

# Tele-Spektrometrie auch im Hinblick auf den Umweltschutz

Von S.H. Collins und A.G. Meiering \*)

DK 535:614.7

Die telespektrometrischen Untersuchungsmethoden gewinnen für die Gestaltung und Nutzung unserer Umwelt zunehmend an Bedeutung. Hingewiesen sei auf die Bestimmung der Immissionen in der Atmosphäre und in den Gewässern, die Steuerung von Beregnungs- und Bewässerungsmaßnahmen, den Pflanzenschutz und die Wettervorhersage. In dem Aufsatz werden die Methoden der Telespektrometrie und die Grenzen und Möglichkeiten in der Anwendung in einer Übersicht behandelt.

## 1. Einführung

Das "Remote Sensing" oder die telespektrometrische Erfassung der Atmosphäre und der Erdoberfläche hat in den letzten Jahren große Fortschritte zu verzeichnen. Man versteht darunter die sowohl mit Hilfe der Luft- als auch der Raumfahrt durchgeführten Abbildungsverfahren, die von der einfachen Schwarzweiß-Photographie über Radar bis zu den aktiven mit Laserlicht arbeitenden multispektralen Scanner reichen. Nicht eingeschlossen sind die auf geomagnetischen Prinzipien beruhenden Vermessungsverfahren.

## 2. Schwarzweiß-Photographie

Schwarzweiß-Filmkameras waren die ersten Geräte, die für die Erfassung der Erdoberfläche aus größerer Höhe in den dreißiger Jahren in Deutschland entwickelt wurden. Die heute am meisten verwendete Kamera hat ein Objektiv mit 152 mm Brennweite und 100° Bildwinkel. Das Magazin faßt 250 Negative von 23 x 23 cm Größe. Die Verzerrung beträgt weniger als 10 µm und das Auflösungsvermögen 1 bis 2 metrische Minuten. Allein das Objektiv kostet etwa 30 000,- DM. Ein vertikal aufgenommenes Photo aus 3000 m Höhe läßt Positions- und Höhenunterschiede von minimal 20 cm genau erkennen. Bei einem Auflösungsvermögen bis zu 0,05 mm und einer Skala von 50 meßbaren Grautönen enthält ein 23 x 23 cm<sup>2</sup> großes Schwarzweißphoto 10<sup>9</sup> Bits Informationen. Solche Aufnahmen ermöglichen eine sehr genaue Kartierung geologischer, biologischer und mit technischen Mitteln geschaffener Strukturen. Neben dieser topographischen Erfassung liefert die klassische Photogrammetrie jedoch nur sehr begrenzte qualitative Informationen über den Zustand der Luft, des Wassers und der Vegetation. Solche Informationen lassen sich mit der Farbphotographie, die mindestens das zehnfache Informationsvolumen besitzt, gewinnen.

## 3. Farb- und Infrarotphotographie

Natürliche Farbaufnahmen haben trotz ihres besseren Informationswertes keine besondere Bedeutung erlangt. Das ist zum Teil durch ihre Empfindlichkeit gegen unerwünschten Lichteinfall aus der höheren Atmosphäre – insbesondere im blauen Bereich – bedingt. Als Folge davon ergeben sich Unklarheiten im Grundbild.

\*) S. H. Collins ist Professor und A. G. Meiering Assistant-Professor an der University of Guelph, Guelph, Ontario.

Weitaus wertvollere Informationen liefert die Infrarotphotographie mit Schwarzweiß- oder Farbfilm. Gesunde Vegetation zum Beispiel reflektiert sehr stark im Infrarotbereich zwischen 0,8 und 2 µm Wellenlänge. Im sichtbaren roten Bereich zwischen 0,6 und 0,7 µm ist die Rückstrahlung dagegen schon sehr gering. Aus diesem Grunde werden falschfarbige Infrarotaufnahmen für Beurteilungen von Pflanzenbeständen benutzt. Nimmt der Zelldruck in den Pflanzen wegen Wassermangel oder Krankheit ab, vermindert sich im direkten Zusammenhang sehr deutlich die Reflektion der Infrarotstrahlung. Störungen im Wasserhaushalt lassen sich daher schon im Anfangsstadium mit Infrarot-Farbaufnahmen sichtbar machen, lange Zeit bevor das menschliche Auge sie wahrnehmen kann. Der Pflanzenschutz bedient sich daher weitgehend dieses Verfahrens.

Der falschfarbige Infrarotfilm hat drei Schichten. Sie reagieren auf infrarot, rot und grün anstelle von rot, grün und blau beim normalen Farbfilm. Das blaue Licht wird bei der Aufnahme herausgefiltert. Weil der Film auf ein anderes Farbspektrum reagiert als das menschliche Auge, sind die Aufnahmen "falschfarbig". So erscheint zum Beispiel eine gesunde grüne Pflanze in klarem rosa-rot. Bei einsetzendem Wassermangel verfärbt sie sich zu blau-grün. Wegen der hohen Filmempfindlichkeit können Konzentrationsunterschiede sehr intensiv wahrgenommen werden. Braune Erde erscheint grün und ein rotes Hausdach gelb.

Eine quantitative Messung reflektierten Lichtes in verschiedenen Wellenbereichen ist auch in der Schwarzweiß-Photographie möglich, indem mit verschiedenen Kameras dieselben Objekte gleichzeitig fotografiert werden. Die Filter sind dabei so ausgewählt, daß nur ein bestimmtes Teil des Spektrums wie etwa blaues oder rotes Licht durch die jeweiligen Objektive einfallen kann. Mit einem Scanner lassen sich die Photos trennen, auswerten und auf Magnetband speichern. Die gespeicherten Daten können dann leicht von elektronischen Rechenanlagen verarbeitet werden. Solche Verfahren benutzt man zum Beispiel für die Erlesung und Vermessung von Pflanzenbeständen. Weiterhin lassen sich damit Veränderungen in der Wasserqualität von Seen und Flüssen erkennen.

## 4. Multi-Spektral-Scanner

Eine noch differenziertere Auswertung des elektromagnetischen Spektrums erlaubt der Multi-Spektral-Scanner (MSS). Dieses Gerät besitzt einen transversal und rechtwinklig zur Flugbahn rotierenden Spiegel. Die Breite des von der Erde her darauf einfallenden Lichtstrahles wird durch Blenden bestimmt. Rotationsgeschwindigkeit und Fluggeschwindigkeit sind so aufeinander abgestimmt, daß in regelmäßiger Folge Streifen um Streifen des überflogenen Gebietes kontinuierlich erfaßt werden. Der vom Rotationspiegel einfallende Lichtstrahl wird mit Diffraktionsgittern, Prismen und dichroischen Spiegeln in verschiedene Wellenlängenbereiche aufgelöst. Die in den einzelnen Bereichen einfallende Strahlung wird dann über Sensoren und Verstärker in elektrische Signale umgewandelt, die auf Magnetband gespeichert werden.

Ein kontinuierliches Bild des überflogenen Gebietes läßt sich durch Eingabe der Bandsignale in ein Oszilloskop herstellen. An der University of Michigan wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem sich in mindestens zwölf Wellenbereichen sowohl jeweils getrennte Einzelbilder als auch Bilder beliebig kombinierter Wellenbereiche herstellen und für unterschiedliche Gebiete vergleichen

lassen. Die Meßgenauigkeit eines solchen Gerätes ist sehr hoch. Gleichzeitig erlaubt die Bandaufzeichnung eine umfassende und schnelle elektronisch gesteuerte Auswertung. Das Gerät kann Temperaturunterschiede von einem halben Grad Celsius feststellen. Seine Infrarotbereiche liegen zwischen 6 und 8  $\mu\text{m}$  und um 20  $\mu\text{m}$ . Diese Wellenlängen sind unempfindlich gegen Bewölkung und Luftfeuchtigkeit. Das Auflösungsvermögen ist gut im sichtbaren Bereich und ausreichend im Infrarotbereich. Wegen der unregelmäßigen Flugbahn eignet sich das Gerät kaum für den Flugzeugeinsatz.

## 5. Vidicon-Bildröhren

Mit Hilfe von Vidiconröhren können ebenfalls im Scanverfahren Bilder hergestellt werden, deren Empfindlichkeit den ultravioletten und infraroten Bereich umfaßt. Nach Umwandlung der Lichtsignale in elektrische Impulse lassen sich die Ergebnisse auf Magnetband speichern oder über Funk zu Bodenstationen übermitteln. Vom Fernsehbild der Bodenstation können dann Photokopien angefertigt werden. Das Fernsehbild ist je nach dem abgetasteten Lichtbereich falschfarbig oder naturgetreu. Sein Meßbereich überschreitet den der Photographie aber nur wenig, und sein Auflösungsvermögen ist sogar deutlich unterlegen. Außerdem ist eine direkte Bildübertragung für Planungszwecke von geringer Bedeutung. Anwendungsmöglichkeiten der Direktübertragung könnten sich in Zukunft auf dem Gebiet der Emissionsüberwachung ergeben.

## 6. Radar

Die bisher beschriebenen passiven Systeme haben keine eigenen Emittoren, sondern registrieren reflektierte oder vom Objekt selber erzeugte elektromagnetische Strahlung. Radar gehört zu den aktiven Systemen, die über einen Emittor in bestimmten Wellenbereichen ausstrahlen und dann die vom Objekt reflektierte Strahlung über Sensoren registrieren. Das Side Looking Airborne Radar — oder SLAR-Verfahren arbeitet mit zylindrischen Antennen, die in Richtung des Rumpfes an Bug und Heck des Flugzeuges montiert sind. Sie senden in bestimmten Zeitabständen Mikrowellen-Signale aus. Dabei befindet sich die Antennenachse nahezu parallel zur Erdoberfläche. Die von dort reflektierte Strahlung wird nach Umwandlung und Entzerrung der Signale auf einem rechteckigen Schirm sichtbar. Auf diese Weise erscheint der bis zu einigen hundert Kilometer breite, vom Fluggerät überflogene Geländestreifen als kontinuierliches Gleitbild, von dem an beliebigen Stellen Photokopien verfügbar sind. Bei Entfernungsberechnungen solchermaßen erfaßter Objekte spielt neben anderen Faktoren vor allem der ständig wechselnde Neigungswinkel des Flugzeuges eine Rolle.

Das Auflösungsvermögen des SLAR ist nicht sehr hoch. Dazu kommen Unterschiede in den Richtungen parallel und quer zur Flugbahn. Diese Nachteile werden kompensiert durch die Fähigkeit der Radarstrahlen, Dunst, Nebel und stärkste Wolkendecken und Vegetation durchdringen zu können. Dadurch ergeben sich Informationsmöglichkeiten auch für den Umweltschutz, die allerdings noch ausgiebiger Forschung bedürfen. Größere Erfahrungen auf verwandtem Gebiete wurden bei der Erforschung der Arktis gewonnen.

## 7. Laser

Die besten Aussichten für die Entwicklung von Meßgeräten mit hoher Empfindlichkeit für den Umweltschutz bietet die Lasertechnik. Luftverunreinigende Stoffe könnten experimentell mit dem Roman-Effekt nachgewiesen werden. Dieser Effekt besteht darin, daß von einem starken Laserstrahl getroffene Teilchen diffuses Licht veränderter Wellenlänge abstrahlen. Weitere spezifische Reaktionen sind Fluoreszenz und Absorption in sehr engen Bandbreiten. Umfangreiche Forschungsarbeiten sind notwendig, solche Effekte mit Lasern unterschiedlicher Wellenlänge bei verschiedenen Luft- und Wasserbelastungen zu analysieren. Mit solchen Ergebnissen lassen sich dann aktive, multispektrale Laser-Scanner

entwickeln, deren Wellenbereiche auf spezifische Immissionen abgestimmt sind. Sowohl Emittoren als auch Sensoren können synchron über quer zur Flugbahn rotierende Spiegel das überflogene Gebiet abtasten. Da Laserstrahlen nur einige Zentimeter pro Kilometer von ihrer gewählten Strahlungsrichtung abweichen, wäre die geometrische Genauigkeit solcher Scanner sehr hoch. Die von den Sensoren in den einzelnen Wellenbereichen aufgenommenen Daten lassen sich analog zu dem mit Tageslicht arbeitenden MSS-System speichern und auswerten.

## 8. Satelliten als Systemträger

Die Entwicklung der Raumfahrt, die auch der elektronischen Datenverarbeitung entscheidende Impulse gab, sprengte die durch die Luftfahrt gesetzten geometrischen Grenzen für die Aufnahmepositionen. Physiographische Regionen, sowie Atmosphäre und Stratosphäre lassen sich jetzt aus großer Höhe synoptisch registrieren und im Zusammenhang interpretieren. Ein Beispiel hierfür sind die täglich im Fernsehen gezeigten, von Satelliten aus aufgenommenen Wetterübersichten ganzer Kontinente. Generell werden in den kommerziell genutzten Satelliten bisher nur passive Systeme benutzt. Schwarzweiß- und Infrarotphotographie sowie MSS-Systeme sind am gebräuchlichsten. Aktive, mit Radar oder Lasern arbeitende Systeme kommen auf diesem Sektor bisher nicht zur Anwendung. Besonders im Umweltschutz bieten sie aber die besten Aussichten für wirksame Kontrollen. Um auf diesem Gebiete jedoch in Europa zu greifbaren Resultaten zu kommen, bedarf es größerer Aufwendungen und internationaler Zusammenarbeit.

Ein Beispiel solcher Zusammenarbeit zwischen den USA, Kanada und Brasilien ist das ERTS-Programm. Der dafür eingesetzte Satellit wurde am 27. Juli 1972 mit drei RBV-Kameras, einem MSS-System und den dazugehörigen Magnetbandgeräten, Empfängern und Transmittern an Bord in eine Erdumlaufbahn geschossen. Die Bahn ist synchron zur Sonne und bildet einen Winkel von  $80^\circ$  mit dem Äquator. Ein Erdumlauf dauert 105 Minuten. Die Position der Umlaufbahn kann als ein um die Erde gelegter Ring aufgefaßt werden, der im Verhältnis zur Sonne seine Position nicht ändert. Innerhalb dieses Ringes dreht sich die Erde. Die Richtung der auf die Erde einfallenden Sonnenstrahlen ändert sich also vom Satelliten aus gesehen nicht. Daher ist auch die Lokalzeit des Überfliegens für alle Punkte auf der Erde die gleiche, nämlich 10.30 Uhr. In der Zeit eines Umlaufes dreht sich die Erde um  $26^\circ 15'$  Längengrade, was etwa der Entfernung Amsterdam-Moskau entspricht. Das MSS-System erfaßt jeweils einen Streifen von 160 Kilometern Breite. Zu den Polen hin überdecken sich diese Streifen in zunehmendem Maße. Die Satellitenbahn verschiebt sich im Verhältnis zur Erdoberfläche leicht bei jedem Umlauf. In Abständen von 18 Tagen wiederholen sich die Bahnen. Bei dieser Frequenz kann wegen der starken Bewölkung in Europa mit einer Ausbeute von fünf klaren Grundbildern pro Jahr gerechnet werden. Zukünftige aktive Systeme können die Wolkendecken durchdringen und sind damit wetterunabhängig.

Empfängerstationen für diesen Satelliten bestehen bisher nur in den USA, Kanada und Brasilien. Die auf Band aufgezeichneten Daten über die gesamte Erdoberfläche können nur von der Sioux-Falls-Station in South Dakota abgerufen und ausgewertet werden. Sie stehen allen Nationen, soweit sie ihr eigenes Staatsgebiet betreffen, auf Abruf zur Verfügung. Kanada besitzt eine eigene Station in Prince Albert, Saskatchewan. Die dort empfangenen Daten werden an eine Computeranlage nach Ottawa weitergegeben. Hier erfolgt die Entzerrung und Kartographierung der Meßergebnisse.

Die Entwicklung des Remote Sensing fällt in eine Epoche des steil ansteigenden Bedarfs für Rohstoffe aller Art. Zur gleichen Zeit hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, daß nicht nur die energetischen Rohstoffreserven sondern auch der atmosphärische und aquatische Lebensraum einer sorgfältig geplanten Nutzung bedürfen. Wie das Weltmodell andeutet, würde fortgesetzter Raubbau zur Katastrophe führen. Moderne RS-Systeme können auf diesem Gebiete wertvolle Kontrollfunktionen übernehmen. Erst

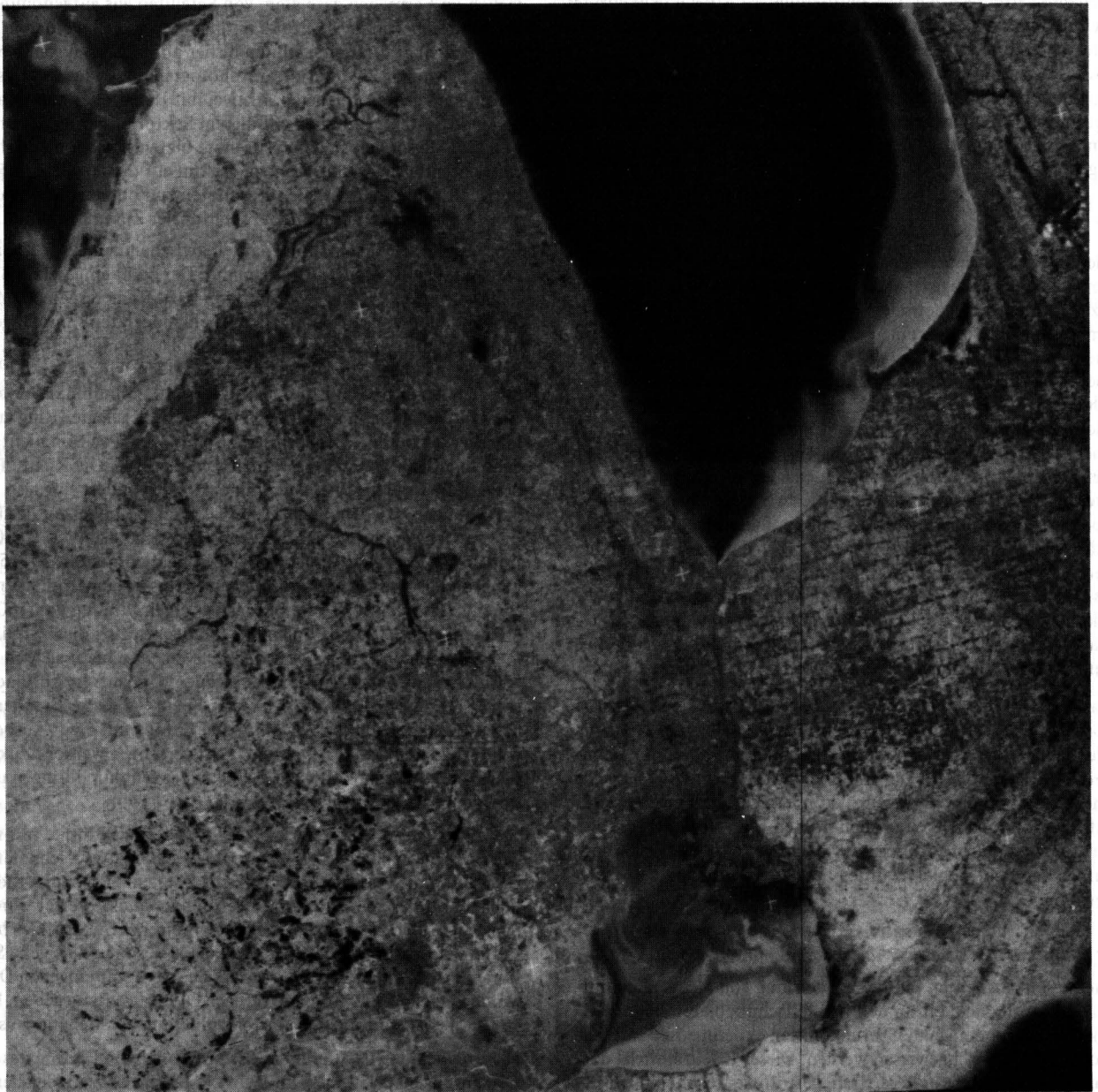


das von Satelliten aus in regelmäßiger Folge zu Bodenstationen übermittelte synoptische Bild ist in der Lage, die Einflüsse der Zivilisation auf die Umwelt in umfassender Weise direkt aufzuzeigen. Eine dauernde Satelliteninspektion kann wie kein anderes Instrumentarium den zeitlichen Ablauf solcher Prozesse gebietsweise und global erfassen; und ein Gebiet läßt sich weit besser beurteilen, wenn es im Zusammenhang gesehen wird.

Anwendungsbeispiele des RS lassen sich bereits in großer Zahl anführen. Bilder kontinentaler Großwetterlagen bei der Wettervorhersage im Fernsehen, Aufnahmen der mit den Jahreszeiten wandernden Schneegrenze, Übersichten von Flutgebieten und Vermessungsaufnahmen aller Art sind einige Beispiele. Von größerem Interesse für den Umweltschutz sind Informationen über landwirtschaftliche und industrielle Geländenutzung, sowie über die

Besiedlung. Die Einflüsse solcher Zivilisationsfaktoren zeigt das folgende mit einem MSS-System im Bereich der Großen Seen gewonnene **Bild 1**. Neben der Geländenutzung lassen sich besonders die Wasserverhältnisse im Huron-See und St. Clair-See erkennen. Die helleren Streifen an den Ost- bzw. Südostufen repräsentieren die mit Trübstoffen angereicherten Wassermassen. Die Fließmuster dieser Stoffe sind besonders im St. Clair-See zu erkennen.

Ähnliche Bilder über die Belastung des Wassers mit Abwärme der Industrie und Siedlungsgebiete können mit der Infrarot-technik hergestellt werden. Aktive MSS-Verfahren sind in der Lage, sowohl quantitative als auch qualitative Messungen von Immissionen in Luft und Wasser auszuführen. Weitere Forschungsarbeiten sind notwendig, um leistungsfähige und ökonomisch arbeitende Systeme zu entwickeln.



**Bild 1.** ERTS-Aufnahme im Bereich der Großen Seen. Das Bild wurde in einer Höhe von 500 nautischen Meilen im roten Wellenbereich aufgenommen. Es zeigt den südlichen Teil des Huron-Sees, den St. Clair-Fluß und den St. Clair-See. Das Landgebiet liegt teils im Staate Michigan und teils in der Provinz Ontario. Am Westufer des Huron-Sees ist ein Streifen aufgewirbelter Sedimentstoffe im Seewasser zu erkennen. Über den St. Clair-Fluß fließen die Trübstoffe in den St. Clair-See.