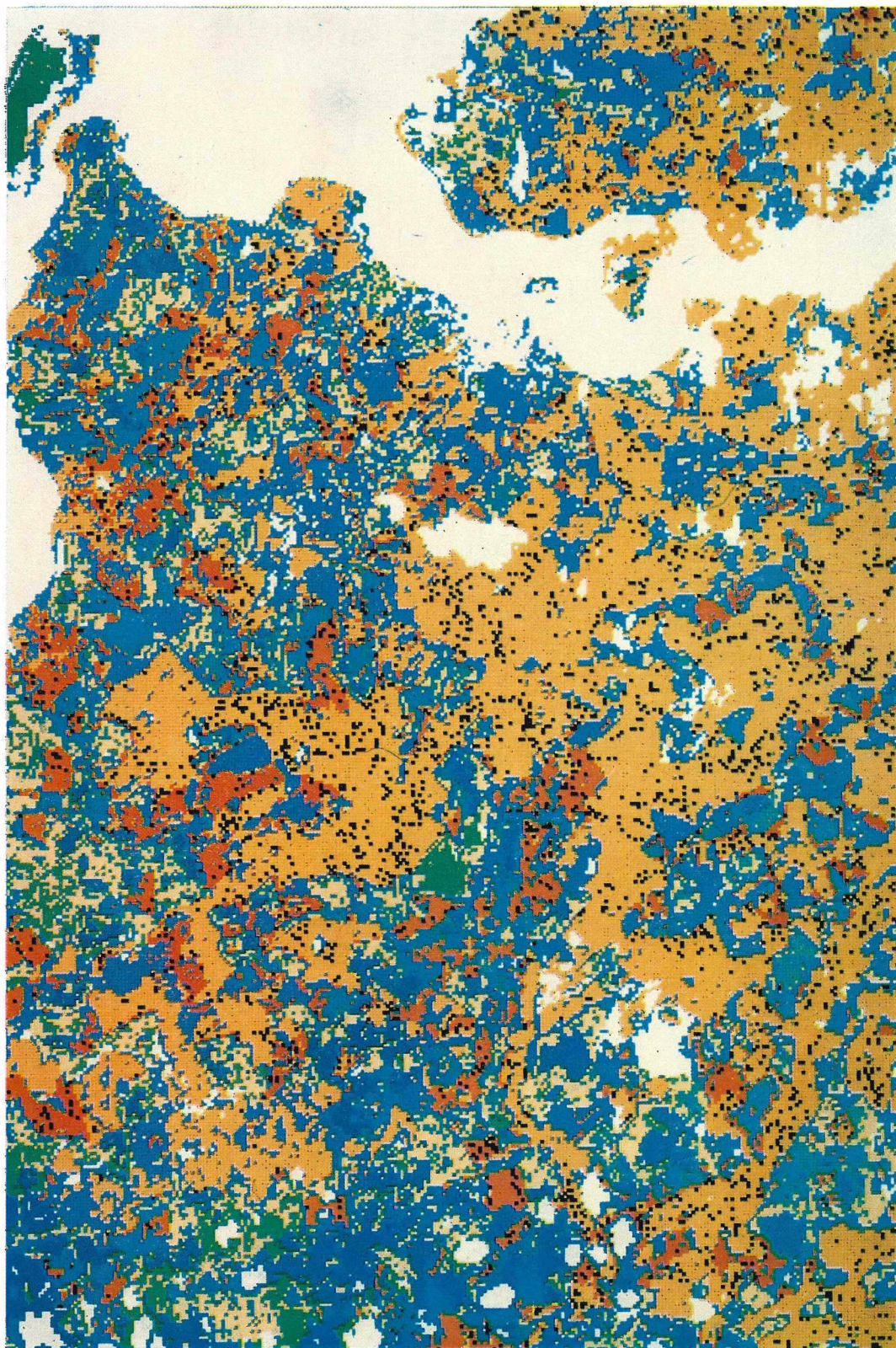
Beilage 6



Beilage 7






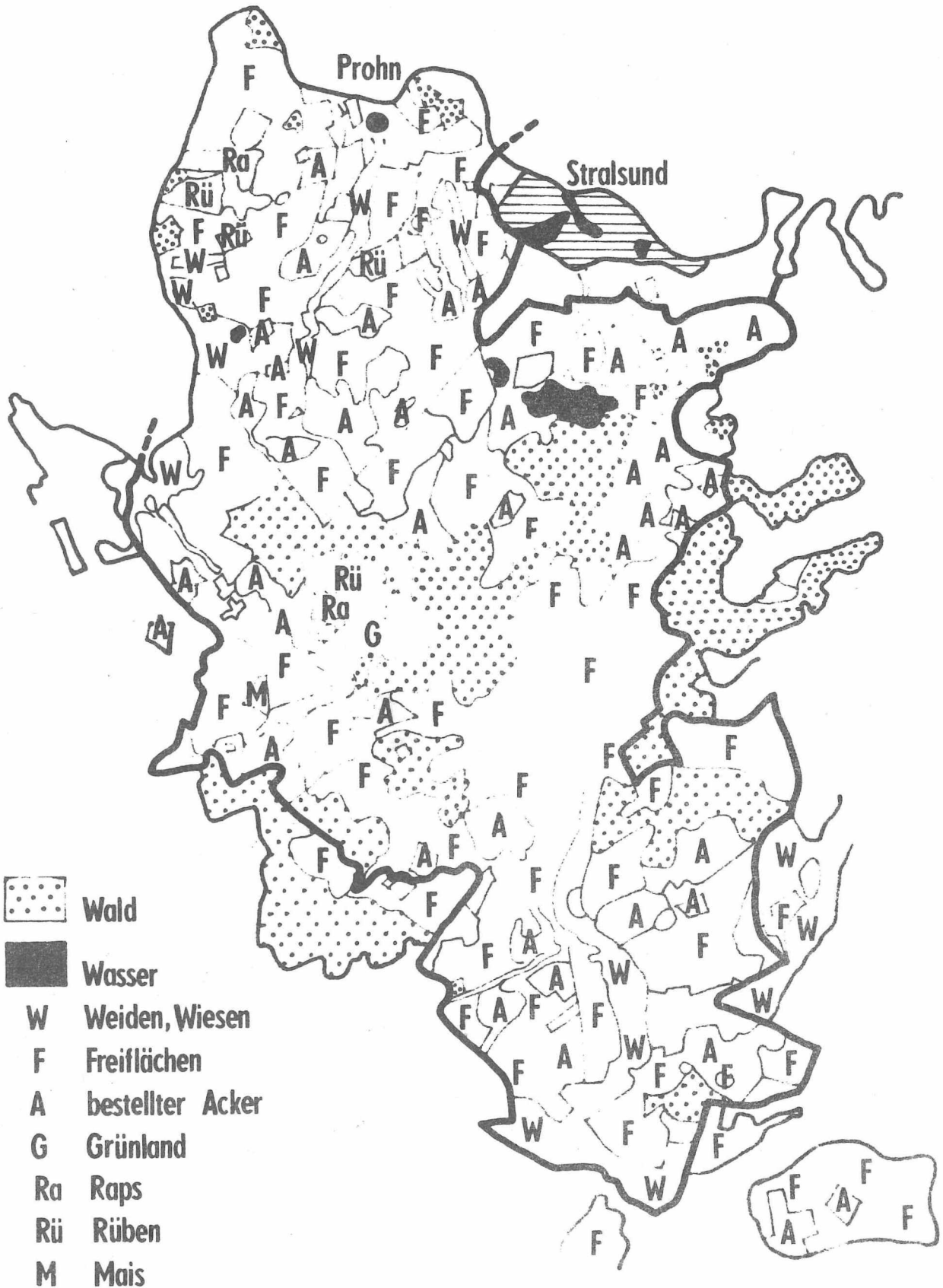
Beilage 8

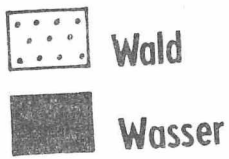
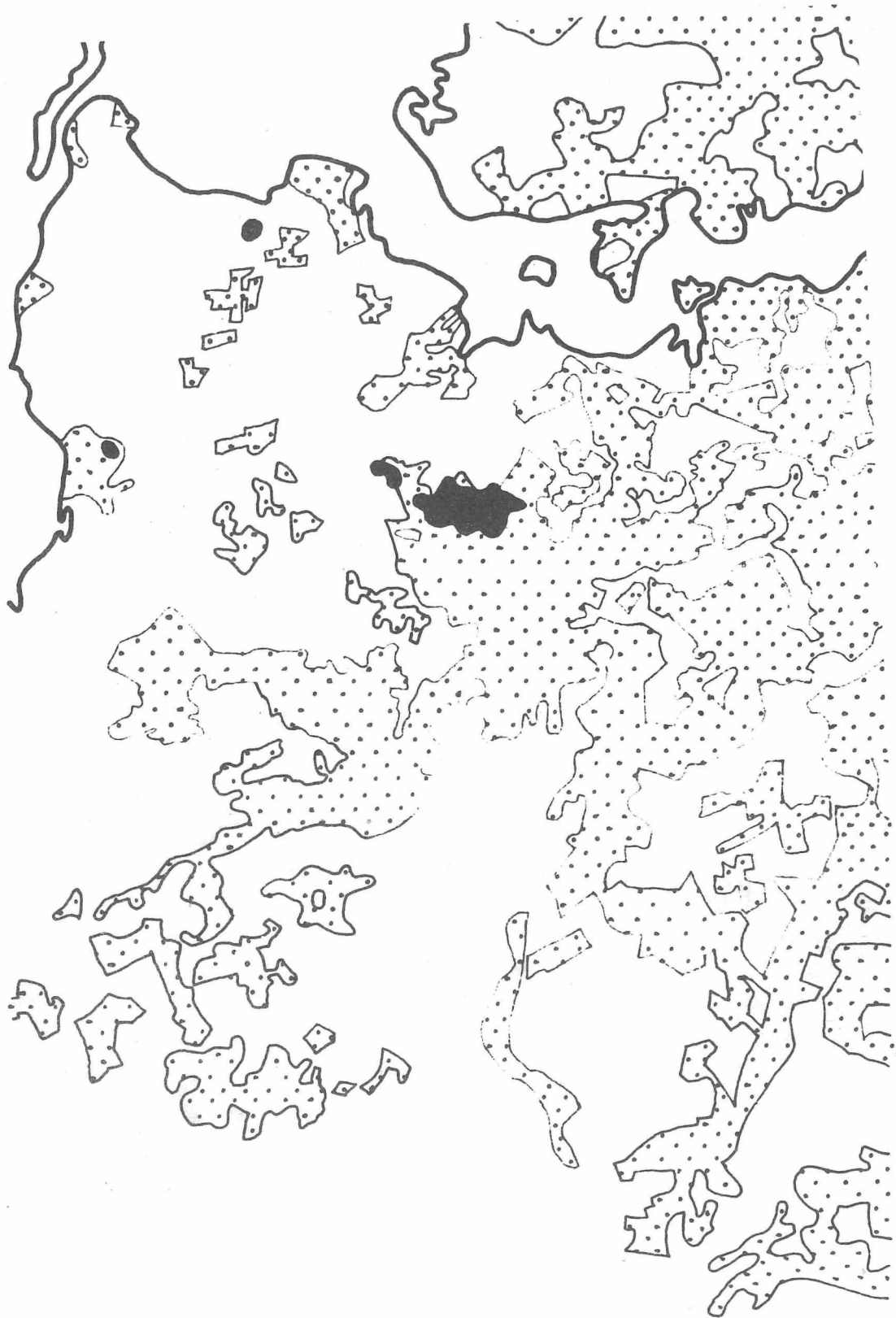


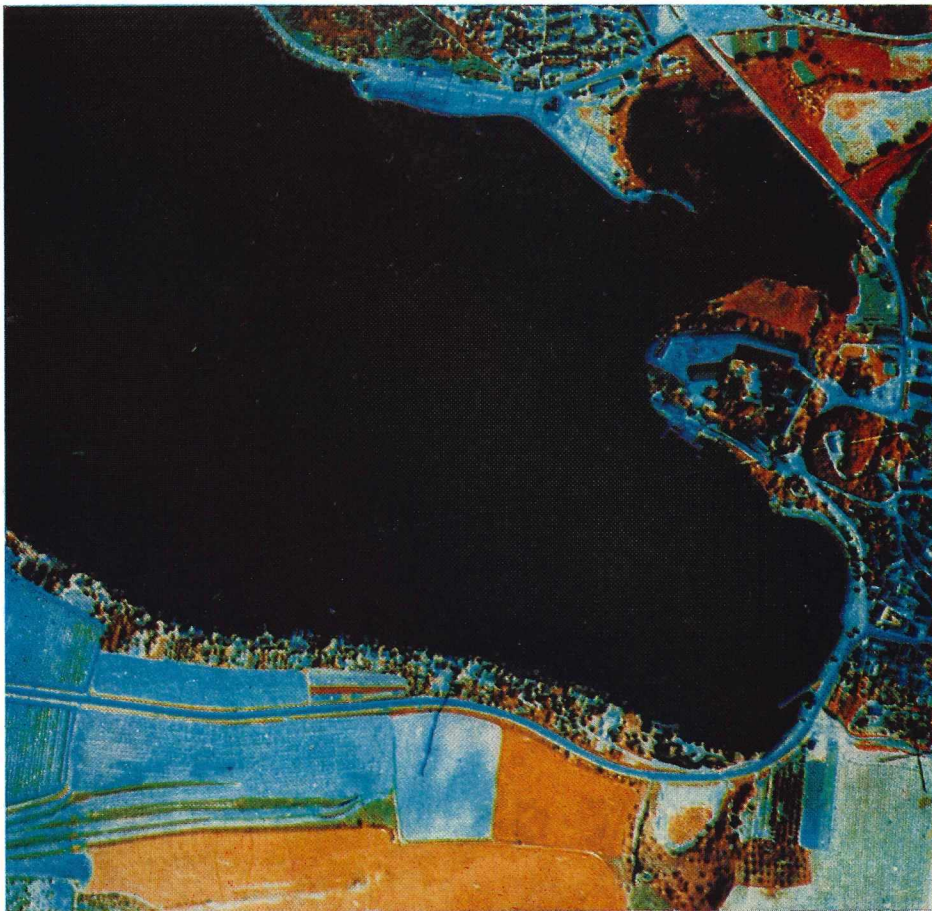
Beilage 9



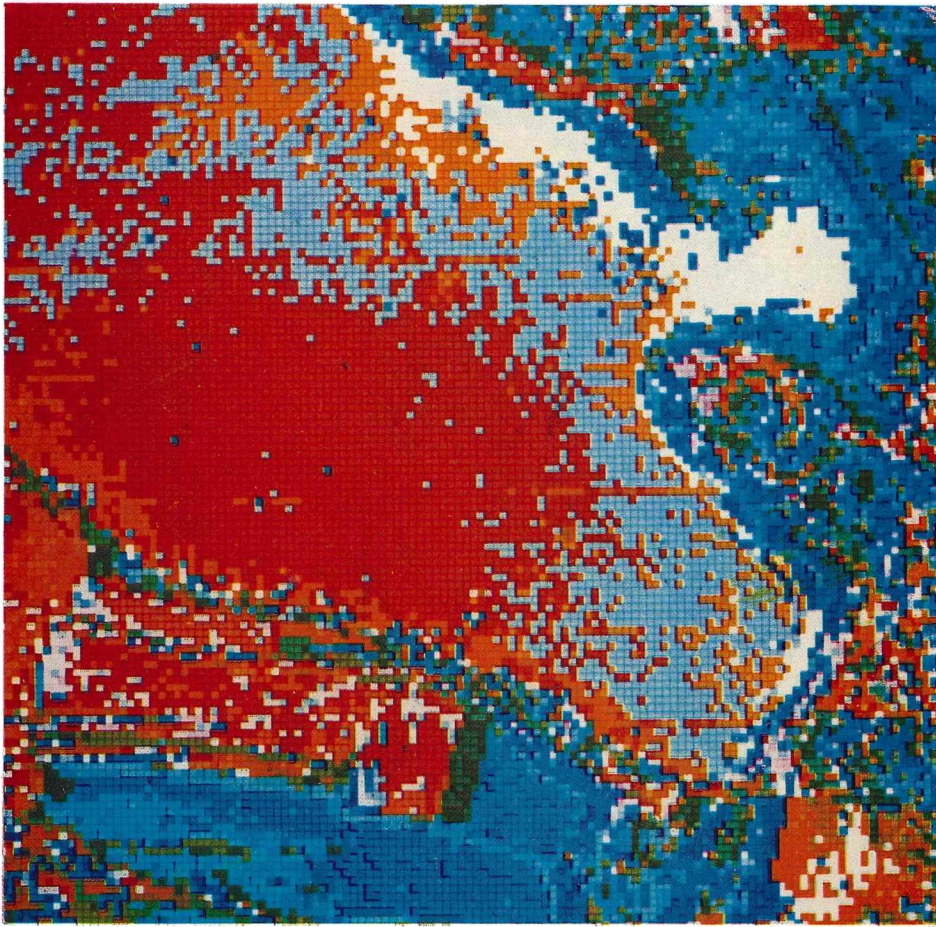
-  **Vegetation**
-  **vegetationsloser Boden**
-  **Wasser**







Beilage 13



Beilage 14