

DIGITALE AUFNAHMETECHNIK

O. Hofmann, München

1. Einleitung

In den fünfziger Jahren veröffentlichten Rosenberg und Williams, USA, in Photogrammetric Engineering [7], [8], Vorschläge für ein opto-elektronisches Aufnahme- und Auswerteverfahren. Es besteht im Prinzip aus drei optisch-mechanischen Abtastern, die das Gelände in drei Abschnitten bzw. Richtungen mit Photozellen abtasten und auf Magnetband speichern (Abb. 1). Außerdem werden laufend die Daten der äußeren Orientierung gemessen und registriert. Die automatische Auswertung (Abb. 2) liefert den Orthophotoplan.

Dieser Vorschlag vor etwa 25 Jahren mutete damals etwas phantastisch und utopisch an, und es stellte sich die Frage, welchen Sinn und Vorteil ein derartiges Verfahren wohl haben könnte. Inzwischen ist die Entwicklung der Photogrammetrie in Richtung EDV und Elektronik weit fortgeschritten, besonders auf dem Gebiet der Auswertung sind die analytischen Plotter im Vormarsch. Aber grundsätzlich hat sich an den photogrammetrischen Verfahren nichts geändert, die Bildaufnahme geschieht in der Regel weiterhin analog mit photographischen Kameras, das Basismaterial ist nahezu ausnahmslos das zentralperspektive Meßbild. Lediglich in der Fernerkundung werden opto-elektronische Abtaster benützt, wobei vor allem die Objekt-Strahlung und als Ergebnis der Auswertung die Gelände-Oberflächen-Klassifikation interessieren.

Anläßlich der Photogrammetrischen Woche 1971 trug der Verfasser über eine derartige Neuentwicklung für Satellitenbildaufnahmen vor, ein Gerät, das damals noch mit Vidicons arbeitete. Inzwischen hat es durch die Entwicklung hochauflösender linearer und rasterförmiger Photo-Halbleiter-Sensoren beträchtliche Fortschritte bei der Entwicklung digitaler Kameras gegeben. Es soll nachfolgend darüber berichtet werden, wobei sich der Verfasser vorwiegend auf die im eigenen Arbeitsbereich gemachten Erkenntnisse und Erfahrungen stützt. Derartige digitale Kameras werden zunächst in erster Linie für Zwecke der Fernerkundung entwickelt und eingesetzt, d.h. für Spektralklassifikationen.

Im Hintergrund steht aber die besonders für die Photogrammetrie interessante Frage, ob die digitale Kamera in Zukunft auch in diesem Bereich eine gewisse Rolle spielen wird. Diese Frage ist eng verknüpft mit der geometrischen Auflösung und Genauigkeit einer derartigen Kamera und der geometrischen Auswertbarkeit ihrer Bilddaten.

2. Warum digitale Aufnahmetechnik?

Die photographische Luftaufnahme hat heute eine so hohe technische Vollkommenheit erreicht, daß gefragt wird, warum man sich überhaupt mit einer neuen Aufnahmetechnologie befaßt und nach neuen Möglichkeiten sucht. Wie so oft, sind es Entwicklungen in anderen Bereichen, die neue Impulse erzeugen. Die Raumfahrt, die Militärtechnik und vor allem die stürmische Computer-Entwicklung lassen neue Ziele, Forderungen und Wünsche entstehen.

Das photographische Luftbild hat hervorragende Eigenschaften: Es enthält auf geringstem Raum eine ungewöhnlich große Informationsdichte. Darüberhinaus besitzt es den entscheidenden Vorteil, daß die Bildinformationen dem menschlichen Beobachter anschaulich und unmittelbar zugänglich sind und der Erzeugungsprozeß für das Bild außer der Kamera keiner weiteren aufwendigen Hilfsmittel bedarf. Die Herstellungsprozedur eines photographischen Bildes ist relativ einfach und billig, die entsprechenden Auswertemethoden und Geräte sind weit verbreitet und haben einen hohen technischen Stand. Warum also eine neue Aufnahmetechnologie?

Es sind im wesentlichen folgende Gründe und Ursachen, die uns veranlassen, danach zu suchen:

- a) Photographische Bilder sind nicht unmittelbar der Computer-Verarbeitung und automatischen Auswertung zugänglich.

- b) Photographische Bilder lassen sich nicht unmittelbar fern-übertragen und die Missionszeit ist durch die stets begrenzte Menge von Filmmaterial erheblich eingeschränkt.
- c) Die photographische Schicht ist nur in einem relativ schmalen Spektralbereich einsetzbar, und im Bereich der Fernerkundung (Remote Sensing) ist man in erster Linie an den Strahlungseigenschaften des Objektes in einem breiteren Spektrum interessiert.
- d) Die photographische Schicht ist kein geeignetes Mittel zur quantitativen Strahlungsmessung.

Die opto-elektronische und in Echtzeit digitalisierte Aufnahme überwindet diese Schwierigkeiten, aber man handelt sich damit einige neue Probleme ein.

3. Technologien der opto-elektronischen Digitalaufnahme

Es ist nicht Ziel dieses Vortrages, in aller Breite systematisch über die opto-elektronischen Aufnahmeprinzipien zu referieren, das ist an anderen Stellen schon wiederholt und ausführlich geschehen (z.B. [4]), und wir wollen uns statt dessen mit derjenigen Technologie befassen, die nach Einschätzung des Verfassers sowohl für die Satellitenbild- als auch für die Luftaufnahme im zivilen und militärischen Bereich neben der klassischen Photographie die größten Erfolgsaussichten hat: Das ist die nach dem sogenannten "Push-Broom-Prinzip" arbeitende Zeilen-Abtastung mit hoch-auflösenden Photo-Halbleiter-Zeilen-Sensoren.

Diese Einschätzung soll begründet werden:

Die meisten bisher im Gebrauch befindlichen Abtaster, im Englischen als "Scanner" bezeichneten Geräte, beruhen auf dem in Abb. 3 dargestellten optisch-mechanischen Prinzip. Ein Drehspiegel oder Prisma tastet quer zur Flugrichtung zeilenweise die Erdoberfläche ab und leitet das Strahlenbündel über eine Optik einem opto-elektronischen Sensor zu. Die Strahlung wird unmittelbar in ein elektrisches Signal gewandelt und in der Regel analog oder digital, zumeist auf Magnetband, gespeichert. Durch Filter und die Wahl des Sensors hat man es in der Hand, den gewünschten Spektralbereich zu erfassen. Derartige Abtaster wurden und werden daher mit Vorliebe dort eingesetzt, wo photographische Aufnahmen versagen, nämlich im mittleren und thermalen Infrarotbereich. Mit Hilfe von Strahlenteilern, verschiedenen Filtern und Sensoren kann man in mehreren Spektralbereichen abtasten und verfügt damit über einen sogenannten "Multispektral-Scanner", wie er beispielsweise in den LANDSAT-Missionen zur Anwendung kommt.

Typisch für dieses Konstruktions-Prinzip ist die Abtastung des Bildstreifens mit einem einzigen Sensor, wobei die Erfassung der Fläche in einer Richtung durch die Vorwärtsbewegung des Trägers (Flugzeug oder Raumflugkörper) und quer zur Flugrichtung durch die mechanische Abtastbewegung des Spiegels erfolgt. Damit wird gleichzeitig deutlich, daß die Flächenspeicherung der Photographie ersetzt wird durch eine lineare, elektronische Abtastung und Speicherung, die die Möglichkeit der Fernübertragung und EDV-Verarbeitung bietet.

Nachteilig an diesem Prinzip ist, daß die einfache, zentralperspektive Bildgeometrie verloren geht. Die in der Photogrammetrie üblichen Auswertemethoden sind daher, soweit es die Geometrie betrifft, nicht mehr anwendbar.

Darüberhinaus weist dieses Verfahren weitere Nachteile auf, die geometrische Auflösung ist zumeist gering und infolge der hohen Signalfrequenz (Bandbreite) beeinträchtigt das Rauschen die Signalqualität.

3.1. Digitale Aufnahmetechnik mit CCD-Zeilensensoren

3.1.1. Aufnahmeprinzip

Gegenüber dieser Aufnahmetechnologie setzt sich nun in neuerer Zeit mehr und mehr das sogenannte "Push-Broom"-Prinzip durch, die Abtastung eines Geländestreifens mit einer quer zur Flugrichtung angeordneten, eine große Zahl von Einzelsensorelementen enthaltenden Sensorzeile (Abb. 4). Dieses Arbeitsprinzip ist äußerst einfach, die Aufnahmekamera besteht im wesentlichen nur aus dem Objektiv und der in der Bildebene liegenden Sensorzeile. Die gesamte Bildzeile wird daher gleichzeitig erfaßt.

Durch periodische Belichtung und Auslesung des Sensors reiht sich lückenlos Zeile an Zeile, und auf diese Weise entsteht der Bildstreifen. Ein Objektivverschluß ist nicht vorhanden. Die Kamera enthält keinerlei bewegliche mechanische Teile, ein sehr großer konstruktiver Vorteil, besonders für den Einsatz im Weltraum. Die Zuverlässigkeit wird damit beträchtlich erhöht.

Bezüglich der Aufnahme-Geometrie ist zu beachten, daß in der durch die Sensorzeile und das Objektiv gebildeten Ebene eine Zentralperspektive besteht, die für eine geometrische Auswertung von besonderer Bedeutung ist, wie sich herausstellen wird. In Flugrichtung ist allerdings keine Zentralperspektive vorhanden, und hier folgt Zeile auf Zeile gemäß der Flugbewegung und der Zeilenfrequenz des Sensors (siehe Abb. 5).

Wichtig dabei ist, daß sich diese Zeilen im Gegensatz zum optisch-mechanischen Abtaster lückenlos und überdeckungsfrei aneinanderreihen. Dies ist begründet durch den elektronischen Auslesemechanismus des Sensors (Abb. 6). Die Zeilenperioden sind durch Impulsflanken bestimmt und schließen daher lückenlos aneinander an, sämtliche Sensorelemente einer Zeile werden in einer Zeilenperiode belichtet und in der darauffolgenden Periode über ein analoges, nach dem sogenannten "Charge Coupled Device"-Prinzip (CCD) arbeitendes Schieberegister seriell ausgelesen. Die Bildpunktregistrierung erfolgt auch hier linear-seriell, wobei in der Regel eine Digitalisierung und Speicherung auf sog. "High Density Digital Tape" (HDDT) stattfindet.

Wir haben es bei dieser Kamera mit einer Digitalisierung im doppelten Sinn zu tun:

- a) Die Strahlungsintensität jedes einzelnen Bildpunktes wird digital gespeichert, zumeist mit 6 bis 8 Bit (64 bis 256 Graustufen).
- b) Die geometrische Lage jedes Bildpunktes ist unmittelbar digital bestimmt, nämlich durch seine Bildpunkt-Nummer innerhalb der Sensorzeile und die laufende Zeilen-Nummer. Eine Messung des Bildes in einem besonderen Auswertegerät, wie wir es in der Photogrammetrie normalerweise benötigen, ist nicht erforderlich. Dieser Vorteil ist von besonderem Gewicht für die geometrische und radiometrische Auswertung.

3.1.2. Spektralbereich

Der Spektralbereich derartiger auf dem Markt erhältlicher Sensoren ist relativ breit (Abb. 7), er reicht von etwa $0.4 \mu\text{m}$ bis $1.0 \mu\text{m}$ und ist durch die Siliziumdioden bestimmt. Die Ausdehnung dieses Sensorprinzips auf den mittleren und thermalen Infrarotbereich ist dringend erwünscht. Die entsprechenden Technologien sind aber sehr viel schwieriger und kostspieliger. In einigen Jahren wird man aber auch in diesen Spektralbereichen über derartige Sensoren verfügen können.

3.1.3. Geometrische Genauigkeit

Von besonderem Interesse für die Photogrammetrie und die Fernerkundung ist die geometrische und radiometrische Genauigkeit und Auflösung derartiger Sensoren.

Gegenüber allen anderen Sensoren, wie zum Beispiel Bildaufnahmeröhren (Vidicons) oder auch photographischen Filmen, haben diese Silizium-Halbleiter-Fotosensoren den großen Vorteil geometrischer Genauigkeit und Stabilität. Die Sensor-Herstellerfirmen geben eine Genauigkeit von einigen μm an. Man muß diese Toleranzangaben allerdings mit Vorsicht betrachten und gegebenenfalls nachmessen. Wichtig aber ist die hohe, überlegene geometrische Stabilität dieser Sensoren. Wo es daher auf geometrische Genauigkeit ankommt, muß man sie kalibrieren und eventuell Korrekturen bei der Auswertung berücksichtigen. Da es sich hier nur um eine oder wenige Sensorzeilen handelt, sind im Vergleich zu Flächensensoren die Korrekturwerte exakter, vollständiger und einfacher zu bestimmen und zu behandeln.

3.1.4. Geometrisches Auflösungsvermögen

Auch in Fachkreisen wird oft die Meinung vertreten, daß die Auflösung digitaler Sensoren derjenigen von photographischen Luftaufnahmen beträchtlich nachsteht. Dies ist tatsächlich nicht der Fall. Die Abb. 8 zeigt die Kontrastübertragungsfunktionen am Beispiel des Fairchild-Sensors CCD 122/142. Man erkennt, daß diese bei der Nyquistfrequenz von 38 Lp/mm immer noch zwischen 40 % und 50 % beträgt.

Demgegenüber ist die Auflösung von Luftbildern normalerweise nicht besser als 20 - 30 Lp/mm, wobei deren Kontrastübertragung wesentlich geringer ist.

Wir wissen aus der Erfahrung im Umgang mit den CCD-Sensoren, daß sie im Vergleich zu photographischen Bildern in der Regel einen besseren Kontrast bei mindestens ebenso guter oder besserer Auflösung liefern. Die Ursachen sind die digitale Sensorstruktur, die sehr genau (ca. $\pm 0.5\%$) lineare Sensor-Kennlinie und die vergleichsweise hohe radiometrische Auflösung (Dynamikbereich 1:500 bis 1:2000).

Vor Jahren wurde vom Verfasser in einer Veröffentlichung das theoretische Auflösungsvermögen digitaler Sensoren untersucht [3], deren Modulationsübertragungsfunktion die Abb. 9 zeigt. Demzufolge ergibt sich bei der Nyquistfrequenz (zwei Sensor-Elemente auf ein Linienpaar) immer noch eine Modulationsübertragung von ca. 70%! Durch die Bildwanderung in Flugrichtung wird sie auf ca. 40% reduziert (gestrichelte Linie).

Die vom Verfasser selbst angegebene Faustregel: 3 Pixel = 1 Linienpaar liegt daher sehr weit auf der sicheren Seite, und man kann, wie die Erfahrung zeigt, in den meisten Fällen mit der Gleichsetzung von 2 Pixel = 1 Linienpaar rechnen, wobei in jedem Fall zusätzlich der Kontrast berücksichtigt und beurteilt werden muß.

Es sei auch hier erlaubt, zum Vergleich praktische Abtastergebnisse photographischer Luftaufnahmen anderer Institute heranzuziehen. Obereinstimmend lautet das Ergebnis, daß Luftbilder, die mit 30 - 50 μm Pixelgröße abgetastet wurden, keinen erkennbaren Auflösungs- bzw. Interpretationsverlust zeigten. Wenn demgegenüber die digitale Kamera bei der Originalaufnahme mit 13 μm unmittelbar das Gelände abtastet, so kann sicher ein mindestens ebenso gutes oder besseres Ergebnis erwartet werden.

Man muß auch immer wieder darauf hinweisen, daß die Erkennbarkeit und Interpretationsfähigkeit von Luftbildern nicht nur vom Auflösungsvermögen und Kontrast, sondern auch von der Art und Form des Objektes abhängt. So werden z.B. linienförmige Objekte selbst dann noch in digital generierten Bildern erkannt, wenn die Pixelgröße kleiner als die Linien-Stärke ist.

3.1.5. Erzeugung langer Bildzeilen

Dagegen wird nun eingewendet, daß diese Sensorzeilen nicht die Länge der Bildformatseite einer photogrammetrischen Kamera habe, und daß man die Auflösung ins Verhältnis zum Bildformat setzen müsse. Dieses Argument ist richtig, aber wir sind in der Lage, Einzelsensoren mit 1728 oder 2048 Elementen lückenlos zu beliebig langen Zeilen zusammensetzen. So beträgt z.B. die Zeilenlänge der MBB-MOMS-Kamera ca. 10.5 cm (ca. 7000 Bildpunkte $\hat{=}$ 16 μm). In den USA wird die MAPSAT-Kamera mit 18000 Bildpunkten $\hat{=}$ 13 μm projektiert, d.h. einer Zeilenlänge von 234 mm, also dem üblichen Bildformat. Es ist technologisch nicht möglich, derartig lange Zeilen auf einem einzigen Sensorchip herzustellen, aber es gibt verschiedene Möglichkeiten der Zusammensetzung. Man kann dies mit einer Strahlenteiler-Anordnung erreichen (Abb. 10) oder mit Hilfe des sog. "Doppelobjektivprinzips" (Abb. 11). Letzteres hat gegenüber ersterem den Vorteil, daß kein Lichtverlust von wenigstens 50% auftritt, aber den Nachteil des größeren Aufwands und Gewichts.

Bei der schon erwähnten MBB-MOMS-Kamera wurde das Doppelobjektivprinzip gewählt, da wegen der sehr schmalen spektralen Bandbreite von nur 0.05 μm die größtmögliche Lichtausbeute erforderlich ist.

Die amerikanische Firma ITEK entwickelte zusammen mit der kanadischen Firma Bell Northern ein anderes Prinzip zur Gewinnung einer langen Zeile [1]. Es wurden mehrere Einzelsensorchips mit je 2048 Bildpunkten auf einen gemeinsamen Keramik-Träger mit hoher Genauigkeit zu einer gemeinsamen Sensorzeile zusammengefügt. Bemerkenswert ist, daß an den mechanischen Stoßstellen der Einzel-Chips eine Lücke von nur jeweils zwei Bildpunkten entsteht.

Diese von ITEK und Bell Northern entwickelten Sensoren weisen noch ein anderes, wichtiges Merkmal auf, das mit ihrer Empfindlichkeit zusammenhängt. Es muß daher zunächst darauf kurz eingegangen werden.

3.1.6. Radiometrische Empfindlichkeit

Die Lichtempfindlichkeit von CCD-Sensoren ist im Vergleich zu photographischem Film bedeutend besser. In absoluten Zahlen ausgedrückt, liegt die Rauschgrenze bei einer Belichtung von etwa 0.0002 bis 0.0008 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$. Das entspricht einer DIN-Empfindlichkeit von etwa 32 DIN bis 38 DIN. Ein anschauliches Beispiel möge dies verdeutlichen: Mit der MBB-MOMS-Kamera wird bei einem Objektiv-Öffnungsverhältnis von 1:3.5, einer Belichtungszeit von 1/350 sec und einer spektralen Bandbreite von nur 50 nm immer noch ein auswertbares Bildsignal erzeugt. Das in diesem Fall verwendete Spektralfilter läßt nur etwa 1/10 bis 1/15 der zwischen 0.4 μm und 1.0 μm von der Erdoberfläche reflektierten Strahlungsleistung auf den Detektor fallen.

Die hervorstechenden und günstigen opto-elektronischen Eigenschaften der CCD-Sensoren sind

- a) die hohe absolute Empfindlichkeit
- b) die Geradlinigkeit und Genauigkeit (besser als 1 %) der Kennlinie (Ausgangssignal zu Belichtung)
- c) der große Dynamikbereich.

Diese Eigenschaften verleihen dem Sensor eine deutliche Überlegenheit über den photographischen Film besonders dort, wo die spektrale Strahlungsintensität exakt zu messen und auszuwerten ist.

Problematisch dabei ist die unterschiedliche Empfindlichkeit der einzelnen Sensorzellen. Ihr Dunkelstrom und ihre Kennliniensteigung streuen erheblich, oft bis zu 30 %.

Durch Kalibrierungsmessungen, Speicherung der Korrekturwerte und elektronische Echtzeitkorrektur bei der Aufnahme oder Software-Korrektur bei der Auswertung kann man diese Schwierigkeit beheben. Die digitale Speicherung der Bildpunkt-Strahlungswerte erfolgt heute in der Regel mit 6 bis 8 Bit, d.h. mit 64 bis 256 Graustufen bei einer linearen Genauigkeit von etwa ± 0.5 %.

3.1.7. Bildwanderung

Wie bereits erläutert, besteht das Aufnahmeprinzip der digitalen Kamera darin, daß quasi die Sensorzelle über den Boden gezogen wird. In dem Belichtungs-Intervall t legen die Detektorzellen den von der Bewegungsgeschwindigkeit v des Trägers abhängigen Weg

$$\Delta s = v \cdot t \quad (1)$$

zurück und integrieren dabei das Licht derjenigen Bodenfläche, die von der Detektorfläche während des Weges Δs abgedeckt bzw. erfaßt wird. Das auf diese Weise generierte Bildpunktsignal ist repräsentativ für dieses Flächenelement. Der Schwerpunktabstand dieser Flächenelemente ist identisch mit der Boden-Pixel-Auflösung A . In Flugrichtung entspricht dieser Betrag dem oben angegebenen Wert $\Delta s = A_F$. Quer dazu, in Zeilenrichtung, ist die Bodenpixel-Auflösung A_Z von der Flughöhe H , der Kamerabrennweite f und dem Abstand a der Sensor-Pixel-Schwerpunkte abhängig gemäß

$$A_Z = \frac{a \cdot H}{f} \quad (2)$$

Da man die Bodenpixel-Abstände in Flugrichtung und quer dazu in der Regel gleich groß wählt, besteht die Bedingung

$$A_F = A_Z \quad (3)$$

$$A = v \cdot t = \frac{a \cdot H}{f} \quad (4)$$

Diese sechs Parameter sind daher stets miteinander gekoppelt.

Das Bemerkenswerte dabei ist, daß gemäß Gl. (1) die Pixelauflösung in Flugrichtung nur von der Geschwindigkeit v des Trägers und der Belichtungszeit bzw. Zeilenperiode t abhängt. Diese Parameter können aber nicht beliebig gewählt werden. Die Trägergeschwindigkeit ist zumeist eine fest vorgegebene Größe, bei

Raumflugkörpern beträgt sie ca. 7000 m/s. Die Kürze der Belichtungszeit t ist andererseits begrenzt durch die ebenfalls gegebene Sensorempfindlichkeit und die spektrale Bandbreite $\Delta\lambda$. Schmale Spektralbandbreiten benötigen bei gegebener Sensorempfindlichkeit längere Belichtungszeiten. Das bedeutet, daß geometrische und radiometrische Auflösung einander widerstrebende Forderungen darstellen. Um dieses Dilemma zu lösen, wurden die sog. TDI-Sensoren (Time Delay and Integration) entwickelt.

3.1.8. TDI-Sensoren

Das oben beschriebene Problem, daß die Belichtungszeit nicht beliebig klein gemacht werden kann, um bei hohen Geschwindigkeiten auch hohe Auflösung zu erzielen, ist in der Photogrammetrie bekannt. Es wird dort durch mechanische oder optische Bewegungsnachführung gelöst.

Die TDI-Sensoren ermöglichen nun eine dem Bildwanderungs-Ausgleich adäquate Lösung für digitale Zeilensensoren. Die Lösung des Problems besteht darin, daß mehrere Sensorzeilen auf einem Chip parallel zueinander angeordnet sind (Abb. 12). Ein in die Sensorebene abgebildeter Gelände-Punkt überquert daher nicht nur eine Sensorzeile, sondern mehrere. Die dabei generierten Signale werden von Zelle zu Zelle mit dem wandernden Pixel weitergeschoben, summiert und am Ende seriell ausgelesen. Durch Parallel-Anordnung von m Zeilen läßt sich daher quasi die Empfindlichkeit des Sensors bzw. das Signal-Rauschverhältnis erhöhen, es vergrößert sich aber nicht linear mit m , sondern etwa proportional mit der Wurzel aus m . Derartige Sensoren sind so aufgebaut, daß man die Integration nur über einen Teil der m Parallelzeilen schalten kann. Ein TDI-Sensor der Fa. Fairchild mit $n = 1024$ Sensorelementen und $m = 64$ Parallel-Zeilen kann zum Beispiel wahlweise $m = 1, 4, 8, 16, 32$ oder 64 Zeilen integrieren [2]. Der ITEK-Sensor mit $m = 96$ Parallel-Zeilen erlaubt die Integration über $m = 1, 8$ oder 96 Zeilen. Seine Empfindlichkeit bei voller Integration beträgt etwa $0.2 \cdot 10^{-5} \mu\text{Ws/cm}^2$, also etwa den 10-fachen Wert einer Ein-Zeilen-Integration.

Diese TDI-Sensoren decken daher einen sehr großen Belichtungsspielraum ab und liefern bei großer geometrischer Auflösung trotz großer Fluggeschwindigkeit und unter ungünstigen Lichtbedingungen ein noch auswertbares Bildsignal.

Derartige Sensoren sind natürlich wesentlich teurer und verlangen im Betrieb eine gute Synchronisation der Taktfrequenz mit der Fluggeschwindigkeit und eine genaue Ausrichtung des Sensors in Bezug auf die Flugrichtung, andernfalls entstehen Auflösungsverluste.

3.2. Digitale Aufnahmetechnik mit Flächen-Sensoren

Bisher wurden ausschließlich zeilenförmige Abtast-Technologien behandelt. Es stellt sich nun die Frage, ob nicht auch eine digitale Flächenaufnahme möglich ist, wobei die im Flächenraster angeordneten Bildpunkte digital gespeichert werden könnten. Dies ist tatsächlich der Fall. Sämtliche Bildaufnahmeröhren sind Flächensensoren. So ist z.B. das in den ersten LANDSAT-Missionen eingesetzte Return-Beam-Vidicon eine hochauflösende Speicherbildröhre. Die Kamera entspricht im Prinzip einer photographischen Kamera mit Verschluß, nur daß statt des Filmes die lichtempfindliche Photoschicht der Bildröhre in der Bildebene angeordnet ist und seriell ausgelesen wird. Der Nachteil sämtlicher Bildröhren besteht aber darin, daß ihre geometrische Genauigkeit und Stabilität sehr zu wünschen übrig läßt und besonders für photogrammetrische Zwecke nicht eingesetzt werden kann.

Demgegenüber sind die rasterförmigen Photohalbleiter, die CCD-Flächen-Arrays, genau und stabil. Allerdings ist ihre Größe beschränkt. Die größten z.Zt. verfügbaren CCD-Flächen-Sensoren weisen ein Raster in der Größenordnung von ca. 400×500 Bildpunkten auf. Es ist kaum anzunehmen, daß dieses Format, das etwa der Fernsehnorm entspricht, in der nächsten Zeit überschritten werden wird, da kein Markt dafür vorhanden ist und mit jeder Formatvergrößerung die Schwierigkeiten mindestens quadratisch zunehmen.

Es ist aufgrund physikalischer und technologischer Grenzen nicht vorstellbar, daß man in absehbarer Zeit etwa Flächen-Detektoren mit $10\,000 \times 10\,000$ Bildpunkten fertigen könnte. Dieser Weg erscheint nach den heutigen Erkenntnissen utopisch, so verlockend es auch sein mag, wenn man sämtliche Methoden der Photogrammetrie, insbesondere der analytischen, auf digitale Flächenkameras übertragen könnte.

Es ist zwar möglich, ähnlich wie bei den Zeilensensoren, z.B. mit Hilfe von mehreren Objektiven einzelne Flächensensoren zu einer größeren Fläche zusammenzustellen, die damit verbundenen Probleme (z.B. Speicherung und Bildpunkt-korrektur) wären aber nur schwer lösbar und der enorme Aufwand würde sich kaum lohnen.

Nach Auffassung des Verfassers kann man im Bereich der Photogrammetrie und Fernerkundung auf Flächensensoren verzichten. Auch die geometrischen Probleme werden sich in Zukunft wahrscheinlich mit Zeilensensoren lösen lassen, vielleicht sogar eleganter als mit Flächensensoren.

4. Digitale Zeilensensor-Kameras

MBB entwickelte in den siebziger Jahren eine erste experimentelle digitale Zeilen-Kamera, in BuL [5] wurde darüber berichtet. Sie besitzt nur einen Sensor mit 1728 Bildpunkten, und bei einer Brennweite von $f = 24$ mm beträgt der Bildwinkel quer zur Flugrichtung etwa 50° . Durch Vorschalten verschiedener Filter kann dieser eine Kanal wahlweise in verschiedenen Spektralbereichen betrieben werden. Die 1978 und 1979 durchgeführten Erprobungsflüge und Bildaufnahmen waren ermutigend.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde im Auftrag des BMFT (Bundesministerium für Forschung und Technologie) und unter Mitwirkung der DFVLR (Deutsche Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt) und des ZGF (Zentralstelle für Geophotogrammetrie und Fernerkundung der Universität München) eine Satellitenbildkamera entwickelt, sie trägt die Bezeichnung MOMS (Modularer Opto-elektronischer Multispektral-Scanner), [6].

Mit dem Entwicklungsmuster wurden im April des Jahres 1981 die ersten Erprobungsflüge durchgeführt. Das zweite, weltraumtaugliche Gerät soll erstmals mit dem Space Shuttle Flug Nr. 7 im Februar 1983 zum Einsatz kommen.

Das Aufnahme-Instrumentarium setzt sich im wesentlichen aus folgenden Komponenten zusammen:

- a) Multispektral-Kamera
- b) Kamera-Zentral-Elektronik
- c) Magnetbandaufnahmegerät mit Aufnahme-Elektronik.

Die Kamera besteht aus zwei Spektral-Modulen ($\lambda_1 = 600 \pm 25$ nm, $\lambda_2 = 900 \pm 75$ nm), die jeweils nach dem Doppelobjektiv-Prinzip (siehe Abb. 11) aufgebaut sind.

Die weiteren, wichtigsten Spezifikationen sind:

Brennweite f:	237 mm
Öffnungsverhältnis:	1 : 3.5
Bildpunktzahl/Zeile:	6 912
Abstand der Pixelschwerpunkte:	16 μ m
Gesamtzeilenlänge:	110.6 mm
Zeilenperiode:	1/350 sec

Bei 300 km Flughöhe ergibt sich daraus eine Boden-Pixel-Auflösung von 20 m und eine Streifenbreite von ca. 140 km.

Die Zentral-Elektronik erlaubt die Erweiterung auf 4 Spektralmodule. Die Empfindlichkeitskorrektur der Sensor-Elemente geschieht durch eine Korrektur-Elektronik in Echtzeit vor der Signal-Aufzeichnung.

Das Bildsignal wird mit 7 Bit \approx 128 Graustufen auf sog. High Density Digital Tape (HDDT) gespeichert. Die Speicherrate beträgt pro Spektralkanal ca. 20 MBit/s, die zeitliche Aufnahmekapazität eines HDDT-Gerätes beträgt bei dieser Datenrate mit 2 Spektralkanälen etwa 15 min.

Die Hauptaufgaben dieses Gerätes sind folgende:

- a) Entwicklung der digitalen Aufnahme-Technologie
- b) Experimentelle Spektral-Klassifikation
- c) Sammeln von Detail-Erkenntnissen, wobei für photogrammetrische Belange besonders die Bildqualität und das Auflösungsvermögen von Interesse sind.

5. Vor-Verarbeitung der digitalen Bilddaten

Die bei der Aufnahme auf HDDT digital gespeicherten Bilddaten sind in dieser Form nicht unmittelbar Computer-compatibel. Das HDDT hat gegenüber dem Computer-Magnetband eine wesentlich höhere Packungsdichte, eine andere Kodierung und ein anderes Aufzeichnungsformat.

Das auf HDDT gespeicherte Bild muß daher, um vom Rechner verarbeitet werden zu können, in einem speziellen Umsetzungsprozeß auf Computer-compatible Form gebracht werden. Gleichzeitig finden Format-Änderungen und Kontrollen statt. Die entsprechende Anlage (Abb. 13) besteht aus folgenden Komponenten:

- Magnetbandgerät (es kann das HDDT-Aufnahmegerät oder ein besonderes Standgerät benützt werden),
- HDDT-Wiedergabe-Elektronik,
- Rechner-Interface,
- Rechner mit angeschlossener Magnetplatte und Magnetband,
- Software-Interfaces,
- zweckmäßigerweise schließt man noch einen grob auflösenden Schnell-Schreiber (Quick Look) an, um rasch einen vorläufigen Überblick über das Aufnahmeresultat zu erhalten.

Die Bilddaten stehen nunmehr auf Band oder Platte der eigentlichen Rechner-Auswertung, die spektral und geometrisch erfolgen kann, zur Verfügung. Aber auch in Zukunft wird der Nutzer auf ein handliches, dem menschlichen Beobachter unmittelbar zugängliches Bild nicht verzichten wollen, vor oder nach der Auswertung oder als Zwischenprodukt. Diese Aufgabe wird von einem Rechner-gesteuerten Rasterplotter erfüllt, auch hier sind Hard- und Software-Interfaces erforderlich.

6. Vorzüge, Merkmale und Probleme der digitalen Bildaufnahme

Aus dem bisher Gesagten geht hervor, daß die digitale Bildaufnahme mit hochauflösenden Zeilen-Sensoren in vielen Punkten große Vorteile aufweist, sofern eine Rechner-Auswertung der Bilddaten stattfinden soll. Dies ist besonders bei Spektral-Klassifikationen im Bereich der Fernerkundung der Fall. Wir haben andererseits gesehen, daß das digitale Aufnahme- und Auswerte-Instrumentarium mit allen Hard- und Software-Interfaces beträchtlichen Aufwand und Kosten verursacht, wobei die Interfaces oft teurer und in der Erstellung und Verfügbarkeit problematischer sind als die Haupt-Systemkomponenten. Man wird daher digitale Aufnahme- und Auswertesysteme in erster Linie dort einsetzen, wo folgende Aufgaben und Bedingungen vorliegen:

- a) Rasche Erfassung des aktuellen Standes großer Flächen
- b) Kurzfristige Auswertung in mittleren und kleinen Maßstäben
- c) Wiederholungs-Messungen.

Allgemein nimmt das Informationsbedürfnis stetig zu, und andererseits ist eine geeignete Auswertung und Komprimierung der Informationsfülle dringend erforderlich. Dieser Bedarf kann nur durch EDV befriedigt werden. Es ist daher besonders in den Bereichen der thematischen Kartierung eine breitere und zunehmende Anwendung digitaler Aufnahme- und Auswertemethoden zu erwarten.

Bei der digitalen Aufnahme und EDV-Bearbeitung spielt das Bilddaten-Mengenproblem eine besondere Rolle. Wir haben es auch heute, im Zeitalter der Computer und stetig anwachsenden Speicherkapazitäten vergleichsweise mit großen Datenmengen und langen Rechenzeiten zu tun. Um dies anschaulich zu demonstrieren, sind in der Tabelle die Speicherkapazitäten digitaler Speicher und eines Standard-Grauton-Luftbildes zusammengestellt und miteinander verglichen. Besonders ins Auge fallend ist das Speicher-Verhältnis zwischen HDDT zu CCT, das ca. 280 beträgt. Andererseits ist bemerkenswert, daß ein HDDT den Informationsinhalt von etwa 170 SW-Luftbildern enthält.

Pos.	Speicher-Medium	Speicher-Volumen in Bit	Speicher-Vergleich
1	High Density Digital Tape HDDT 27.5 KBit/Inch/Spur 28 Spuren, Länge 2800 m	$85 \cdot 10^9$	
2	300 Mega-Byte Plattenstapel	$2.4 \cdot 10^9$	HDDT = 35 Platte
3	Computer-Band, CCT 1.6 KBpI (Bit/Inch), Länge 700 m	$0.3 \cdot 10^9$	HDDT = 280 CCT(1.6)
4	Computer-Band, CCT 6.25 KBpI, Länge 700 m	$1.3 \cdot 10^9$	HDDT = 65 CCT(6.25)
5	Standard-Luftbild, Format 225mm x 225mm Bildpunktauflösung: 25 μ Graustufenauflösung: 6 Bit = 64 Stufen	$0.5 \cdot 10^9$	HDDT = 170 Luftbild
6	Filmspule; Länge 120 m, ca. 400 Bilder	$194 \cdot 10^9$	HDDT = 0.44 Filmspule(1:2.3)

Bit-Kapazität
von
Speichermedien

Das ganze Problem der digitalen Aufnahme- und Auswertetechnik muß langfristig gesehen werden. Die technische Entwicklung läuft trotz aller Schwierigkeiten im einzelnen zu einem immer umfassenderen Einsatz von Digitalrechnern. Im Bereich der Bildverarbeitung werden infolge der Bearbeitung großer Datenmengen mit relativ einfachen, immer gleichbleibenden Operationen die Array-Prozessoren als schnelle Hardware-Subrechner eine immer gewichtigere Rolle spielen. Im Bereich der HDDT-Speicherung ist in den 80-er Jahren mit einer 10-fachen Kapazitäts- und Durchsatz-Steigerung zu rechnen, d.h., daß die Datenrate bis auf 800 MBit/s erhöht wird. Für die Dauerspeicherung sind in Zukunft wahrscheinlich optische Speicherplatten die geeignetsten Medien wegen ihrer Haltbarkeit und ihres Speichervolumens, das weit in den Gigabit-Bereich hineinreicht. Darüberhinaus eröffnen die Methoden der Daten-Kompression Möglichkeiten, für Übertragung und Speicherung die Datenmenge ohne Informationsverlust zu reduzieren.

Die allgemeine EDV-Entwicklung kommt der digitalen Bildaufnahme und Verarbeitung entgegen.

Zum Schluß sei ein Problem kurz erwähnt, das für die Photogrammetrie natürlich von grundlegendem Interesse ist: die geometrische Auswertung. Das ist bisher der ausgesprochen schwächste Punkt der digitalen Zeilen-Aufnahme, wenn nicht der Fernerkundung überhaupt. Es könnte sein, daß die Unterschätzung dieses Problems oder das Unvermögen, es befriedigend lösen zu können, eine der wesentlichen Ursachen dafür darstellt, daß die Fernerkundung bisher nicht zu den Massen- und Routine-Aufgaben gefunden hat wie die klassische Photogrammetrie.

Das Arbeitsprinzip der digitalen Kamera, die sog. "Push-Broom"-Methode, weicht, wie bereits erwähnt, entscheidend von der zentralperspektiven photographischen Aufnahme ab. Man kann daher die in der Photogrammetrie bewährten Methoden nicht oder nur in wesentlich abgewandelter Form anwenden. Eine gut brauchbare, echt photogrammetrische Methode, die ohne externe Hilfsdaten auskommt, ist bisher nicht bekannt geworden, vor allem nicht für die Aufnahme aus Flugzeugen.

Aber nur mit einer wirklich voll befriedigenden Lösung des geometrischen Problems und der geometrischen Auswertung digitaler Kamera-Bilddaten wird diese Aufnahme- und Auswertetechnik eine wichtige Rolle in der Photogrammetrie und Fernerkundung spielen und beide Bereiche zu einem fruchtbaren Miteinander verbinden können.

Wir haben bei MBB, zunächst theoretisch, eine gute Lösung dieses Problems gefunden und sind dabei, sie zu entwickeln und zu verwirklichen. Wir hoffen, zur gegebenen Zeit darüber berichten zu können.

Literatur-Verzeichnis

- [1] Bradley, W.C., Ibrahim, A.A.: 10 240 pixel focal plane with five butted 2 048 x 96 element TDI CCDs. Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Vol. 175, Airborne Reconnaissance IV, 1979.
- [2] Farrier, M.G., Dyck, R.H.: A Large Area TDI Image Sensor for Low Light Level Imaging. Fairchild Camera and Instrument Corp., Palo Alto.
- [3] Hofmann, O.: Geometrisches Auflösungsvermögen und Modulationsübertragung von Photosensoren. Bildmessung und Luftbildwesen, 5/1975, S. 174-181.
- [4] Hofmann, O.: Methoden der Bildaufnahme und Aufzeichnung. Technische Akademie Esslingen, 1976, Lehrg. Nr. 3015/46.12.
- [5] Hofmann, O., Seige, P.: Erste Erprobungsergebnisse mit der experimentellen opto-elektronischen Kamera von MBB. Bildmessung und Luftbildwesen 47, März 1979, S. 33-40.
- [6] Hofmann, O., Hofmann, M., Meißner, D.: Ein Modulares, Opto-elektronisches, Multispektrales Satellitenbildaufnahme-System (MOMS) von MBB, Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH, Ottobrunn/München, 1980.
- [7] Rosenberg, R.: Information Theory and Electronic Photogrammetry. Photogr. Eng. Vol. XXI, No. 4, Sept. 1955, pp. 543-555.
- [8] Williams, R.E., Rosenberg, P.: The PRA TSS (Terrain Scanning System) for Electronic Photogrammetry. Photogr. Eng. Vol. XXII, No. 5, Dez. 1956, pp. 823-830.

Zusammenfassung

MBB entwickelte in den letzten Jahren eine opto-elektronische, digitale Aufnahme-Technologie für Gelände-Aufnahmen aus dem Luft- und Weltraum. Die Kameras arbeiten nach dem sogenannten "Push-Broom"-Prinzip mit hochauflösenden, linearen Photo-Halbleiter-Zeilen-Sensoren und dienen vor allem der Spektralklassifikation.

Erste erfolgreiche Aufnahmen wurden 1978 mit einer experimentellen Kamera durchgeführt. Aufbauend auf diesen Versuchsergebnissen entwickelte MBB einen "Modularen, Opto-elektronischen Multispektral-Scanner (MOMS)", der in einer Raumfahrt-tauglichen Version 1982 mit einem Space Shuttle auf einer sogenannten SPAS-Plattform (Space Pallet Satellite) in eine Erdumlaufbahn gebracht werden soll.

Die Bilddatenspeicherung erfolgt unmittelbar digital auf sogenannten "High Density Digital Tapes" (HDDT), die über eine Umsetzanlage auf Computer-Compatible Tapes (CCT) für die EDV-Weiterverarbeitung übertragen werden. Die Ausgabe der Bilddaten in graphischer Form ist über Raster-Schreiber in Farb- oder Grauton-Auszügen möglich. Wesentliche Probleme dieser neuen Bildaufnahme-Technik sind die hohen Datenströme und Datenmengen sowie die geometrische Entzerrung der Zeilenaufnahmen. Die Leistungsfähigkeit und die zukünftige Anwendungsbreite wird entscheidend von der Lösung dieser Probleme abhängen.

Digital Photography Techniques

Abstract

Within the past four years MBB developed techniques for opto-electronic digital imagery of the earth's surface from airplanes and spacecraft. They operate according to the push broom principle with high resolution linear semi-conductor photo detector arrays and are primarily employed for remote sensing tasks.

The first successful flight pictures were taken with an experimental camera in 1978. Based on these experiences MBB developed a Modular Opto-electronic Multispectral Scanner (MOMS) which, in a version qualified for space missions, will be part of the payload of the SPAS-platform (Space Pallet Satellite) aboard the Space Shuttle in 1982.

The image data are recorded directly on high density digital tapes (HDDT) from where they are later transcribed on computer-compatible tape (CCT) for image data processing. The images can be produced in graphical form in black and white or color by means of a raster plotter. Potentially troublesome characteristics of these novel image recording techniques are the large data rates and storage requirements and the computational correction of geometric distortions of the picture lines. The successful solution of these problems will determine the capabilities and the scope of applications of the described imagery system.

Technique de prise de vues numérique

Résumé

Au cours des dernières années la maison MBB a réalisé une technique de prise de vues numérique opto-électronique pour photographier la surface de la terre de l'avion et du cosmos. Les chambres de prise de vues opèrent selon le principe "Push-Broom" avec des photo-détecteurs semi-conducteurs linéaires et servent avant tout à la classification spectrale.

Les premières prises de vues satisfaisantes ont été réalisées au moyen d'une chambre de prise de vues expérimentale en 1978. A l'appui de ces résultats d'essai, la maison MBB a mis au point un "Modularen, Opto-elektronischen Multi-spektral-Scanner" (MOMS) (Scanner modulaire opto-électronique multispectral) qui sera lancé sur une orbite autour de la terre en 1982 au moyen d'une Space Shuttle sur une plate-forme dite SPAS (Space Pallet Satellite).

La mémorisation des données d'image s'effectue directement de façon numérique sur des "High Density Digital Tapes" (HDDT) qui sont transmises au moyen d'une unité de conversion sur des "computer compatible tapes" (CCT) pour le traitement des données. Les images peuvent être réalisées sous forme graphique en noir et blanc ou en couleur au moyen d'un plotter en forme de trame. Les principaux problèmes de cette nouvelle méthode de prise de vues sont le volume et la grande vitesse de traitement des informations ainsi que le redressement géométrique des lignes d'image. Son efficacité et son domaine d'application futur dépendront largement de la solution de ces problèmes.

La técnica de toma digital

Resumen

Durante los últimos años, la empresa Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB) ha desarrollado una técnica optoelectrónica digital para realizar imágenes del terreno desde aviones o naves espaciales. Las cámaras trabajan según el principio "push broom" (barrido) con redes de antenas lineales de foto-detectores de tipo semi-conductor, de alta resolución, y sirven en primer lugar para la clasificación según márgenes espectrales.

Las primeras imágenes se realizaron con éxito en 1978, mediante una cámara experimental. Los resultados proporcionados por estas experiencias sirvieron de base a MBB para desarrollar un equipo modular optoelectrónico de barrido multiespectral (MOMS) cuya versión adecuada para vuelos espaciales será colocada en órbita en 1982, montada sobre una plataforma SPAS (Space Pallet Satellite), por medio del transbordador espacial Space Shuttle.

Los datos de imagen se almacenan inmediata y digitalmente en las llamadas "cintas digitales de alta densidad" (HDDT). Por intermedio de un convertidor, se las transforma en cintas compatibles con computador (CCT) para su ulterior proceso electrónico. La salida de los datos de imagen en forma gráfica es factible sea en color sea en niveles de grises con ayuda de impresoras de matriz. Constituyen problemas esenciales de esta nueva técnica las elevadas cantidades de datos y su almacenamiento, así como la corrección geométrica de las distorsiones de las imágenes de líneas. El rendimiento y el margen de aplicación de esta técnica dependerán esencialmente de la resolución de estos problemas.

Dr.-Ing. O. Hofmann,
Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH,
D-8000 München 80

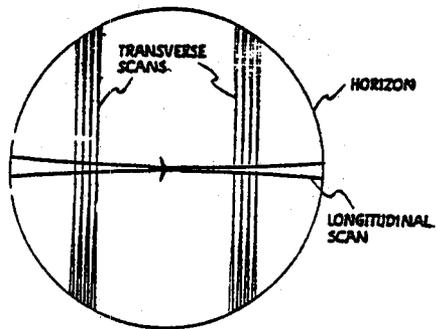


Abb. 1: Opto-elektronische Gelände-Abtastung nach Rosenberg und Williams

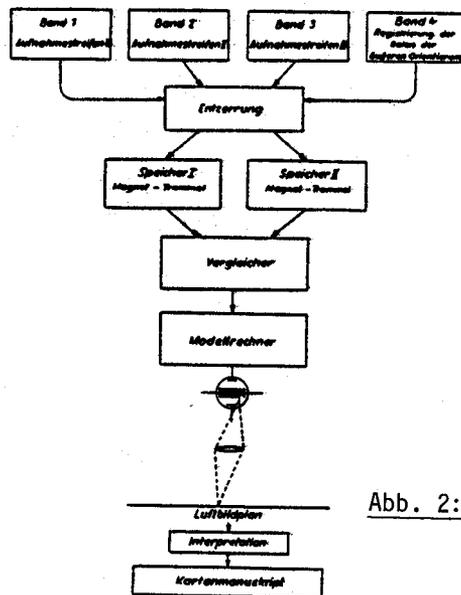


Abb. 2: Automatische Auswertung nach Rosenberg und Williams

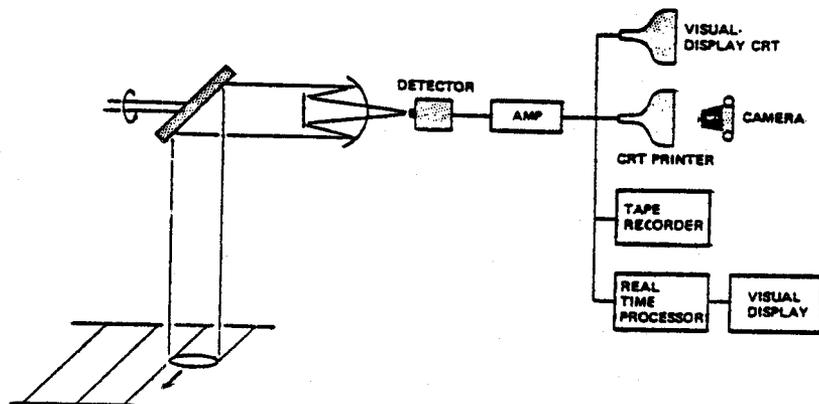


Abb. 3: Optisch-mechanisches Scanner-Prinzip

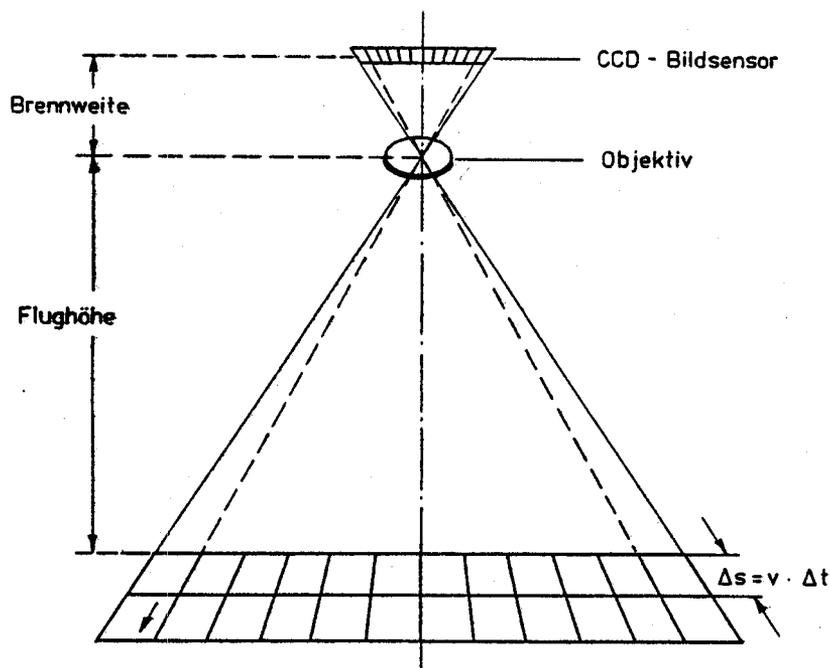


Abb. 4: Push-Broom-Prinzip

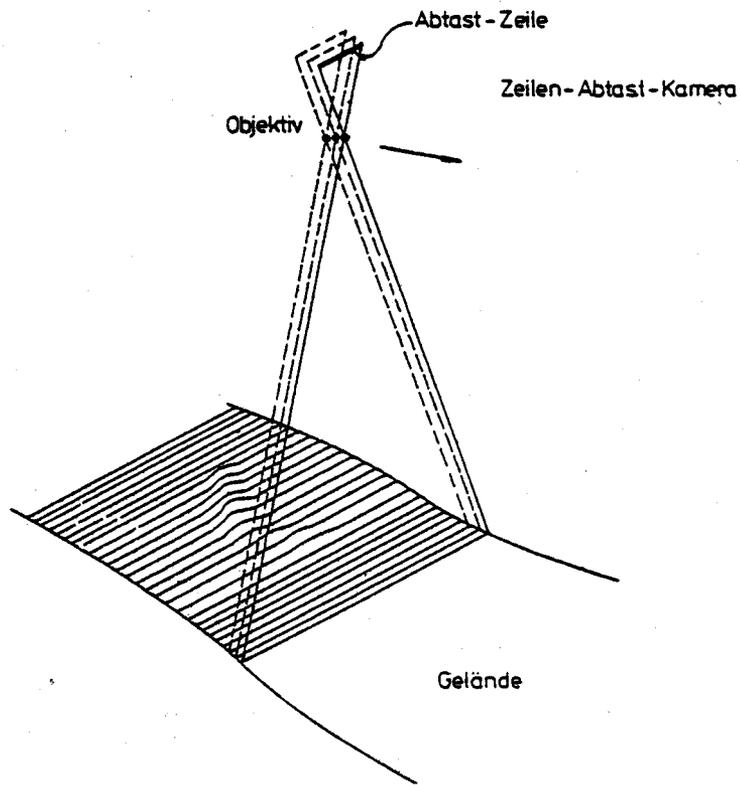


Abb. 5: Bildstreifenerzeugung durch Zeilenabtastung

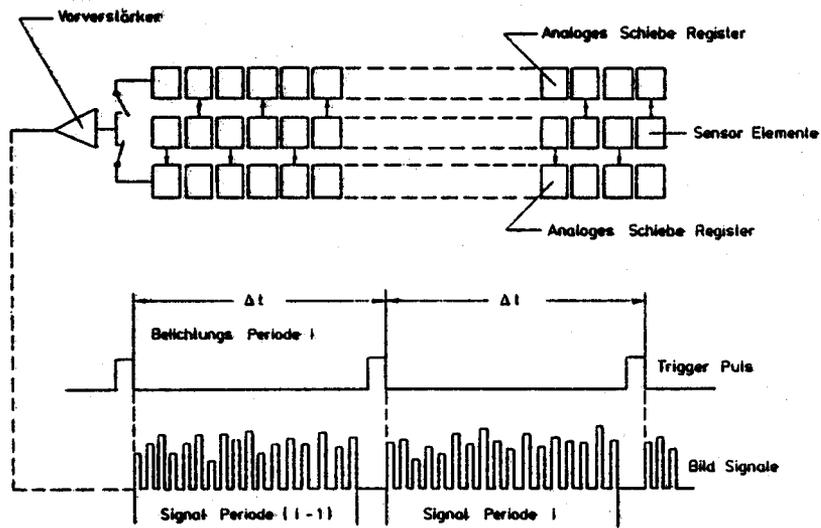


Abb. 6: CCD-Sensor-Arbeitsprinzip

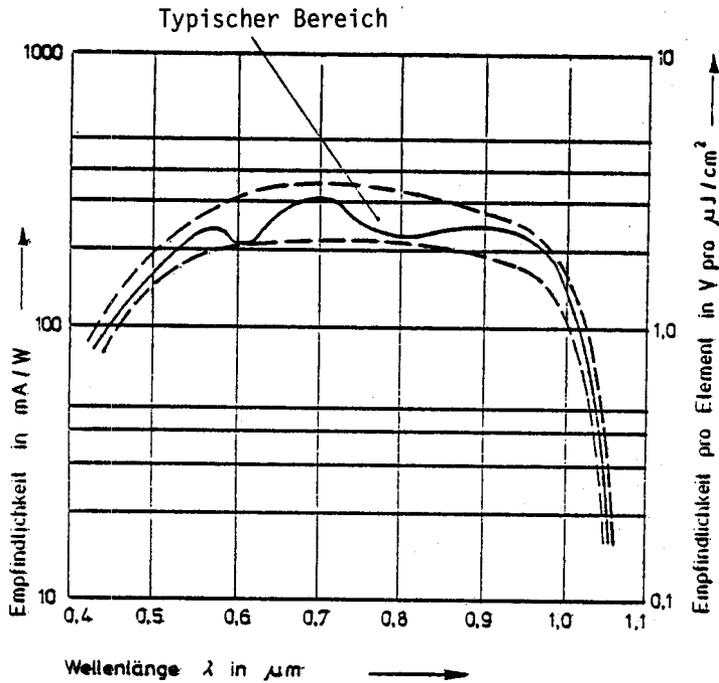


Abb. 7: Spektral-Empfindlichkeit eines CCD-Sensors

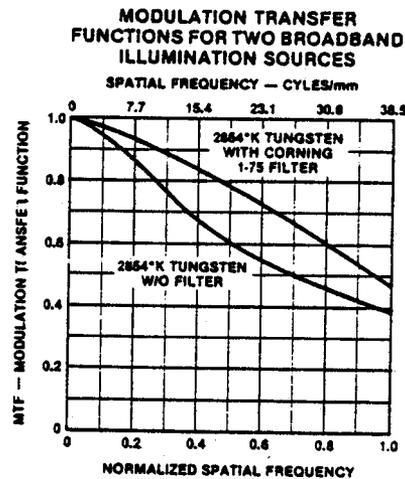
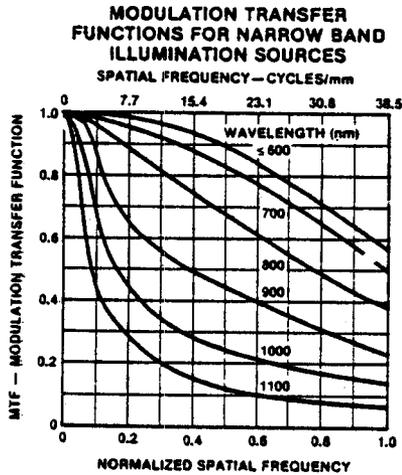


Abb.8: Modulationsübertragung des Sensors CCD 122/142 von Fairchild

The Corning 1-75 filter has the following typical transmittance spectral characteristic: > 85% at < 600 nm, 80% at 700 nm, 30% at 800 nm, 5% at 900 nm and < 2% at > 1000 nm.

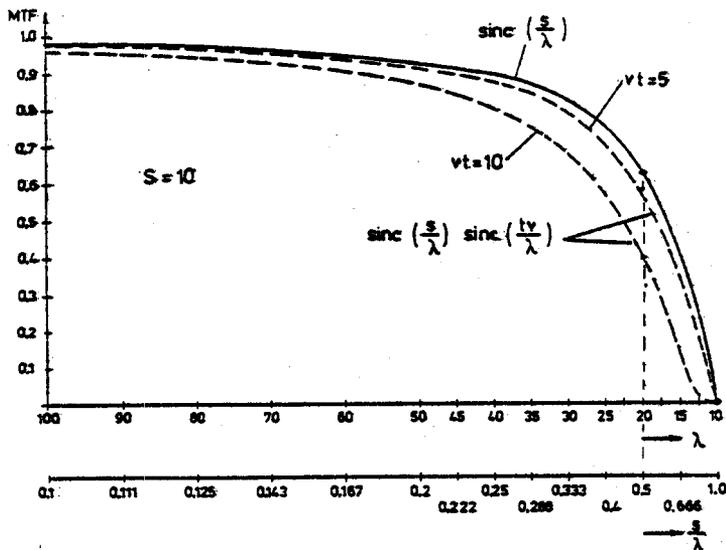


Abb. 9: Theoretische Modulationsübertragung von digitalen Photosensoren

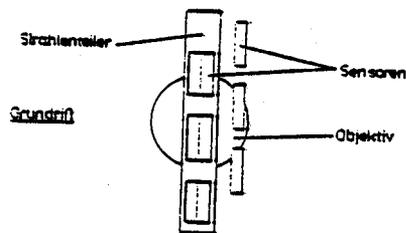
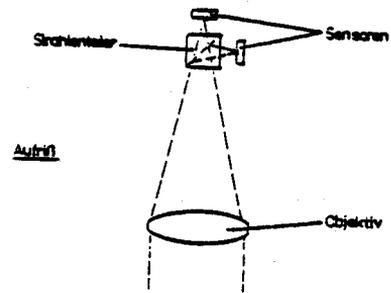


Abb. 10: Strahlenteileranordnung zur Zeilen-Verlängerung

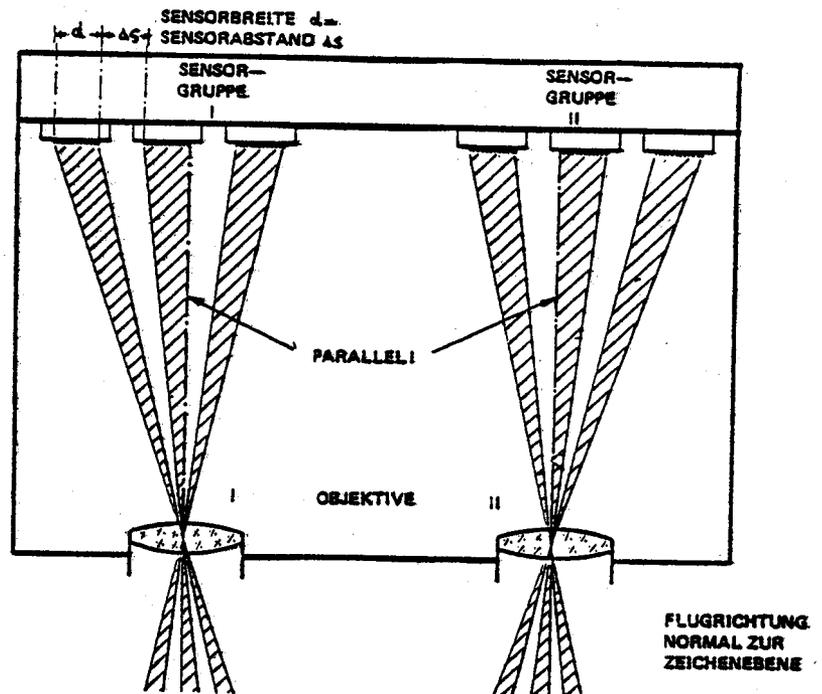


Abb. 11: Doppelobjektiv-Prinzip zur Zeilen-Verlängerung

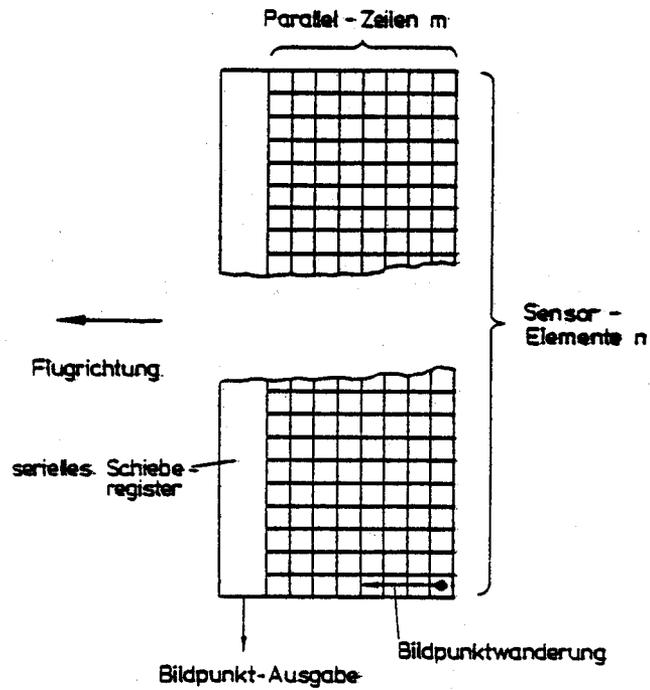


Abb. 12: TDI - Arbeitsprinzip

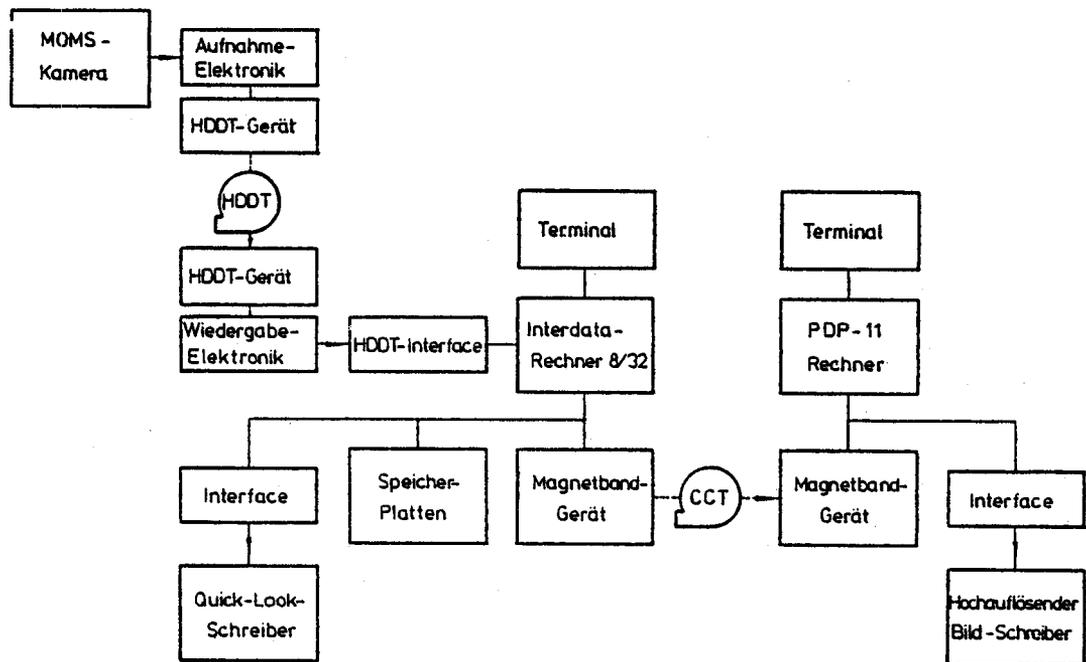


Abb. 13: Bildvorverarbeitungsanlage