

Zeitschrift:	Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural
Herausgeber:	Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)
Band:	81 (1983)
Heft:	6
Artikel:	Vergleich von photographischer und digitaler Abbildung bei Fernerkundung-Kameras mit Film resp. mit Festkörper-Array
Autor:	Slater, P.N.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-231634

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 22.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Vergleich von photographischer und digitaler Abbildung bei Fernerkundung-Kameras mit Film resp. mit Festkörper-Array*

P.N. Slater

Zum Vergleich der Abbildung bei einer Kamera mit Festkörper-Array und einer photographischen Filmkamera wurde eine analytische Untersuchung unter gleichen Bedingungen durchgeführt. Beide Kameras waren von gleicher Grösse und wiesen eine Abbildung mit gleicher Bildmodulation bei gleicher Ortsfrequenz auf. Der Vergleich umfasste sowohl eine digitale Abbildung, bei der der Film mit einem Mikrodensitometer abgetastet wurde, als auch eine Analog-Abbildung, bei der die digitale Ausgangsgrösse des Arrays auf Film aufgezeichnet wurde. Die digitale Abbildung wurde ausgewertet im Hinblick auf Rauschabstand (SNR) und minimal erfassbare Differenz (Δp) der Bodenremission; die Analog-Abbildung wurde hinsichtlich der visuellen Auflösungsgrenze ausgewertet. Ebenfalls untersucht wurden die Auswirkungen unterschiedlicher atmosphärischer Bedingungen und unterschiedlicher Kontrastverhältnisse am Boden. Das interessanteste Ergebnis der Untersuchung besagt, dass die digitale Abbildung der Kamera mit Festkörper-Array einen höheren Rauschabstand (SNR) aufweist als das System Filmmkamera-Mikrodensitometer. Zur automatisierten Objektklassifizierung ist also die Abbildung mit der Festkörper-Array-Kamera vorzuziehen. Zur Verwendung in der Kartographie und Vermessung ist andererseits die Filmmkamera vorzuziehen, weil hierbei die visuelle Auflösungsgrenze bei einer höheren Ortsfrequenz liegt als beim System Festkörper-Array-Kamera-Filmaufzeichnung.

Une comparaison analytique a été faite entre les images produites par une caméra à champs récepteur solide (solid-state-array) – ou digitale –, et celles obtenues par une caméra à film photographique. Les deux caméras, de dimensions égales, opéraient dans les mêmes conditions. La modulation des images en fonction de la fréquence spatiale était la même pour les deux caméras. La comparaison incluait, d'une part une image digitale du film photographique obtenue à l'aide d'un microdensitomètre et d'autre part une image photographique obtenue en filmant la sortie digitale du champs récepteur solide. L'image digitale est évaluée en regard du rapport signal-bruit (SNR), et de la différence minimale de la réflexion du sol pouvant être détectée (Δp). L'image photographique est évaluée en tenant compte de la résolution visuelle limite. Les effets des conditions météorologiques sur l'image et ceux des différents rapports de contraste du sol sont également étudiés. Le résultat le plus intéressant est le suivant: L'image de la caméra digitale possède un SNR plus grand que celui obtenu par l'image photographique digitalisée à l'aide du microdensitomètre. Ainsi, dans un but de classification automatique la caméra digitale sera préférable, tandis que la caméra photographique restera plus intéressante pour la cartographie et les mensurations. Ces choix sont dictés par le fait que la résolution visuelle limite est atteinte à une fréquence spatiale plus élevée dans le cas de la caméra photographique que dans celui de la caméra digitale.

Einleitung

In den meisten Fällen von Fernerkundung werden grosse Gebiete untersucht, um den Bestand an Bodengütern (resources) aufzunehmen oder für wissenschaftliche oder politische Zwecke wesentliche Veränderungen an Bodengütern (resources) festzustellen. Der Gesamtumfang der gesammelten Daten ist gross, die Untersuchung wiederholt sich gewöhnlich mehrfach, und oft

ist es wichtig, Veränderungen bei der frühestmöglichen Gelegenheit zu erfassen. Aus diesen Gründen werden automatisierte Verfahren der Objektklassifizierung und Informationsgewinnung entwickelt, um die Leistung manueller Photointerpretation und kartographischer Verfahren zu erhöhen. Überdies wird ein besonderes Augenmerk auf jene Bildeigenschaften gerichtet, welche für die Fernerkundung wichtig sind. Für die sichtbaren und nahen Infrarotspektralgebiete dienen der Fernerkundung grundsätzlich photographische und elektro-optische Abbildungssysteme. Das häufigste photographische System ist die Multiband-Kamera oder

Multispektral-Kamera, in ihrer einfachsten Form eine Anordnung aufeinander abgestimmter Kameras mit unterschiedlichen Spektralfiltern vor jedem Objektiv, mit der ein Bodengebiet in ausgewählten Wellenlängenbereichen simultan photographiert wird.

Die elektro-optische Kamera für die Fernerkundung ist ähnlich, nur ist der photographische Film durch eine elektro-optische Bildspeichereinrichtung ersetzt. Das kann eine Photomultiplier- oder eine Fernsehkamera-Röhre sein, ein photoleitender Detektor oder ein Festkörper-Array (Photodiode oder ladungsgekoppeltes Element [CCD, charge coupled device]). Wir beschränken die vorliegende Untersuchung auf Festkörper-Arrays, die relativ neu sind und gegenüber anderen die Eigenschaft höherer Auflösung und Empfindlichkeit bieten. Die einfachste Form eines Festkörper-Arrays ist eine eindimensionale oder lineare Gruppe. Zur Aufnahme der üblichen zweidimensionalen Photographie wird der Linear-Array senkrecht zur Vorwärtsbewegung des Flugzeuges oder Raumfahrzeugs in der Brennebene der Kamera angeordnet. Wenn sich also das Fahrzeug fortbewegt, läuft das bewegte Bild des Geländes über die einzelnen photoempfindlichen Elemente des Arrays. Die Informationen (von den Elementen) werden in Form eines Spannungs-Ausgangssignals aufgezeichnet.

Welches Aufnahmeverfahren ist besser? Es existieren beträchtliche Meinungsverschiedenheiten über die relativen Vorteile elektrooptischer und photographischer Fernerkundungssysteme. Die Meinung wird vertreten, elektrooptische Systeme hätten gegenüber Film-Systemen den Vorteil eines grösseren Dynamikumfanges, es ist aber wohlbekannt, dass Luftbildfilme den gesamten Umfang der Boden-Helligkeitspegel angemessen wiedergeben können. Hierher gehört auch die Bemerkung, dass die Abbildung bei einem photographischen System gegenüber der Abbildung bei elektro-optischen Systemen mit geringerem räumlichem Auflösungsvermögen für die automatische Gebietsklassifikation nicht entsprechend höhere Genauigkeiten liefert.

Zur Klärung dieser offensichtlichen Meinungsunterschiede werden eine CCD- und eine Filmmkamera gleicher Grösse und mit gleichen Abbildungso-

* Seminarvortrag, gehalten am 8. Juni 1982 am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH-Hönggerberg. Übersetzung aus dem Englischen von der Firma Kern & Co. AG, Aarau.

tiken verglichen. Zwei Fälle werden untersucht. Im ersten Fall werden die digitalen Informationen der CCD-Kamera verglichen mit den durch Mikrodensitometrie der Filmaufzeichnung gewonnenen digitalisierten Daten. Im zweiten Fall wird die Filmaufzeichnung verglichen mit einer visuellen Darstellung der digitalen CCD-Informationen, die man mit einem verlustfreien Digital-Analog-Wiedergabesystem erhält.

Das Vergleichskriterium für die Film- und CCD-Kameras ist der Rauschabstand (SNR, signal to noise ratio) der Abbildung, wenn beide Systeme bei der höchsten aufzuzeichnenden Ortsfrequenz den gleichen Modulationsgrad (0,5) der Abbildung erzeugen. Der Nutzen dieses 0,5-Modulationskriteriums und seine Beziehung zu anderen Kriterien werden im ersten Teil dieses Berichtes untersucht.

Es wurde bereits gezeigt [1], dass zwischen den SNR-Gleichungen für photographische Filmkameras und Festkörper-Array-Kameras fundamentale Unterschiede bestehen. Insbesondere der atmosphärische Durchlassgrad und die aufsteigende atmosphärische Strahlung beeinflussen die Abbildung bei den beiden Systemen unterschiedlich. Es existieren viele Anwendungen für durch Fernerkundung erfasste Abbildungen, bei denen eine Vielfalt von Bodenobjekten durch die Atmosphäre hindurch erfasst werden muss mit dem Ziel, deren Grösse, Lage oder spektrale Remission zu messen. Im Hinblick darauf umfasst der zweite Teil dieses Beitrages eine quantitative Beschreibung verschiedener Atmosphären, welche durch unterschiedliche (wetterbedingte) Sichtweiten charakterisiert sind. Wir fassen dann die bei den zu vergleichenden Festkörper-Array- und Filmsystemen benötigten Gleichungen und Betriebsdaten zusammen und definieren eine optimale Grösse einer Festkörper-Array-Kamera, der das Format der Filmkamera angepasst wird. Sodann vergleichen wir die Leistung der Systeme sowohl im Digital- als auch im Analogbetrieb in Abhängigkeit von atmosphärischen Bedingungen bei der Abbildung von: 1) Objekten mit sehr geringen Remissions-Differenzen gegenüber ihrer Umgebung, die für einige Klassifizierungen von Bodengütern (earth resources) von besonderem Interesse sind; 2) Objekten mit grossem Kontrast, wie kartographische Passpunkte und einige dreistufige Zielfelgruppen, und 3) dreistufigen Zielfelgruppen mit mittlerem und geringem Kontrast.

Kriterium für das Auflösungsvermögen

In einigen Arbeiten wurden grundlegende Ideen zur Beurteilung und zum

Vergleich verschiedener Arten von Bildaufnahmegeräten entwickelt, und in einigen Fällen wurde vorgeschlagen, diese Vorstellungen auf die Beschreibung oder Beurteilung der Leistung elektro-optischer und photographischer Systeme zu erstrecken.

So konnte Schade [2, 3] – durch Einführung des Begriffes äquivalenter Durchlassbereich (equivalent passband) – Schwellen-Rauschabstände (SNRs) und entsprechende Wahrscheinlichkeiten für die visuelle Wahrnehmung von dreistufigen Testobjekten und von Helligkeitsstufen in photographischen Bildern bestimmen. Er führte diese Arbeit weiter [4] zum Vergleich der Leistung hoch auflösender Vidikons (= Bildaufnahmeröhre aus der Fernsehtechnik) und photographischer Filmsysteme. Rose [5] und später Jones [6] entwickelten den Begriff Wahrnehmungs-Quantenwirkungsgrad (*detective quantum efficiency, DQE*) als grundlegendes Leistungsmass für photographischen Film und Vidikon, wobei DQE gegeben ist durch das Verhältnis der entsprechenden (SNR)²-Werte. Beide Konzepte haben wertvolle Einsichten in die Probleme der Wahrnehmung und Aufzeichnung von Abbildungen geliefert; trotzdem wurden sie – obwohl schon vor einigen Jahren erstmals bekannt gemacht – lediglich in relativ wenigen Spezialfällen nutzbar gemacht.

Eine einfache und allgemein verwendete Bezeichnung des Auflösungsvermögens eines Sensors mit diskreten Detektoren geschieht durch Angabe seines momentanen Sehfeldes (*instantaneous field of view IFOV*). IFOV ist jedoch ein ungenügendes Kriterium, da es lediglich das Verhältnis von Detektorgröße zu Brennweite des Abbildungssystems angibt und derart wichtige Größen wie die MTF (modulation transfer function) des Abbildungssystems und die MTF infolge Bewegungsunschärfe (image smear) nicht berücksichtigt. Um dem Bedürfnis nach einer besseren Definition des System-Auflösungsvermögens zu entsprechen, wurde für die System-MTF ein Modulationswert 0,5 vorgeschlagen [7], der als effektives momentanes Sehfeld (*effective instantaneous field of view EIFOV*) bezeichnet wird. Die nachfolgende Definition entspricht mit einer Ausnahme* diesem Vorschlag: Das EIFOV für eine sinusförmige Verteilung der spezifischen Objektausstrahlung ist die Wellenlänge im Raum, für welche die Modulation der Verteilung infolge der MTF des Systems auf das 0,5fache abgefallen ist.

Die Masseinheit für das EIFOV ist also 1 Meter im Objektraum, entsprechend den Erfordernissen bei der Verwertung

der durch das System ermittelten Daten, obwohl für die meisten anderen Zwecke der von dieser Distanz am Instrument aufgespannte Winkel zu bevorzugen ist.

Es ist vergleichsweise interessant zu bemerken, dass Schades äquivalenter Durchlassbereich (equivalent passband), der durch die unter der quadrierten System-MTF-Kurve gelegene Fläche gegeben ist, je nach Form der MTF einem Modulationsgrad von typisch zwischen 0,55 und 0,65 entspricht. Für eine sinc-Funktion ($\text{sinc}(x) = x^{-1} \sin(x)$) als Anhaltspunkt entspricht er einer Modulation von 0,64. Schades Kriterium des äquivalenten Durchlassbereiches ist demnach strenger als die Modulation 0,5, welche das EIFOV definiert. Tatsächlich wurde der Modulationsgrad 0,5 gewählt als Kompromiss zwischen dem von Schade vorgeschlagenen Wert und einigen der laufend verwendeten Modulationsschwellenwerte. Ein weiterer Anhaltspunkt ist, dass allein schon die Wirkung des quadratischen Detektors (mit quadratischer Form) bei Verwendung der NASA-Definition des EIFOV (siehe Fussnote Seite 202) in einem System ein EIFOV als Distanz pro Halbperiode ergibt, das 17% unter dem für einen Detektor gleicher Grösse berechneten IFOV liegt. Nimmt man die MTF des Abbildungssystems und die MTF infolge Bewegungsunschärfe hinzu, so wird offenbar das EIFOV vergrössert, während das IFOV definitionsgemäss konstant bleibt. Die Untersuchung zeigt, dass für Abtastsysteme in der Praxis das EIFOV und IFOV oft etwa gleich sind. Das röhrt daher, dass die Abbildungsleistung eines Abtasters gewöhnlich durch die Grösse des oder der verwendeten Detektoren bestimmt ist und MTF des Abbildungssystems und MTF infolge Bewegungsunschärfe nahezu die oben genannte 17%-Differenz ergeben. Für spezielle Fälle oder wenn kritische Konstruktionsvergleiche durchzuführen sind, beispielsweise für die Reduktion der MTF des Abbildungssystems zur Erhöhung der System-Lichtstärke und dadurch zur Reduktion der Bewegungsunschärfe, ist die Verwendung des EIFOV oder eines ähnlichen Kriteriums auf MTF-Basis wesentlich.

* Man beachte, dass diese Definition dem in der Optik eingeführten Gebrauch der Wellenlänge im Raum (volle Periode oder Liniene paar) entspricht und nicht der von der NASA verwendeten Halbwellenlänge (Halbperiode oder Linie) [7]. Sie gibt einen gegenüber der NASA-Definition doppelten Zahlenwert des EIFOV, unser EIFOV von 30 m entspricht also 15 m gemäss NASA-Definition. Der Unterschied liegt lediglich in den Masseinheiten und berührt Konstruktion oder Leistung des Systems nicht.

Charakterisierung unterschiedlicher atmosphärischer Bedingungen

Es gibt keine einfache und gleichzeitig präzise Möglichkeit, die Atmosphäre für Zwecke der Fernerkundung zu charakterisieren. Die einfachsten meteorologischen Beschreibungen sind ‚klar‘ und verschiedene Grade von Dunst und Nebel, wie leicht, mässig und dicht. Die Schwierigkeit liegt darin, dass diese Beschreibungen subjektiv und qualitativ sind. Die meteorologische Sichtweite, welche definiert ist als die grösste horizontale Entfernung auf Meereshöhe, auf welche das Auge sehen kann, liefert eine zahlenmässige Beschreibung. Wie Elterman [8] betont, macht der Aerosolgehalt innerhalb der ersten 3 km oberhalb des Meeresspiegels für das Tagessehen, also bei einer Wellenlänge von 550 nm und bei einer meteorologischen Bodensichtweite von 23 km etwa 70% der optischen Gesamtextinktion (total optical thickness) aus. Der schwache Punkt der meteorologischen Sichtweite als Mass ist, dass viele stark unterschiedliche Vertikalprofile der Ozonstreuung, des Aerosols oder nach Rayleigh der gleichen meteorologischen Sichtweite entsprechen können. Besondere Verfahren zur Charakterisierung der Atmosphäre für Zwecke der Fernerkundung wurden von Hulstrom [9], Potter [10], Turner und anderen der ERIM-Gruppe [11] sowie von Rogers und Peacock [12] entwickelt. All diese Verfahren basieren auf der Verwendung atmosphärischer Modelle und arbeiten mit Messung der optischen Extinktion (extinction optical thickness) vom Boden bis zum Raumpunkt infolge Molekular-, Ozon- und Aerosolstreuung.

Für diese Untersuchung verwenden wir das Vertikal-Abschwächungsmodell von Elterman [8] in Kombination mit Werten, die aus von Hulstrom [9] und Turner et al. [11] angegebenen Daten interpoliert sind.

Abbildung 1 zeigt den Zusammenhang zwischen meteorologischer Sichtweite und optischer Extinktion (extinction optical thickness), der für dieses Modell bei einer Wellenlänge von 650 nm gilt. Die nachfolgend beschriebenen Berechnungen wurden durchgeführt für meteorologische Sichtweiten von 2, 4, 8, 15 und 30 km sowie für Unendlich (Fall ohne Atmosphäre). Als Anhaltspunkt seien zwei allgemein anerkannte Übergänge erwähnt, jener von Nebel zu Dunstbedingungen bei etwa 1,2 km und der von Dunst- zu klaren Bedingungen bei etwa 15 km.

Mit jeder Sichtweite ist der atmosphärische Durchsichtigkeitsgrad τ_A im Nadir verbunden, wobei

$$\tau_A = \exp(-\tau_{\text{ext}}) \quad (1)$$

und τ_{ext} die Extinktion der Atmosphäre

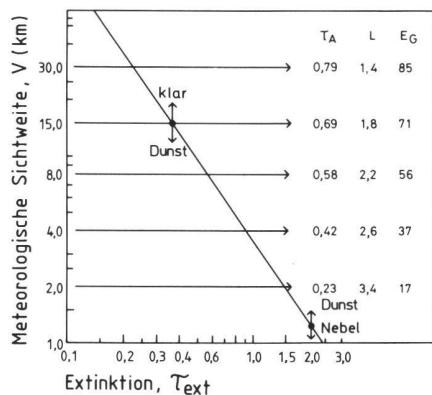


Abb.1 Meteorologische Sichtweite in Kilometer als Funktion der Extinktion τ_{ext} bei $\lambda = 650 \text{ nm}$ (nach Elterman [8]). Tabulierte Werte für vertikale atmosphärischen Durchsichtigkeitsgrad τ_A , atmosphärische spezifische Lichtausstrahlung L in $\text{Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}$ und Bestrahlungsstärke des horizontalen Bodens E_G in Wm^{-2} berechnet wie im Text beschrieben für 40° Zenitwinkel der Sonne, Wellenlängenbereich 600 bis 700 nm und mittlere Hintergrundremission von 0,08. Im Falle fehlender Atmosphäre gilt eine meteorologische Sichtweite Unendlich, $\tau_A=1$, $L=0$ und $E_G=115 \text{ Wm}^{-2}$.

bezeichnen. Die Bestrahlungsstärke E_G auf eine horizontale Ebene auf Bodenniveau bei einem Zenitwinkel der Sonne von $\Theta = 40^\circ$ ist aus Daten von Thekaekara et al. [13] berechnet mit der spektralen Sonnen-Bestrahlungsstärke E_0 oberhalb der Atmosphäre. Beschränkt man sich, wie überall in diesem Beitrag, auf den Wellenlängenbereich 600 bis 700 nm, so ergibt sich ein Wert $E_0 = 150 \text{ Wm}^{-2}$. Zwischen E_G , E_0 , τ und Θ gilt die Beziehung

$$E_G = E_0 \cos \Theta \cdot \exp(-\tau_{\text{ext}} \cdot \sec \Theta). \quad (2)$$

Der Betrag der aufsteigenden atmosphärischen Strahlung (upwelling atmospheric radiance) bei 650 nm wurde bestimmt aus dem Mittel der Werte von Turner et al. [11] bei 550 und 750 nm, entsprechend einer mittleren Hintergrund-Remission von 0,08 für einen Zenitwinkel der Sonne von 40° . Die kleine Änderung der atmosphärischen spezifischen Lichtausstrahlung bei einer Änderung der Hintergrund-Reflektion ρ für $\rho \leq 0,20$ hat auf nachfolgende Berechnungen nur geringen Einfluss und wird deshalb als konstant behandelt.

Betriebsparameter und grundlegende Gleichungen

Wir wollen annehmen, dass die beiden zu vergleichenden Systeme in einem Satelliten im Erdumlauf auf 1000 km Höhe betrieben werden sollen. Wir werden die Beziehung zwischen erfassbarer Remissionsdifferenz $\Delta\rho$, Hintergrundremission ρ und Rauschabstand (SNR) bestimmen als Funktion der oben beschriebenen unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen für ein EIFOV des Systems von 30 m über eine Streifenbreite von 200 km, entsprechend einem Sehfeld von $11,4^\circ$. Wir wählen ein gewöhnlich gebrauchtes Multispektralband: 600 bis 700 nm. Diese und andere Parameter sind für eine schnelle Übersicht in Tabelle 1 aufgeführt.

Die beiden zu vergleichenden Systeme arbeiten jeweils mit einem Festkörper-Array von Detektoren und mit einem Luftbildfilm hoher Bildauflösung. Zur Beurteilung der digitalen Ausgabe des photographischen Systems umfasst dieses als Systemteil ein Mikrodensimeter. Bei der Beurteilung der analogen Ausgabe des elektro-optischen Systems beziehen wir uns auf die auf Film aufgezeichnete Abbildung des Festkörper-Arrays.

Wir setzen voraus, das elektro-optische System arbeite mit einem in seiner Bildebene senkrecht zur Flugrichtung orientierten linearen selbstabtastenden Array von Festkörper-Detektoren. Beim Vorrücken des Satelliten auf seiner Bahn gleitet das Bild über den Detektor-Array. Die Breite jedes Detektorelementes sowie deren Mittenabstand können wir zu $15 \mu\text{m}$ annehmen, ein für einige der besten heute hergestellten linearen CCD-Arrays typischer Wert. Für das spezifizierte Sehfeld benötigen wir 13 333 Elemente pro Meter Brennweite. Als optisches System wird eines der besten gegenwärtig zur Verwendung in Panorama-Kameras erhältlichen langbrennweitigen Objektive ausgewählt, ein apochromatisches Petzval-Objektiv von Itek mit 610 mm Brennweite und 12° Gesamtfeld [14]. Für dieses Objektiv berechnete MTF-Kurven zeigen bei Blende 3,5 im Spektralgebiet 500 bis 700 nm nahezu beugungsbegrenzte

Höhe	1000 km
EIFOV	30 m
Sehfeld	$11,4^\circ$
Feldwinkel (Blick in den Nadir, optische Achse vertikal)	0°
Bandbreite, $\Delta\lambda$	600–700 nm
Geschwindigkeit des Punktes unterm Satellit	6,35 km/s
Durchsichtigkeitsgrad (transmittance) des optischen Systems, τ_0	0,8
Bestrahlungsstärke (irradiance) am Boden, E_G	siehe Abb.1
Atmosphärischer Durchsichtigkeitsgrad, τ_A	siehe Abb.1
Spezifische Lichtausstrahlung, L	siehe Abb.1

Tabelle 1 Betriebsparameter

Leistung. Im interessierenden Ortsfrequenzbereich von 25 bis 35 Perioden/mm fällt die MTF dieses Objektivs zusammen mit derjenigen eines beugungsbegrenzten nicht abgedeckten Systems gleicher Blendenzahl. So erhalten wir eine Leistung vergleichbar mit der eines beugungsbegrenzten Systems, vermeiden aber die beiden Hauptnachteile eines katadioptrischen Systems, d. h. dass die zentrale Abdeckung sowohl die MTF im interessierenden Ortsfrequenzbereich reduziert als auch die Bestrahlungsstärke der Bildebene um einen Faktor gleich dem Verhältnis abgedeckte Fläche zu voller Öffnung vermindert.

Elektro-optisches System

Zur Bestimmung des zum Vergleich zu benutzenden elektro-optischen Systems verwenden wir nachfolgende Gleichung:

$$\text{SNR} = \frac{\cos^4 \alpha}{4N^2 \cdot (\text{NEH})} \cdot (E_G \cdot \Delta p \cdot \tau_A \cdot \tau_0) \cdot R \cdot t \cdot (\text{MTF}_S(v)). \quad (3)$$

wobei

N = Blendenzahl (3,5)
NEH = rauschäquivalente Belichtung (typisch 1,0 $\mu\text{J}/\text{m}^2$)

R = relative Spektralempfindlichkeit des Detektors (typisch 0,9) (relative spectral response)

t = Integrationszeit

$\text{MTF}_S(v)$ = Modulations-Übertragungsfunktion des Systems in Flugrichtung, wobei

$$\text{MTF}_S = \text{MTF}_{\text{Detektor}} \cdot \text{MTF}_{\text{Objektiv}} \cdot \text{MTF}_{\text{Bildunschärfe}} \quad (4)$$

α = Feldwinkel (im folgenden zu 0° angenommen)

τ_0 = Durchsichtigkeitsgrad des Systems

E_G und τ_A sind in Abb. 1 beschrieben

$\Delta p = 0,01$

Gleichung (3) wurde schon früher [1] für eine Projektstudie der ersten Stufe entwickelt und verwendet, wobei Landschaftsobjekte geringer Remissionswerte betrachtet wurden. In diesem Falle war die Verwendung einer konstanten NEH angebracht, weil CCD- oder Photodioden-Arrays, welche im integrierenden Betrieb arbeiten und auf Strahlung mit niedrigen Eingangs-Energiepegeln ansprechen, infolge der Signalverarbeitung auf ein und demselben Halbleitersubstrat einen im wesentlichen konstanten Rauschpegel haben. Der Wert dieses konstanten Rauschpegels, also die rauschäquivalente Belichtung (NEH) in Gleichung (3) wird hier zu $1 \mu\text{J}/\text{m}^2$ angenommen, was 736 Photonen auf einer Detektor-Elementfläche von $225 \mu\text{m}^2$ bei einer mittleren Wellenlänge von 650 nm entspricht. Die zum Hervorufen dieses Rauschpegels erforderli-

che Anzahl auftreffender Photonen entspricht dem Quadrat des Rauschpegels oder etwa $5,4 \cdot 10^5$ Photonen.

Wir können zeigen, dass Gleichung (3) bei einer Energie der Eingangsstrahlung von weniger als $565 \mu\text{J}/\text{m}^2$ oder $4,15 \cdot 10^5$ Photonen pro Detektor-Elementfläche einen Fehler von weniger als 25% ergibt. Das entspricht bei einer Integrationszeit von 1,24 ms einer Bestrahlungsstärke in der Bildebene von $0,456 \text{ W m}^{-2}$. Dieser Bereich umfasst sehr viele Anwendungsfälle, jedenfalls viele, welche bei der Fernerkundung der Erde häufig vorkommen, und entspricht beispielsweise Landschaftsobjekten mit Remissionen unterhalb 0,35, die durch eine klare Atmosphäre abgebildet werden (im Falle von $V = 30 \text{ km}$ in Abb. 1).

Zur Bestimmung genauer Resultate für hohe Energien der Eingangsstrahlung müssen wir den Faktor NEH in Gleichung (3) ersetzen durch die Quadratwurzel aus der Summe von $5,4 \cdot 10^5$ und der Anzahl Photonen, die während der Integrationszeit auf die Detektor-Elementfläche auftreffen. Diese Korrektur wurde bei allen SNR-Berechnungen für Festkörper-Arrays angebracht und wird später noch im Zusammenhang mit den resultierenden SNR-Kurven besprochen.

Die MTF des Systems (Gleichung (4)) ist das Produkt der MTF des Detektors, des Objektivs und bezüglich Bewegungsunschärfe (d. h. bezüglich der während der Integrationszeit erfolgenden Bildverschiebung). Wir haben bei der Spezifikation von $\text{MTF}_{\text{Detektor}}$ ein quadratisches Detektorelement der Seitenlänge $15 \mu\text{m}$ gewählt. Als $\text{MTF}_{\text{Objektiv}}$ wurde jene des apochromatischen Petzval-Objektivs von Itek angenommen. Wir können nun untersuchen, wie

eine Änderung der MTF_Bildunschärfe die Integrationszeit, die Brennweite und den SNR beeinflusst.

Zunächst wird eine Kurvenfamilie von MTFs (v) für verschiedene Grade der Bildunschärfe gezeichnet (Abb. 2). Wir können dann die Brennweite bestimmen, die für jeden Bewegungsunschärfe-grad zur Erzielung eines EIFOV von 30 m nötig ist. Für den Grenzfall der Bewegungsunschärfe Null, die natürlich der Integrationszeit Null entspricht, beträgt die Brennweite 0,89 m. Mit wachsender Bewegungsunschärfe wächst die Integrationszeit und auch die zur Erhaltung des gleichen EIFOV benötigte Brennweite. Aus Gleichung (3) sehen wir auch, dass bei konstant angenommener MTFs (v) der SNR zur Integrationszeit t direkt proportional ist.

Kurve	Bewegungs- unschärfe*	Erford. Brennweite (m)	K (SNR)
1	0.00	0.89	0.00
2	0.25	0.91	0.44
3	0.50	0.95	0.62
4	0.75	1.05	0.79
5	1.00	1.18	1.00
6	1.25	1.33	1.11
7	1.50	1.48	1.20

* als Verhältnis der Unschärfe zur Detektor-Elementgrösse.

In der Praxis kann jede aus einer Reihe von Bedingungen eines Raumfluges die Wahl eines optimalen Systems bestimmen. Für den gegenwärtigen Zweck wählen wir jedoch ein Kriterium, welches den Konstrukteur in gewissem Massse anspricht: Aus einer Familie von Systemen, die mit gleichem EIFOV, Bildfeld, Wellenlängenintervall und mit gleicher Blendenzahl arbeiten, wird jenes als optimal ausgewählt, welches den maximalen Wert des Verhältnisses von SNR zu Systemgrösse ergibt. Zur Bestimmung des gemäss diesem Kriterium optimalen Systems haben wir angenommen, dass für Systeme mit gleicher Blendenzahl und gleichem Bildfeld die Systemgrösse in erster Näherung proportional zu F^3 ist (wobei F die Brennweite bedeutet). Trägt man das genannte Verhältnis über der Bewegungsunschärfe und Integrationszeit auf, so findet man [1], dass das optimale f/3,5-System eine Brennweite von 0,95 m und eine Integrationszeit von 1,24 ms hat.

Photographisches System

Das auszuwählende photographische System hat die gleiche Blendenzahl und Brennweite wie das elektro-optische System. Zur Bestimmung des Aufbaus des Systems, das zum Vergleich benutzt werden soll, verwenden wir die folgende Gleichung:

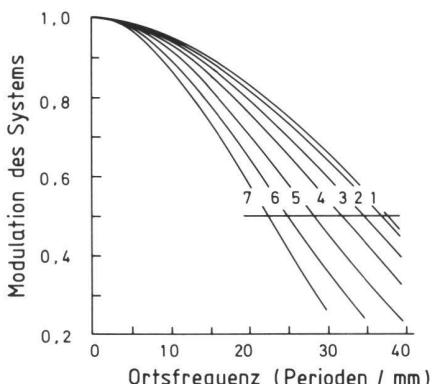


Abb. 2 Familie von MTF-Kurven für ein elektro-optisches System bei unterschiedlichen Werten der Bewegungsunschärfe in Flugrichtung. Unten aufgeführt sind neben den Bewegungsunschärfe-Werten die für ein EIFOV des Systems von 30 m erforderliche Brennweite sowie eine dem SNR eines Systems mit fester Blendenzahl f ($N=3,5$) proportionale Zahl.

$$SNR = \frac{\gamma \cdot [I/\sigma(D_{48})] \cdot (\Delta p/p) \cdot 10^{-2}}{1 + n L_s / (E_g p t_A)} \cdot MTF_S(v),$$

wobei (5)

- γ = Steigung des linearen Teils der Film-Schwärzungskurve
- I = Seitenlänge der quadratischen Abtastapertur des Mikrodensitometers = $42.5/\sigma(D_1)$, wobei $\sigma(D_1)$ = mittlere quadratische (RMS) Körnigkeit eines Filmes, der mit dem Mikrodensitometer mit einer Abtastapertur der Seitenlänge I abgetastet wird
- $\sigma(D_{48})$ = mittlere quadratische (RMS) Diffuskörnigkeit (diffuse granularity) eines Films der mittleren Dichte Eins, der mit einer kreisförmigen Apertur vom Durchmesser $48\text{ }\mu\text{m}$ abgetastet wird (die Betriebsbedingungen, für die Eastman Kodak Körnigkeitsdaten veröffentlicht)
- p = mittlere Hintergrundremission des Bodens
- L_s = aufsteigende spezifische Lichtausstrahlung (radiance) des Weges in der Atmosphäre
- $MTF_S(v)$ = Modulations-Übertragungsfunktion des Systems, wobei
- $MTF_S = MTF_{\text{Objektiv}} \cdot MTF_{\text{Film}} \cdot MTF_{\text{Mikrodensitometer}}$ (6)

Es ist bemerkenswert, dass infolge der logarithmischen Natur der Empfindlichkeit von photographischem Film der mittlere Grad der Hintergrundremission p in Gleichung (5) eingeht, in Gleichung (3) hingegen nicht. Im photographischen Fall können wir auch zeigen, dass die Wirkung des Photonenrauschens vernachlässigbar ist.

Im photographischen Fall nehmen wir an, dass die Bewegungsunschärfe innerhalb des interessierenden Ortsfrequenzbereiches vernachlässigbar ist, weil man eine Kompensationsvorrichtung für die Vorwärtsbewegung anwenden kann, um die Relativbewegung zwischen Bild und Film während der Belichtungszeit auf $1\text{ }\mu\text{m}$ oder weniger zu beschränken.

Wir verwenden den Eastman Kodak <High Definition Aerial Film, type 3414> [15] und das gleiche apochromatische f/3,5 Petzval-Objektiv wie im elektrooptischen Fall. Wir wollen annehmen, der Film werde nach der Entwicklung mit einem Mikrodensitometer abgetastet, um mit einem gewissen Rauschabstand (SNR) eine minimale Dichte-Differenz ΔD zu ermitteln, die einer Differenz Δp der Bodenremission entspricht.

Wir können diese Daten für Objektiv, Film und Apertur des Mikrodensitometers einsetzen und erhalten die Kurven 1 bis 5 in Abb. 3. Man beachte, dass bei Anwachsen der Seitenlänge der quadratischen Abtastapertur von $1,6\text{ }\mu\text{m}$ auf $48\text{ }\mu\text{m}$ die für ein EIFOV von 30 m erforderliche Brennweite von $0,32\text{ m}$ auf $2,4\text{ m}$ wächst.

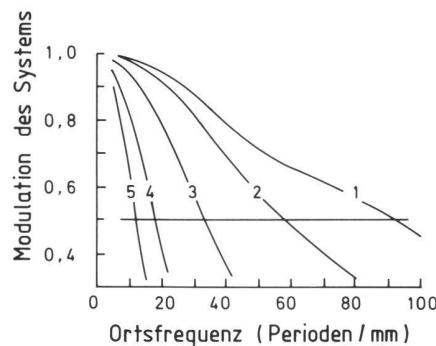


Abb. 3 Familie von MTF-Kurven für ein photographisches System bei unterschiedlichen Werten für die quadratische Abtastapertur und für die für ein EIFOV des Systems von 30 m erforderliche Brennweite.

Qualitätsvergleich bei der digitalen Abbildung

Bodenobjekte mit sehr kleinem Δp

Diejenigen Benutzer von Fernerkundungsdaten, die diese für die Erforschung von Bodengütern verwenden, stellen an die Fernerkundungsgeräte andere Anforderungen als jene, die die Daten für die Kartographie und die Landeskundung benötigen. In bezug auf die vorliegende Untersuchung liegt der Unterschied hauptsächlich in den hohen Ansprüchen an die Empfindlichkeit bei der Wahrnehmung und Messung von Bodenremissionsdifferenzen Δp sowie in sehr bescheidenen Anforderungen an die Detailauflösung am Boden. Der Grund hierfür liegt darin, dass die für den Bodenforscher interessanten Merkmale im allgemeinen keine charakteristischen Formen haben, in vielen Fällen aber charakteristische spektrale Remissionen.

Anforderungen an die Empfindlichkeit für Remissionsdifferenzen Δp sind bis $0,0005$ herab spezifiziert worden [7]. Es wurde jedoch die Meinung vertreten [16], dass unkorrigierbare Effekte von Variationen der Atmosphäre und an den interessierenden Merkmalen natürlicherweise auftretende Veränderungen in der Praxis sehr wohl eine untere Grenze von $\Delta p = 0,01$ setzen können. Unter Berücksichtigung dieses Wertes sind zum Vergleich einer Kamera mit Festkörper-Array und einer photographischen Kamera unter den in Tabelle 1 angegebenen Bedingungen einige Berechnungen durchgeführt worden [1], wobei jedoch Bestrahlungsstärke und atmosphärische Bedingungen etwas anders waren, als weiter unten angenommen. Es wurde gezeigt, dass beide Systeme mit gleichem EIFOV und gleicher Brennweite eine Remissionsdifferenz Δp von $0,01$ bei einem SNR von 4 und einer Hintergrundremission p von $0,05$ wahrnehmen können. Wir können zeigen, dass im Falle der Festkörper-Array-Kamera für p -Werte oberhalb

etwa $0,6$ der SNR auf 3 absinkt, dass aber der gleiche SNR-Abfall bei der Filmkamera schon bei p -Werten oberhalb etwa $0,07$ erfolgt. In diesem Sinne ist der Dynamikumfang beim photographischen System ausgesprochen niedriger als beim System mit Festkörper-Array, so dass das letztere zur digitalen Abbildung mit hohem SNR innerhalb des bei der Erd-Photographie anzutreffenden weiten Bereiches der Hintergrundremission bevorzugt wird.

Kurve	Apertur-Seite I (μm)	Erforderl. Brennweite (m)
1	1,6	0,32
2	7	0,52
3	16	1,0
4	32	1,7
5	48	2,4

Eine andere Möglichkeit zum Vergleich der digitalen Abbildung der beiden Systeme liegt in der Betrachtung des Verhältnisses $SNR/\Delta p$ als Funktion der (meteorologischen) Sichtweite, wie in Abb. 4 gezeigt.

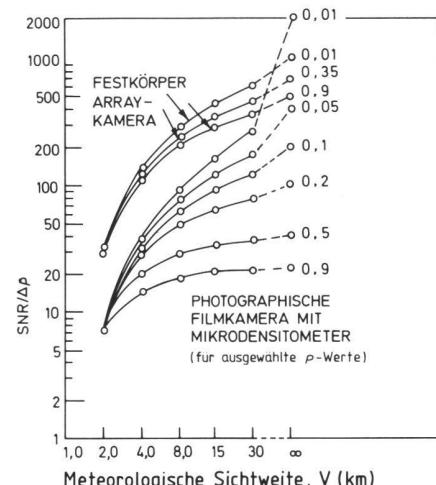


Abb. 4 Darstellungen von $SNR/\Delta p$ über der meteorologischen Sichtweite für eine Festkörper-Array-Kamera und für eine photographische Filmkamera mit Mikrodensitometer. Beachte: Den SNR erhält man durch Multiplikation des Ordinantenwertes mit dem entsprechenden Δp (siehe Text).

In dieser und in nachfolgenden Untersuchungen digitaler Systeme wurde die Abtastapertur des im Film-System verwendeten Mikrodensitometers so gewählt, dass sich für die Filmkamera und für die Festkörper-Array-Kamera das gleiche EIFOV und die gleiche Brennweite ergibt. Die drei Kurven von $SNR/\Delta p$ über V für die Abbildung mit der Festkörper-Array-Kamera zeigen die geringe Abhängigkeit von p bei der Festkörper-Array-Kamera gegenüber

der Filmkamera. Für das System Filmkamera-Mikrodensitometer ist eine Kurvenfamilie für Hintergrundremissionen zwischen 0,01 und 0,9 aufgetragen. Aus Abb. 4 sehen wir, dass die Festkörper-Array-Kamera für jeden Wert der Hintergrundremission und für endliche meteorologische Sichtweite mit einem höheren SNR/ Δp arbeitet als das System Filmkamera-Mikrodensitometer. Lediglich für den Fall ohne Atmosphäre bei geringer Hintergrundremission ist die Situation umgekehrt.

Zur weiteren Erläuterung des Nutzens der Kurven in Abb. 4 seien eine typische Hintergrundremission von 0,1 und eine Grenz-Remissionsdifferenz Δp von 0,01 angenommen. Für diesen Fall sieht man, dass das photographische System nur für sehr klare atmosphärische Bedingungen einen SNR grösser als 1 hat. Dagegen liefert die Festkörper-Array-Kamera schon für eine meteorologische Sichtweite von 4 km, also bei mittleren Dunstbedingungen, einen SNR grösser als 1.

Bodenobjekte mit hohem, mittlerem und geringem Kontrast

Einige wichtige Bodenobjekte haben im Vergleich zu ihrer Umgebung einen grossen Kontrast. Von besonderem Interesse sind kartographische Passpunktsignale am Boden und dreistreifige Zieltafeln. Die Passpunktsignale werden an Stellen ausgelegt, deren Positionen bei einer Vermessung am Boden genau bestimmt wurden; sie sind gewöhnlich aus grossen Streifen weissen Signaltuches zusammengesetzt. Aufstellbare dreistreifige Ziele mit hohem Kontrast haben Streifenremissionen von etwa 0,88 und eine Hintergrund-Remis-

Fall	Kontrastverhältnis am Boden		
	30:1	5:1	1,6:1
1a) meteorologische Sichtweite 30 km	1,8	3,1	4,0
1b) meteorologische Sichtweite 2 km	4,2	4,3	4,3
2a) Festkörper-Array-Kamera	12	15	17
2b) Filmkamera	26	22	18
im Fall 1 ist angegeben	SNR der Festkörper-Array-Kamera		
	SNR der Filmkamera		
im Fall 2 ist angegeben	SNR bei meteorologischer Sichtweite 30 km		
	SNR bei meteorologischer Sichtweite 2 km		

Tabelle 2 Zusammenfassung von Resultaten

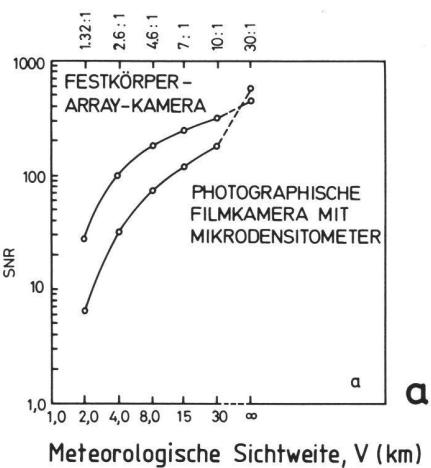
sion von 0,03. Diese hohen Werte des Kontrastverhältnisses ergeben einen hohen Wert für die Auflösungsgrenze des Gesamtsystems unter Flugbedingungen, und dies wiederum liefert eine grössere Sicherheit für die Leistungsbestimmung beim System in Betrieb. Die meisten für die Erkundung künstlicher Merkmale interessanten Bodenobjekte haben geringe Kontrastverhältnisse, typische Werte sind 5:1 und 1,6:1. Die Remissionswerte der Streifen sowie des Hintergrundes von typischen dreistreifigen Zielen mit solchen Kontrastverhältnissen sind in den Abbildungen 5 angegeben.

Die Figuren 5a, 5b und 5c sind Darstellungen des SNR über der meteorologischen Sichtweite bei der digitalen Abbildung mit einer Festkörper-Array-Kamera und mit einem System photographische Filmkamera-Mikrodensitometer für die angegebenen hohen, mittleren und niedrigen Kontrastverhältnisse. Die oberen Abszissenwerte geben die durch atmosphärische Einwirkung verminderten Bodenkontrastverhältnisse.

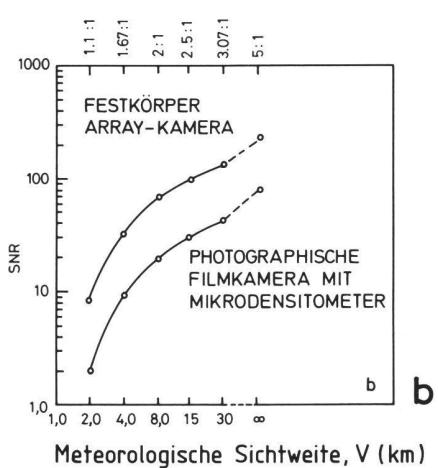
Die in Abb. 5 gezeigten Resultate sind für meteorologische Sichtweiten von 30 km und von 2 km in Tabelle 2 zusammengefasst.

Einige Punkte sind erwähnenswert. Zunächst ist bei guten Sichtverhältnissen die Leistung (SNR) der Festkörper-Array-Kamera gegenüber derjenigen der Filmkamera umso besser, je mehr der Kontrast des Bodenzieles abnimmt. Bei schlechter Sicht bleibt das Leistungsverhältnis bei Änderung im Bodenkontrast konstant. Der Wert dieses Verhältnisses ist jedoch hier grösser als bei guten Sichtverhältnissen; das bedeutet, dass der Vorzug der Festkörper-Array-Kamera bei abnehmenden Sichtverhältnissen immer grösser wird. Das Verhältnis der SNR für gute und schlechte Sicht (Fall 2) ist bei der Festkörper-Array-Kamera eine Funktion des Kontrastes des Bodenzieles. Dieses Verhältnis wäre kontrastunabhängig, wenn das Photonenrauschen im Vergleich zur NEH immer vernachlässigbar wäre. Das Photonenrauschen wird jedoch eine immer bedeutendere Grösse, wenn das Kontrastverhältnis zunimmt;

Kontrastverhältnis in der Eintrittspupille



Kontrastverhältnis in der Eintrittspupille



Kontrastverhältnis in der Eintrittspupille

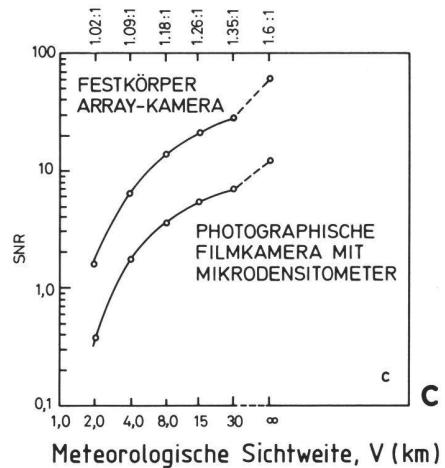


Abb. 5 SNR als Funktion der meteorologischen Sichtweite für eine Festkörper-Array-Kamera und eine Filmkamera mit Mikrodensitometer, bei dem die Abtastapertur so gewählt ist, dass EFOV und Brennweite für die digitale Abbildung in den drei Fällen gleich sind. Der Zenitwinkel der Sonne beträgt 40°.

- a) Fall mit hohem Kontrast: Bodenobjekt-Remission von 0,88 gegen eine Hintergrund-Remission von 0,03 ergibt einen Kontrast von 30:1.
- b) Fall mit mittlerem Kontrast: Bodenobjekt-Remission von 0,35 gegen eine Hintergrund-Remission von 0,07 ergibt einen Kontrast von 5:1.
- c) Fall mit geringem Kontrast: Bodenobjekt-Remission von 0,144 gegen eine Hintergrund-Remission von 0,09 ergibt einen Kontrast von 1,6:1.

dadurch fällt das Verhältnis der SNR von 17 bei Kontrast 1,6:1 auf 12 bei Kontrast 30:1. Bei der Filmkamera nimmt das Verhältnis der SNR für die beiden Sichtweiten jedoch mit abnehmendem Kontrast ab. Es ist auch zu bemerken, dass dieses Verhältnis für die Filmkamera stets höher ist als für die Festkörper-Array-Kamera. Aus den letzten beiden Resultaten geht also hervor, dass die Filmkamera sowohl gegenüber Änderungen im Bodenkontrast als auch in den Sichtverhältnissen empfindlicher ist.

Qualitätsvergleich bei der analogen Abbildung

Zum Vergleich der analogen Abbildung benutzen wir das photographische System nicht mehr mit einem Mikrodensitometer, und für die Festkörper-Array-Kamera sehen wir einen verlustlosen Digital-Analog-Wandler vor, der auf einem Bildschirm oder auf einem Film ein sichtbares Bild erzeugt. Die Abbildung der beiden Systeme soll dann mit dem Auge bei entsprechender Vergrößerung geprüft werden.

Wir verwenden die Schwellmodulationskurve für Film vom Typ 3414, wie sie Lauroesch et al. [17] angeben. Die Ortsfrequenz, bei der die Schwellmodulationskurve die auf die Objektmodulation in der Eintrittspupille bezogene MTF-Kurve des Systems schneidet, ist die visuelle Dreistreifen-Auflösungsgrenze des photographischen Systems (Slater [18]). Diese Auflösungswerte sind in Abb. 6 für die zwei oben besprochenen Bodenkontraste 5:1 und 1,6:1 dargestellt.

Zwei Dinge sind sofort klar: Zum einen ergibt die Kurve zum 5:1-Kontrast bei meteorologischen Sichtweiten zwischen 2 und 30 km Bodenauflösungen zwischen etwa 3,5 und 10 m/Periode, Bodenobjekte mit Kontrast 1,6:1 hingegen können, wie die entsprechende Kurve zeigt, durch eine der Sichtweite 2 km entsprechende Atmosphäre hindurch überhaupt nicht mehr aufgelöst werden. Zum anderen ändert sich die Auflösung bei Sichtweiten zwischen 4 und 30 km nur etwa um einen Faktor 2 im Vergleich zu den viel grösseren Änderungen des SNR gemäss Abb. 5a, 5b und 5c.

Bei Betrachtung der digitalen Abbildung mit den beiden Systemen verwendeten wir als Kriterium das EIFOV. Bei der Bestimmung der visuellen Auflösungsgrenzen der Abbildung bei der Filmkamera haben wir diese Betrachtung verlassen; dies wird auch bei der Untersuchung der MTF-Werte 0,2 und 0,1 sowie des EIFOV-Wertes 0,5 beim Festkörper-Array-System so sein. Diese Werte entsprechen jeweils SNR/ Δp -Werten von 1050, 420 und 210. Für jede der drei oberen Kurven in Abb. 6 gilt ein

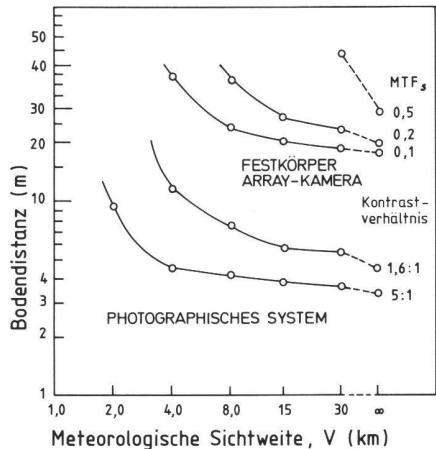


Abb. 6 Am Boden aufgelöste Distanz als Funktion der meteorologischen Sichtweite, für das photographische System gemäss Definition der Schwellmodulation des Filmes für zwei Kontrastverhältnisse am Boden; für die Festkörper-Array-Kamera gleicher Größe, wie die Filmkamera gemäss Definition durch drei System-MTF-Werte bei konstantem SNR/ Δp .

anderer Wert der MTF_s und des SNR/ Δp , jedoch sind diese Größen für jede Kurve konstant. Es ist zu bedenken, dass bei der Berechnung der Kurven das Photonenrauschen vernachlässigt wurde. Für hohe Eingangspegel der Strahlungsenergie bleiben daher Form und Lage der Kurven nur dann erhalten, wenn man die obigen SNR/ Δp -Werte entsprechend reduziert. Für die Festkörper-Array-Kamera mit Analog-Datenausgabe beträgt die beste Auflösung 19 m/Periode bei 30 km meteorologischer Sichtweite entsprechend einer System-MTF von 0,1. Eine früher [1] aufgestellte Regel – dass die Analog-Auflösung des Film-Systems etwa dreimal grösser ist als diejenige des Festkörper-Array-Systems – erweist sich als zutreffend für den Sichtweitebereich 2 bis 30 km. Tatsächlich sehen wir, dass dies der Minimalwert ist und dass bei anderen Bedingungen, z. B. bei höherem Kontrast oder bei Verwendung eines Wertes 0,5 beim MTF-Kriterium für das Festkörper-Array-System, das Verhältnis viel grösser sein kann. Die wesentliche Schlussfolgerung aus diesem Vergleich ist, dass es bei der Wahl eines Systems für die Fernerkundung auf den Verwendungszweck ankommt. Bei zwei Systemen gleicher Größe bevorzugen wir zur visuellen Untersuchung des Bildes für kartographische und Vermessungszwecke ein Film-System. Zur digitalen Informationsgewinnung, Objektklassifikation in der Landschaft und für radiometrische Zwecke ziehen wir die Festkörper-Array-Kamera vor, weil der SNR bei der digitalen Abbildung grösser ist als bei der digitalisierten Filmabbildung.

Schliesslich wollen wir betonen, dass die Ergebnisse dieser Untersuchung nur für die spezifizierten Bedingungen zutreffen. So haben wir die für diese Verwendung passenden gegenwärtig erhältlichen Filme und Festkörper-Array-Detektoren höchster Leistung gewählt. Eine andere Wahl hätte zu vollständig anderen vergleichbaren SNR-Kurven geführt. Weiterhin haben wir viele Umstände nicht berücksichtigt, die nur in einer konkreten Untersuchung angemessen behandelt werden können. Eine unvollständige Aufzählung solcher Faktoren umfasst: Die Auswirkungen verzerrender Fremdanteile auf die Abbildung; Untersuchung des Power-Spektrums im Objektiv; Einschränkungen infolge Quantisierung des erfassten Signalpegels; die Wirkung von über die Empfangsfläche eines Festkörper-Array-Detektorelementes ungleichförmiger Empfindlichkeit; Rauschen und sonstige bei der Wandlung des Digitalbildes in ein Filmbild und umgekehrt eingeführte Qualitätsverminderung.

Literatur

- [1] P.N. Slater: Use of MTF in the Specification and First-Order Design of Electro-Optical and Photographic Imaging and Radiometric Systems, Optica Acta 22; 277–290 (1975).
- [2] O.H. Schade: A New System of Measuring and Specifying Image Definition, pp. 231–249 in Optical Image Evaluation, National Bureau of Standards Circular 526, U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C. 20402, 1954.
- [3] O.H. Schade: An Evaluation of Photographic Image Quality and Resolving Power, J. Soc. Motion Picture Television Engrs. 73; 81–119 (1964).
- [4] O.H. Schade: Hight-Resolution Return-Beam Vidicon Cameras: A Comparison with High-Resolution Photography, J. Soc. Motion Picture Television Engrs. 79; 694–705 (1970).
- [5] Albert Rose: A Unified Approach to the Performance of Photographic Film, Television Pickup Tubes, and the Human Eye, J. Soc. Motion Picture Television Engrs. 47; 273–294 (1946).
- [6] R.C. Jones: Quantum Efficiency of Detectors for Visible and Infrared Radiation, pp. 87–183 in Advances in Electronics and Electron Physics, Vol. 11, L.Marton, ed., Academic Press, New York, 1959.
- [7] NASA: Advanced Scanners and Imaging Systems for Earth Observations, NASA SP-335, Superintendent of Documents, U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C. 20402, 1973.
- [8] L. Elterman: Vertical-Attenuation Model with Eight Surface Meteorological Ranges 2 to 13 km, Air Force Cambridge Research Laboratory Rept. 70-0200, 1970.
- [9] R.L. Hulstrom: Spectral Measurements and Analyses of Atmospheric Effects on Remote Sensor Data, Proc. SPIE, Vol. 51, Scanners and Imagery Systems for Earth Observation, 1975.
- [10] J.F. Potter: Haze and Sun Angle Effects on Automatic Classification of Satellite Data-Simulation and Correction, Proc. SPIE, Vol.

- [51] Scanners and Imagery Systems for Earth Observation, 1975.
- [11] R.E. Turner, W.A. Malila, R.R. Nalepka, and F.J. Thomson: Influence of the Atmosphere on Remotely Sensed Data, Proc. SPIE, Vol. 51, Scanners and Imagery Systems for Earth Observation, 1975.
- [12] R.H. Rogers and K. Peacock: A Technique for correcting ERTS Data for Solar and Atmospheric Effects, Symposium on Significant Results of ERTS-1, NASA SP-327, 1973.
- [13] M.P. Thekaekara, R. Kruger, and C.H. Duncan: Solar Irradiance Measurements from a Research Aircraft, Appl. Opt. 8; 1713-1732 (1969).
- [14] Itek, Technical Report, Document WK 70-1, 1970.
- [15] Eastman Kodak Company, Aerial Data Kodak Publication No. M-73, Eastman Kodak Company, Rochester, New York, 1974.
- [16] P.N. Slater: Specifications for Photographic and Electro-Optical Remote Sensing Systems, Proc. SPIE 54; 95-103 (1975).
- [17] T.J. Lauroesch, G.G. Fulmer, J.R. Edinger, G.T. Keene, and T.F. Kerwick: Threshold Modulation Curves for Photographic Films, Appl. Opt. 9; 875-887 (1970).
- [18] P.N. Slater: Remote Sensing: Optics and Optical Systems, Addison-Wesley Publishing Co., Reading Mass. pp. 575 (1980).

Adresse des Verfassers:
Prof. P.N. Slater
Optical Sciences Center and Chairman,
Committee on Remote Sensing, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721

Landwirtschaft und Raumplanung

Einführung

U. Flury

Die Landwirtschaft setzt sich mit der Raumplanung auseinander und umgekehrt. Zahlreiche Informationsveranstaltungen berichten recht erschöpfend darüber. Wir sind mit im Spiel. Bei der Ausarbeitung von Entscheidungsgrundlagen im Büro und bei der Durchführung draussen. Hier werden ausgewählte Schlüsselfragen dargestellt und kommentiert. Die Berichterstattung wird fortgesetzt.

L'agronomie doit être confrontée à l'aménagement du territoire et vice versa. Le sujet a été abondamment traité lors de nombreuses réunions. Nous y avons aussi contribué soit au bureau lors de l'établissement de bases de décision, soit sur le terrain lors des réalisations. Dans cet article nous présentons et commentons certaines questions fondamentales. L'information sera poursuivie.

Zum Problemkreis

Den vielen Fachveranstaltungen nach zu schliessen scheint es, als ob sich das Thema *«Landwirtschaft und Raumplanung»* gegenwärtig einer besonderen Aktualität erfreue. Das erstaunt kaum, wenn man in Rechnung setzt, dass gemäss *Bundesgesetz über die Raumplanung (RPG)* die kantonalen Richtpläne (inkl. Landwirtschaftsgebiete) bis 1985 und die Nutzungspläne (inkl. Landwirtschaftszonen) bis 1988 erstellt bzw. revidiert und ergänzt sein wollen. Einen breiten Einstieg in die Materie hat in einem entsprechenden Weiterbildungskurs vom September 1982 der *Schweizerische Verband der Ingenieur-Agronomen und der Lebensmittel-Ingenieure (SVIAL)* gesucht. Dieser erstreckte sich von den Grundelementen der Raumplanung über den schweizerischen Ernährungsplan, die Ausscheidung und den Inhalt von Landwirtschaftszonen, die zugehörige Rechtssprechung bis hin zur politischen Mitverantwortung aller Kreise beim Vollzug. Analog dazu, aber in bescheidenem Umfang, hat sich im November 1982 die *Sektion Aargau, Basel-Stadt und -land, Solothurn des Schwe-*

zerischen Vereins für Vermessungs- und Kulturtechnik (SVVK) vorab mit den solothurnischen und aargauischen Landwirtschaftszonen beschäftigt. Recht herhaft ist im Oktober 1982 die *Schweizerische Vereinigung Industrie und Landwirtschaft (SVIL)* auf eine Beurteilung der Landwirtschaft innerhalb der Raumplanung *raus ganzheitlicher Sicht* eingetreten; nicht ohne wirtschaftliche Probleme und Probleme des Bodenrechts in längst fleissig planenden Stadt- und Landgemeinden zu signalisieren und dabei in Teilen eine etwas vernünftigere und weniger bürokratische Gangart vorzuschlagen. Auf dem Gebiet der Raumplanung, der Landwirtschaftspolitik und der Bodenordnung lag zudem eine weitere Veranstaltung unter dem Titel *(Güterzusammenlegung und Pachtland)*. Sie wurde durch die *Fachgruppe der Kultur- und Vermessingenieure des Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Vereins (SIA-FKV)* ebenfalls im Oktober 1982 durchgeführt und versuchte, Lösungswege in der Landumlegungsfrage, besonders in der Frage der Eigentums- und Pachtumlegung bei Landwirtschaftsland zu signalisieren. In ei-

nen ähnlichen Umkreis wäre durchaus auch die *«Besteuerung in der Landwirtschaft»* einzureihen, welche die *Schweizerische Gesellschaft für Agrarrecht* anlässlich ihrer Jahresversammlung vom November 1983 abhandelte. In diesem Zusammenhang trat das dringende Bedürfnis einer Koordination zwischen Raumplanungsrecht, bäuerlichem Bodenrecht und Steuerrecht in der zugehörigen Praxis erneut und mit aller Deutlichkeit zutage.

Der Überblick wäre zu unvollständig, wenn nicht noch auf das mottende oder knisternde Thema *«Kulturtechnik/Meliorationen im Spannungsfeld der Raumplanung, der Landschaftsökologie und des Natur-, Heimat- und Umweltschutzes»* hingewiesen würde. Hier hat das *Kulturtechnische Kolloquium der ETH Zürich* im Januar und Februar 1983 eine Brücke zwischen scheinbar grauer Theorie und scheinbar handgreiflicher Praxis geschlagen. Eher einen Steg einstweilen, der, so meine ich, ausgebaut werden kann und verstärkt werden soll.

Vor uns steht, neben vielen anderen kantonalen, regionalen und lokalen Treffen, eine abrundende Informationsveranstaltung unter bundesrälicher Mitwirkung der *Schweizerischen Vereinigung für Landesplanung (VLP)* vom November 1983. Sie beleuchtet *«die Landwirtschaft, ihren Boden und die Raumplanung»* aus der dazu notwendigen umfassenden Sicht. Wir empfehlen die Orientierung, welche wiederum eng mit unserer Berufstätigkeit zusammenhängt.

Über die Resultate der gezeigten Veranstaltungen wird in dieser Zeitschrift in verschiedenen Formen und auszugsweise berichtet. Wir beginnen mit dem Thema: