

KOMMISSION I, Arbeitsgruppe 1/5
O.Hofmann, M.Hofmann, D.Meißner
MESSERSCHMITT BÖLKOW BLOHM GMBH
Ottobrunn/München

EIN MODULARES, OPTO-ELEKTRONISCHES, MULTISPEKTRALES SATELLITENBILD-
AUFNAHME-SYSTEM (MOMS) VON MBB

ZUSAMMENFASSUNG:

MBB (Messerschmitt Bolkow Blohm GmbH) stellt für Zwecke der Fernerkundung ein neues Aufnahmegerät für den Einsatz auf Raum-Plattformen (SPAS, Space Lab, Satelliten) vor. Das Aufnahmeprinzip beruht auf der Abtastung mit hochauflösenden Zeilen-Fotosensoren (Push broom-Prinzip, CCD-Technologie). Durch Kombination mehrerer gleichartiger Module erfolgt die Abtastung in mehreren Pixel-deckenden Spektralkanälen zwischen 0,45 µm und 1,0 µm. Durch Anwendung des Doppel-Objektiv-Prinzips kann eine beliebige Gesamt-Zeilenslänge erreicht werden (hier 6912 Bildpunkte). Das Bildsignal wird bezüglich der unterschiedlichen Dunkelwerte und Empfindlichkeiten der einzelnen Detektoren sowie des Lichtabfalls der Objektive in Echtzeit korrigiert. Die Speicherung der digitalisierten und korrigierten Daten erfolgt auf sog. High Density Digital Tape (HDDT).

1. ENTWICKLUNGSABLAUF, ZIELSETZUNG

Messerschmitt Bolkow Blohm GmbH (MBB) entwickelte in den letzten Jahren für Versuchszwecke eine opto-elektronische Abtast-Kamera für Luftaufnahmen mit der Bezeichnung EOS, die nach dem sog. "Push-Broom-Prinzip" mit CCD-Sensoren arbeitet. Die ersten mit Unterstützung der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) durchgeführten Befliegungen verliefen erfolgreich (s. /5/). Im Auftrag der DFVLR und gefördert vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) werden diese Arbeiten bei MBB weitergeführt, und MBB entwickelte ein modulares, opto-elektronisches, multispektrales Satellitenaufnahmesystem (MOMS), das im wesentlichen aus folgenden Komponenten besteht: Abtast-Kamera, Elektronik-Modul, Magnetbandaufzeichnungsgerät. Die Kamera wird 1980 zunächst im Flugzeug erprobt. Der erste Einsatz einer raumfahrttauglichen Ausführung ist auf einer SPAS-Plattform (Shuttle Pallet Satellite), die von einem Space Shuttle getragen wird, für 1982 vorgesehen.

Die Aufnahmen erfolgen in mehreren Spektralkanälen des sichtbaren und nahen IR-Bereiches zwischen 0,45 µm und 1,05 µm.

Das Anwendungsgebiet des MOMS-Systems ist die Fernerkundung aus Flugzeugen und Satelliten.

2. ARBEITSPRINZIP UND GERÄTEAUFBAU

Über das Arbeitsprinzip eines Zeilenabtasters mit CCD-Sensoren und die Eigenschaften des Verfahrens gibt es heute ein umfangreiches Schrifttum (s.Pos.6). Daher sei in diesem Rahmen an Hand von Abb. 1 das Aufnahmever-

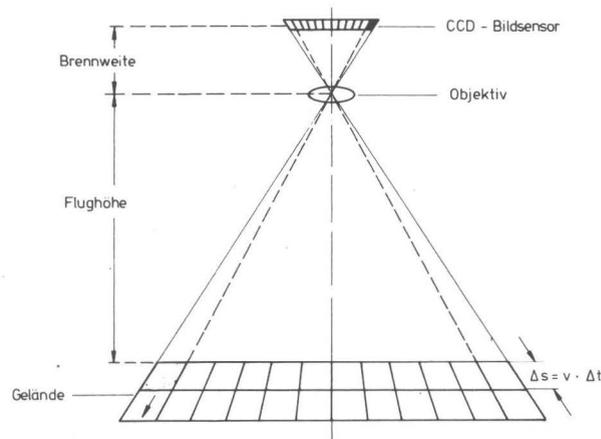


Abb.1: Aufnahmeprinzip der opto-elektronischen Zeilenabtastung

fahren nur kurz erläutert. Die Geländeoberfläche wird auf eine Sensorzeile, die in der Bildebene eines ständig geöffneten Objektivs quer zur Flugrichtung angeordnet ist, abgebildet und in regelmäßigen Intervallen abgetastet. Die Sensorzeile enthält eine Vielzahl linear angeordneter, diskreter Photo-Halbleitersensoren (Pixel). Die Größen der seriell ausgelesenen, analogen und diskreten Bildpunktsignale sind proportional der Strahlungsintensität und der Länge des Belichtungsintervalls. Das Belichtungsintervall ist ebenso lang wie das Zeilenintervall oder kürzer. Die Bildsignale werden digitalisiert, bezüglich ihrer unterschiedlichen Dunkelstromwerte und Kennliniensteigungen korrigiert und auf einem HDDT (High Density Digital Tape) gespeichert.

Für den Anwender ergeben sich folgende markante Vorteile gegenüber anderen Aufnahmeverfahren:

- Die Messung der Strahlungsintensität und der geometrischen Lage der Bildpunkte innerhalb der Bildzeile erfolgt digital unmittelbar bei der Aufnahme.
- Die sofortige quantitative Erfassung der Strahlungswerte, ihre Kalibrierungsfähigkeit und ihre hohe Auflösung erleichtern die Auswertung im Vergleich zu Fotoaufnahmen ganz erheblich.
- Die digitalen Meßdaten werden direkt an Bord oder nach telemetrischer Übertragung an die Bodenstation auf HDDT gespeichert und stehen nach einer Umsetzung auf computer-compatible Bänder (CCT) unmittelbar für die Rechenerauswertung zur Verfügung. In der Zukunft erscheint für gewisse Prozesse auch eine Echtzeitauswertung möglich.
- Die praktisch strenge Zentralperspektive innerhalb einer jeden Bildzeile vereinfacht die geometrische Auswertung im Vergleich zu mechanisch-optischen Abtastern.

Das MOMS-Konzept zeichnet sich dadurch aus, daß das sehr einfache Grundprinzip auch in der Ausführung beibehalten wird. Dabei sind zusätzliche Forderungen zu erfüllen.

Die für eine Zeile gewünschte Anzahl von Bildpunkten übersteigt die Pixelzahl eines einzelnen Sensor-Chips. Es müssen daher mehrere Sensoren so aneinander gereiht werden, daß eine lückenlose und überdeckungsfreie Zeile des Geländes abgetastet werden kann. Diese Forderung wird mit einer Doppelobjektiv-Kombination erfüllt (s. Abb. 2). Da sich die Sensoren nicht ohne Lücke physisch aneinander reihen lassen, sind in einem Spektralmodul zwei

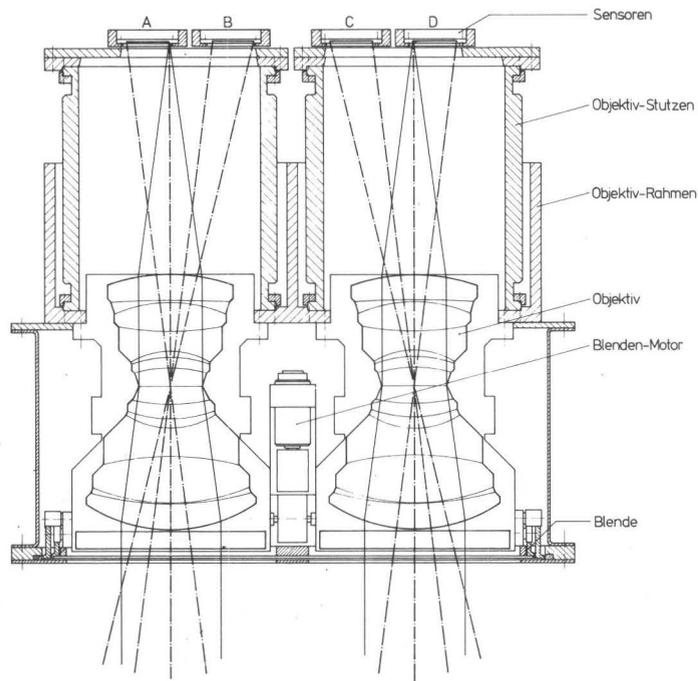


Abb.2: Doppelobjektiv-Spektralmodul der MOMS-Kamera (Querschnitt)

Objektive mit gleicher Brennweite und parallel ausgerichteten optischen Achsen angeordnet. In ihre Bildebenen sind die Sensoren jeweils so eingesetzt und justiert, daß der Abstand in Zeilenrichtung zwischen den effektiven Sensorzeilen ebenso groß ist wie die Länge der effektiven Sensorzeile selbst. Die Sensoren A und B des einen Objektivs überdecken genau die Zwischenräume der Sensoren C und D des anderen Objektivs und umgekehrt, so daß der gesamte Bildwinkel lückenlos mit Sensorelementen besetzt ist. Die Aufnahmen in den verschiedenen Spektralfarben erfolgt derart, daß jeder Bereich von einem eigenen Doppelobjektiv-Modul erfaßt wird, wobei den Objektivpaaren die entsprechenden Spektralfilter vorgesetzt und die optischen Achsen parallel ausgerichtet sind. Die Justierung der Sensoren bezieht sich auf einen praktisch unendlich entfernten Gegenstand, so daß die Abstände zwischen den Objektiven und ihre Anordnung zueinander keine Rolle spielen, es kommt nur auf die genaue Richtungsorientierung an. Infolgedessen decken sich die gleichen Bildpunkte der verschiedenen Spektralmodule am Boden, eine notwendige Voraussetzung für die spektrale Auswertung. Diese Lösung gewährt folgende Vorteile:

- a) Durch Wechsel der Farbfilter und durch Kombination von mechanisch-optisch und elektronisch vollkommen gleichartigen Spektralmodulen wird große Flexibilität erreicht.
- b) Die Module haben einen sehr einfachen Aufbau (s. Abb. 2).
- c) Im Strahlengang sind keine Strahlenteiler angeordnet, daher tritt kein Lichtverlust auf. Die optimale Lichtausbeute für jeden Kanal ermöglicht hohe geometrische Auflösung, schmale spektrale Bandbreite, geringstmögliche Objektiv-Öffnung und relativ niedrigen Optikaufwand. Es kann daher mit relativ einfachen Objektiven gearbeitet werden.
- d) Die Optik ist unempfindlich gegenüber Polarisationserscheinungen, da keine Reflexionsflächen vorhanden sind.

Die von der Firma Rodenstock, München, entwickelten achtgliedrigen Objektive erfüllen sämtliche gestellten Anforderungen.

Vor die Objektive kann mit Hilfe eines Motor-Antriebs eine lichtdichte Blende geschoben werden. Sie dient zum Schutz gegen Beschädigung und zur Messung der Dunkelsignale bei der Sensorkalibrierung. Den modularen Aufbau der Elektronik zeigt Abb. 3, die nur einer kurzen Erläuterung bedarf.

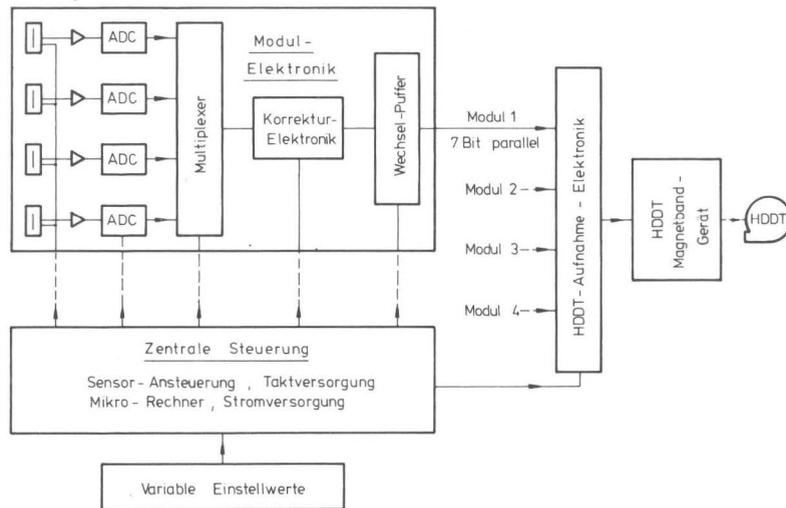


Abb.3: Elektronik-Baugruppen der MOMS-Systeme

Die zentrale Steuerung versorgt bis zu 4 Module. Die Bilddaten eines Moduls werden jeweils 7-Bit-parallel zur HDDT-Aufnahmeelektronik übertragen. Einige Eingangsparameter, die Zeilenfrequenz, die Belichtungszeit, der Zeilenanfangspunkt und die Bildsignalverstärkung lassen sich manuell oder über Bordcomputer entweder als konstante Werte oder als Variable eingeben. Geschieht dies in Abhängigkeit von externen Sensoren und Meßwerten (Belichtung, Flughöhe H , Geschwindigkeit v , Neigungswinkel), so wird damit die radiometrische und geometrische Bildqualität verbessert. Rollbewegungen können durch Verschieben des Zeilenanfangspunktes, Nickbewegungen und Änderungen des v/H -Verhältnisses durch Zeilenfrequenzänderungen kompensiert werden.

Die digitalen Bilddaten einer Zeile (Grauton-Auflösung 7-Bit \cong 128 Stufen) werden mit einem Synchronwort am Zeilenanfang und Zusatzdaten (lfd. Zeilen-Nr., Uhrzeit, eingestellte Parameter, ggf. Fluglage- und Positionsdaten, Überwachungsdaten) im Pufferspeicher jeweils zu einem Block zusammengefaßt und auf das Magnetband übertragen, jede Bitstelle wahlweise auf eine oder abwechselnd auf zwei Spuren. Das Magnetbandgerät vom Typ M 14 L der Firma Bell & Howell erlaubt die Aufzeichnung von maximal 28 Spuren mit 3,3 MBit/s je Spur. Für MOMS beträgt der Datenstrom 2,86 MBit/s pro Bitstelle. Es lassen sich die Daten von 4 Modulen à 7 Bit auf ein Bandgerät speichern. Bei höchster Laufgeschwindigkeit von 120 IPS (Inch Per Second) beträgt die Aufzeichnungszeit etwa 15 min. Nimmt man nur die Daten von zwei Modulen auf, also von $2 \times 7 = 14$ Bitstellen, und verteilt jede Bitstelle auf zwei Spuren, so kann mit halber Geschwindigkeit, also 60 IPS und doppelter Aufnahmezeit gearbeitet werden. Der Datenstrom ist proportional der Bildpunktzahl/Zeile (im vorliegenden Fall $4 \times 1728 = 6912$ Pixel), der Zeilenfrequenz (etwa 380Hz) und der Grautonauflösung (7 Bit).

Für die gewählte Auslegung ergibt sich ein Datenstrom von etwa 20 MBit/s je Modul.

3. AUSWAHL DER GERÄTEPARAMETER

Die Parameter der MOMS-Kamera sind für den Einsatz im Space Shuttle ausgelegt. Bei einer Bahnhöhe von 296,5 km soll die Auflösung (Bodenpixelgröße) 20 m sein. Damit liegt die maximale Belichtungszeit fest, da die Geschwindigkeit des Flugkörpers vorgegeben ist. Der Schwerpunktabstand der Sensorpixel und die Flughöhe wiederum bestimmen die Brennweite. Aus der Sensorempfindlichkeit, dem Öffnungsverhältnis, der Transmission der Optik incl. Filter ergibt sich eine Mindeststrahlungsleistung für die Vollaussteuerung des Sensors bzw. für eine bestimmte Graustufenauflösung. Die Bandbreite der Spektralfilter muß nun so gewählt werden, daß bei der auftretenden spektralen Strahlungsleistung diese Mindeststrahlungsleistung erreicht wird. Die gegenwärtig verfügbaren Angaben über die spektrale Strahlungsleistung unterscheiden sich teilweise bis zu 50% /11, 12/. Unter den gegebenen Bedingungen ist für die Optik ein größeres Öffnungsverhältnis als 1:3,5 nicht sinnvoll. Die gemessene Sensorempfindlichkeit liegt je nach Spektralbereich zwischen 1 und 2 V pro μJcm^{-2} . Aus diesen Daten ergibt sich, daß bei einer Graustufenauflösung von 8 Bit bei einer Bandmitenwellenlänge von 600 nm eine Bandbreite von 50 nm realisiert werden kann und bei 900 nm eine Bandbreite von 150 nm. Von diesen 8 Bit werden 7 Bit übertragen, je nach Objekthelligkeit entweder die höherwertigen oder die niederwertigen. Nachfolgend sind die Leistungsparameter zusammengefaßt:

a) Kameramodul (2 Spektralkanäle)

Sensortyp: CCPD 1728 (Fa. Reticon)
Anzahl der Pixel pro Sensor: 1728
Schwerpunktabstand der Pixel: 0,016 mm⁻²
Sättigungsbelichtung: 0,4 ... 0,7 μJcm^{-2}
Dynamikbereich: 1:500 typ
Gesamtanzahl der Pixel pro Zeile (4 Sensoren): 6912
Brennweite: 237,2 mm
Öffnungsverhältnis: 1:3,5
Winkelauflösung eines Bildpunktes: 67,5 μrad
Bildwinkel in Zeilenrichtung: 26,7°
Spektralkanal sichtbar: 575 ... 625 nm
Spektralkanal nahes IR: 825 ... 975 nm
Gewicht: 45 kg
Abmessungen lxbxh in mm: 370x370x400

b) Zentrale Elektronik

Anzahl der anschließbaren Spektralmodule: 1 ... 4
Datenrate pro Spektralmodul: 20 MBit
Kodierung: 7 Bit NRZ-L
Stromversorgung: 28V DC/3A
Gewicht: 20 kg
Abmessungen lxbxh in mm: 445x440x225

c) Datenaufzeichnungsanlage

Bandgerät: M 14 L incl. Aufnahme-Elektronik
Hersteller: Fa. Bell & Howell
Anzahl der Spuren: 28
Maximale Datenrate pro Spur: 3,3 MBit/s
Bandgeschwindigkeit hierfür: 120 IPS (≈ 3 m/s)
Aufnahmedauer: 15 min bei 120 IPS
Stromversorgung: 28 V DC/16A
Gewicht: 84 kg
Abmessungen lxbxh in mm: 410x445x715

4. DATENAUFBEREITUNG

Für die Aufbereitung der Bilddaten von MOMS und für Folgeprojekte entwickelt MBB ein spezielles Vorverarbeitungssystem, da ein solches sonst nirgends zur Verfügung steht. Die wesentlichen Aufgaben dieses Prozesses sind:

- Umsetzung der HDDT-Daten auf Computer Compatible Magnetbänder (CCT)
- Sichtung und Grobaufzeichnung der Bilddaten mit Hilfe eines Quick-Look-Grauwertschreibers.
- Prüfung der Bilddaten, Erstellung statistischer Werte, Formatieren, Einfügen von Zusatzinformationen für die Bildwiedergabe.

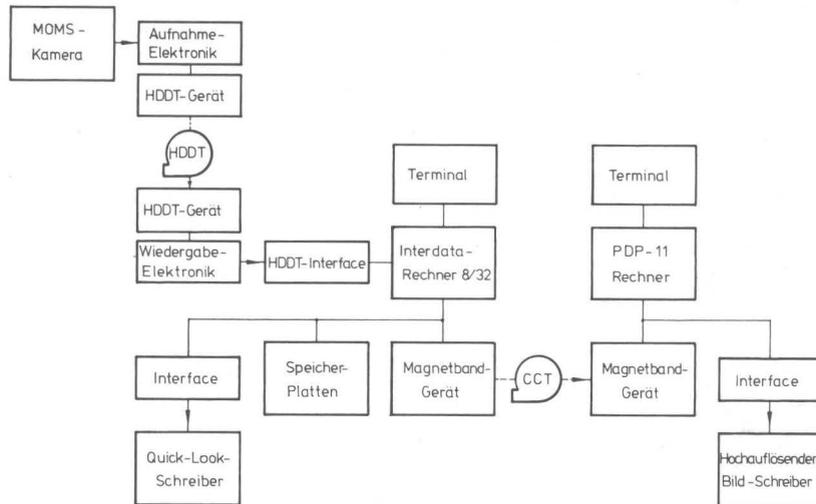


Abb.4: Bilddaten-Aufbereitungs-System

Die Abb. 4 zeigt im Blockbild den Aufbau des Systems. Für die Datenaufzeichnung und Umsetzung wird das gleiche HDDT-Gerät, an Bord mit einer Aufnahme-, am Boden mit der Wiedergabe-Elektronik, benützt. Die Abspielgeschwindigkeit ist jedoch 32- bzw. 16 mal langsamer. Daraus ergibt sich eine maximale Datenrate von ca. 0,36 MBit/s, die immer noch zu groß ist, um sie direkt auf Computer-Magnetband umsetzen zu können. Die Daten müssen daher zunächst auf Magnetplatten zwischengespeichert werden. Mit diesem Prozeß wird gleichzeitig der Bildinhalt auf einem relativ grob auflösenden Bildschreiber (Quick-Look) registriert, um das Ergebnis des Bildfluges rasch überblicken und die Auswahl für die Weiterverarbeitung vornehmen zu können. Ein HDDT faßt immerhin etwa 10^{10} MByte, das entspricht 30-40 Speicherplatten à 300 Byte und ca. 250 Computer-Bändern.

Als Quick-Look-Schreiber wird ein Laser-Recorder VISOR-M der Fa. SORO benützt. Von der Speicherplatte werden die Daten sodann abschnittsweise einer Vorverarbeitung gemäß Pos. c unterzogen und schließlich auf Computerband abgelegt. Sie sind dann transportabel und können auf dem Interdatarechner selbst oder einer anderen Rechenanlage weiterverarbeitet werden, u.a. ist auch die graphische Wiedergabe auf einem hochauflösenden Bildschreiber möglich.

5. BISHERIGE ERGEBNISSE UND AUSBLICK

Mit der oben erwähnten EOS-Versuchskamera wurden inzwischen weitere Erprobungsflüge durchgeführt und u.a. auch provisorische Stereobildstreifen aufgenommen. Der Einbau der EOS-Kamera in das Flugzeug erfolgte derart, daß die Bildzeilenebene um ca. 15° gegen die Vertikale geneigt war. Das Gelände wurde zweimal in entgegengesetzten Richtungen überflogen und aufgenommen. Abb.5 zeigt Ausschnitte der Stereo-Streifen. Mit einem einfachen Linsenstereoskop läßt sich das Bildpaar räumlich betrachten.

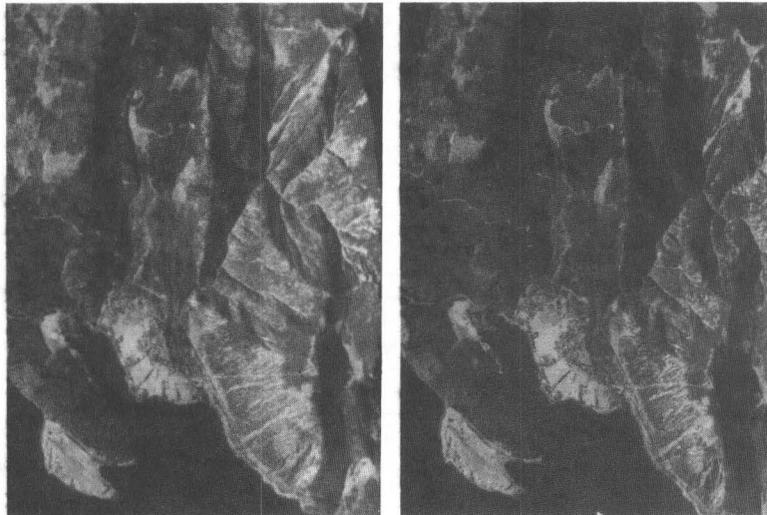


Abb.5: Stereo-Aufnahme mit der opto-elektronischen Zeilenabtast-Kamera EOS

Die neue MOMS-Kamera wird eine etwa 8.fach bessere Auflösung aufweisen als die erste EOS-Versuchskamera. Damit wird die Fernerkundung und die digitale Bildverarbeitung über ein neues, sehr leistungsfähiges Arbeitsmittel verfügen. Es ist zu erwarten, daß dieser junge Zweig der Photogrammetrie und Kartographie an Bedeutung gewinnt. Die Hauptprobleme sind in der Bewältigung der großen Datenmengen und in der geometrischen Entzerrung der Zeilenaufnahmen zu sehen. Die Fortschritte in der Computer- und Speichertechnik, vor allem der Einsatz leistungsfähiger Multiprozessoren (Arrayprozessoren), werden die Lösungen der anstehenden Aufgaben erleichtern.

6. SCHRIFTTUM

- /1/ Barbe, D.F.: Imaging Devices Using the Charge Coupled Concept. Proc. IEEE, Vol. 63, Jan. 1975, p. 38-67.
- /2/ Colvocoresses, A.P.: Proposed Parameters for Mapsat. Photogr. Eng., Vol. XLV, No.4, April 1979, p. 501-506.
- /3/ Hofmann, O.: Geometrisches Auflösungsvermögen und Modulationsübertragung von Photosensoren. Bildmess. u. Luftbildw. 5/1975, S. 174-181.
- /4/ Hofmann, O.: Mikroprozessoren im kartographischen und photogrammetrischen Instrumentenbau. Bildmess. u. Luftbildw. 46/1978, S. 87-98.
- /5/ Hofmann, O., Seige, P.: Erste Erprobungsergebnisse mit der experimentellen optoelektronischen Kamera von MBB. Bildmess. u. Luftbildw. 46 (1979), S. 33-40.

- /6/ Jobson, D.J.: On-Board Compensation for Temporal Changes in Pushbroom Scanner Detector Arrays. NASA Langlay Research Center, Hampton, Va./Nov. 1978.
- /7/ Mouro, C.R.: Performance of charge-coupled device (CCD) imaging sensors. Naval Air Development Center, SPIE Vol. 175 Airborne Reconnaissance IV (1979)/81-85.
- /8/ Rienecker, W.: CTD Technologien und Anwendungen. Elektronik 1979, H.12, S. 39-74, H.13, S. 74-81.
- /9/ Seguin, C.H., Tompsett, M.F.: Charge Transfer Devices. Advances in Electronics and Electron Physics, Suppl.8, Acad. Press. New York 1976.
- /10/ Advanced Scanners and Imaging Systems for Earth Observation. NASA SP-335, Report of Working group meeting at COCOA Beach, Florida, Dez. 1972.
- /11/ NASA HQ ER 78 - 367 (1), Rev. 2-22-78.
- /12/ Landsat-D System, GSFC - 430 - D - 100, April 26, 1977.