

# **KRIEG IM AETHER**

Vorlesungen an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich  
im Wintersemester 1989/1990

Leitung:

Bundesamt für Übermittlungstruppen

Divisionär J. Biedermann, Waffenchef der Übermittlungstruppen

## **Militärische Nutzung von Fernerkundungs- Satelliten**

Referent: Dr. Rolf Katzenbeisser

3-1

# MILITÄRISCHE NUTZUNG VON FERNERKUNDUNGS-SATELLITEN

R. Katzenbeisser, Dr.-Ing.

## INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung
2. Satelliten-Bahnen
  - 2.1 Grundlagen
  - 2.2 Wiederholraten
  - 2.3 Beobachtungsgebiet und -zeit
3. Sensoren
  - 3.1 Nutzbare Spektralbereiche
  - 3.2 Optische Sensoren
  - 3.3 Mikrowellen-Sensoren
4. Datenübertragung, Datenspeicherung
5. Digitale Verarbeitung
  - 5.1 Abtastung
  - 5.2 Bildverbesserung
  - 5.3 Multispektralauswertung
  - 5.4 Datenfusion
  - 5.5 SAR Datenauswertung
6. Anwendungsmöglichkeiten
7. Literatur

Adresse des Autors:

Dr. R. Katzenbeisser  
Dornier GmbH  
Postfach 1420

D-7990 Friedrichshafen

"Krieg im Aether", Folge XXIX, 1990

52162

3-2

1. EINLEITUNG

Der im Titel benutzte Begriff "Fernerkundung" hat für einen kleinen Personenkreis eine feste und enge Bedeutung, während er sicher für viele Zuhörer nur besagt, dass aus einer grösseren Entfernung etwas erkundet wird. In Verbindung mit Satelliten meint Fernerkundung die Beobachtung der Erde aus dem Weltraum vorwiegend mit bildgebenden Sensoren. Je nach Zielrichtung werden spezielle Begriffe benutzt wie etwa

- Meteorologische Satelliten
- Erderkundungs-Satelliten (Land und Meer)
- Aufklärungs-Satelliten.

Diese Satelliten unterscheiden sich in ihren Flugbahnen und den Sensoren hinsichtlich geometrischer Auflösung sowie benutzter Spektralkanäle oder Frequenzen.

Die grossräumige Aufklärung mit Höhenflugzeugen (z.B. U2) oder Satelliten (z.B. KOSMOS 4) war bisher eine Domäne der beiden Grossmächte. Die Entwicklung der zivilen Fernerkundungssatelliten (Landsat seit 1972 und SPOT seit 1986), deren Daten allen zur Verfügung stehen ("open sky policy"), hat zur weiteren Verbreitung dieser Technik geführt, besonders seit SPOT mit einer Auflösung von 10 m sehr detaillierte Bilder liefert.

Darüber hinaus hat der technologische Fortschritt zusammen mit dem Streben nach Eigenständigkeit und Blockfreiheit eine Reihe von Ländern veranlasst, eigene Beobachtungssatelliten zu entwickeln und bis heute teilweise auch zu betreiben. Nach gegenwärtigem Wissensstand sind dies, neben den USA und der UdSSR, Brasilien, China, Europa (ESA), Frankreich, Indien, Israel, Japan und Kanada.

Obwohl offiziell nur die zivile Nutzung angestrebt wird (ausser bei Israel, Ofek, und Frankreich, Helios), darf doch von einer mittelfristigen militärischen Zielsetzung ausgegangen werden. Dies trifft nicht auf die ESA zu, die durch ihren Gründungsvertrag auf zivile Programme beschränkt ist.

In welchem Umfang können nun die zivilen Fernerkundungs-Satelliten militärisch genutzt werden? Bevor diese Frage anhand einiger Beispiele beantwortet wird, soll auf einige spezifische Eigenschaften von geeigneten Satelliten eingegangen werden. Hierzu gehören die allen Satellitenbahnen zugrunde liegenden Kepler'schen Gesetze als auch die Ausbreitungsgesetze elektro-magnetischer und optischer Wellen.

Die Ausführungen der nächsten drei Abschnitte mögen als zu themenfremd empfunden werden. Jedoch hat die Erfahrung gezeigt, dass häufig falsche Vorstellungen über die Möglichkeiten der Aufklärung mittels Satelliten bestehen. Um es sehr salopp auszudrücken: ein Satellit kann nicht im Zick-Zack über unseren Globus huschen und ist nicht über ein Glasfaserbündel an die zentrale Auswertestation anzuschliessen.

2. SATELLITEN-BAHNEN

2.1 GRUNDLAGEN

Die hier infrage kommenden Satelliten haben alle sehr erdnahe Bahnen von elliptischer Form (Bild 1).



Bild 1 Bahngeometrie bei umlaufenden Satelliten

## 3-3

Dabei müssen zwei Bahnformen unterschieden werden:

- kreisnahe, meist um die Pole führende Bahnen mit möglichst konstantem Abstand zur Erdoberfläche zwischen etwa 500 km und 900 km,
- elliptische Bahnen mit möglichst geringem Abstand von der Erdoberfläche im Perigäum (zwischen 150 km und 250 km).

Für beide Bahnen gibt es gute Gründe. Die kreisnahe Bahn bietet eine weitgehend konstante Abbildungsgeometrie und vermeidet mit einer Bahnhöhe von über 500 km die hochreichenden bremsenden Ausläufer der Atmosphäre, die sich in sehr sonnenaktiven Jahren bis auf über 400 km Höhe ausdehnen. Je niedriger die mittlere Flughöhe ist, um so häufiger muss der Satellit durch einen Triebwerkschub auf seine nominelle Bahn angehoben werden, was bei begrenztem Treibstoffvorrat nicht beliebig oft geht. Satelliten mit diesen Bahnen sind meist auf eine Lebensdauer von drei Jahren ausgelegt.

Die sehr niedrige Bahnhöhe (zumindest im Beobachtungsgebiet) bietet durch den geringeren Abstand zum Objekt eine bessere geometrische Auflösung. Dabei muss allerdings in Kauf genommen werden, dass Satelliten auf solch niedrigen Bahnen meist nur eine Lebensdauer von einigen Wochen haben. Die UdSSR hat allein im Zeitraum August 1988 bis August 1989 26 solcher Satelliten gestartet.

Im weiteren werden nur die bei heutigen zivilen Fernerkundungs-Satelliten üblichen kreisnahen Bahnen betrachtet.

## 2.2 WIEDERHOLRATEN

Ein wesentlicher Aspekt für jeden Beobachtungs-Satelliten ist, wie häufig er ein und dasselbe Gebiet beobachten kann. Bei den hier betrachteten kreisnahen Bahnen kann vereinfachend von folgenden Bedingungen ausgegangen werden:

- Bahnhöhe 400 km - 900 km
- Geschwindigkeit auf der Bahn 7,4 km/sec - 7,67 km/sec
- Geschwindigkeit über Grund 6,7 km/sec - 7,2 km/sec
- die Orientierung der Satellitenbahn ist im Weltraum fest, d.h. die Normale der Satellitenbahn zeigt immer auf das gleiche Sternbild.

Um im weiteren nicht alle möglichen Wertekombinationen betrachten zu müssen, sei (ohne Verletzung der Allgemeinheit) als mittlere Bahnhöhe 650 km und als mittlere Geschwindigkeit über Grund 6,84 km/sec angenommen.

Bei einem mittleren Bahnradius von 7.020 km ergibt sich damit eine Umlaufdauer (zwischen zwei gleichgerichteten Äquatorübergängen) von 97,5 Min. In dieser Zeit hat sich die Erde um 24,4° weitergedreht. Dies bedeutet, dass zeitlich aufeinanderfolgende Bahnen (Fusspunkte oder Bahnprojektion auf die Erdoberfläche) am Äquator einen Abstand von 2.708 km haben.

Bei einer Umlaufzeit von 97,5 Min bewältigt dieser Satellit an einem Tag 14 10/13 Umläufe oder in 13 Tagen genau 192 Umläufe. Beim 193ten Umlauf befindet er sich wieder genau über den Punkten der Erde wie beim ersten Umlauf. Er hat also eine Wiederholrate von 13 Tagen bei einem Abstand benachbarter Bahnen am Äquator von etwa 208 km und bei 45° Nord von etwa 148 km. Bild 2 zeigt beispielhaft die ersten vier Umläufe eines Satelliten nach dem Start von Kourou.

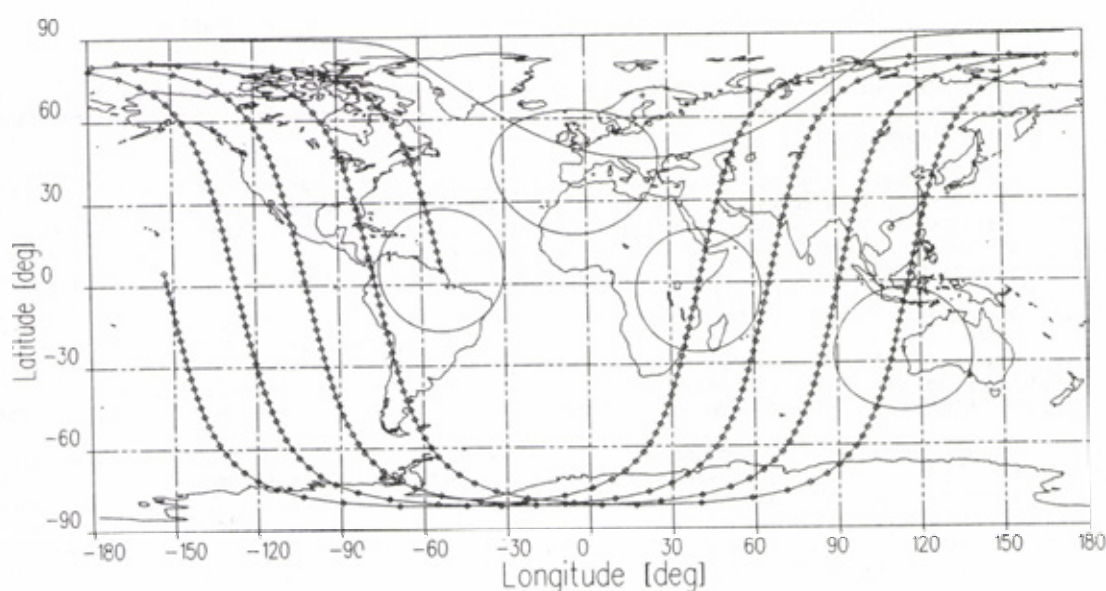


Bild 2 Bahnprojektionen von ERS-1, Inklination 98,52°  
Abstand der Marken: 1 Minute



3-4

Die hier vorgestellte Beispielsrechnung gilt generell für alle erdnah umlaufenden Satelliten, auch wenn die hier benutzte Darstellung sehr vereinfachend ist. Die Festlegung einer bestimmten Satellitenbahn ist immer ein Kompromiss zwischen unterschiedlichen Forderungen. So setzt eine hohe Wiederholrate von 3 Tagen eine Bahn mit  $14 \frac{2}{3}$  Umläufen voraus, die aber einen Abstand benachbarter Bahnen am Äquator von etwa 910 km zur Folge hat. Wird gleichzeitig nur ein Streifen von 100 km Breite abgebildet, so bleiben 800 km unbeobachtet. Auf der anderen Seite hat eine kleine abgebildete Streifenbreite mit der gleichzeitigen Forderung nach vollständiger Beobachtung eine sehr niedrige Wiederholrate zur Folge. Beide Forderungen gleichzeitig, hohe Wiederholrate und vollständige Beobachtung, sind nur mit mehreren Satelliten erfüllbar.

## 2.3 BEOBACHTUNGSGEBIET UND -ZEIT

Neben den bisher betrachteten Kriterien bestimmen noch eine Reihe anderer die endgültige Bahnauswahl und unter Umständen auch den Startort. Die beiden wichtigsten sind hier

- das Beobachtungsgebiet, d.h. bis zu welchem Breitengrad (Nord oder Süd) soll beobachtet werden?
- den Beobachtungszeitpunkt, d.h. zu welcher Tageszeit soll das Beobachtungsgebiet überflogen werden?

Ein äquatornahes Land, das sein Gebiet überwachen will, wird eine Bahn mit einer kleinen Inklination wählen. Bild 3 zeigt beispielhaft Bahnen mit  $30^\circ$  Inklinationen.

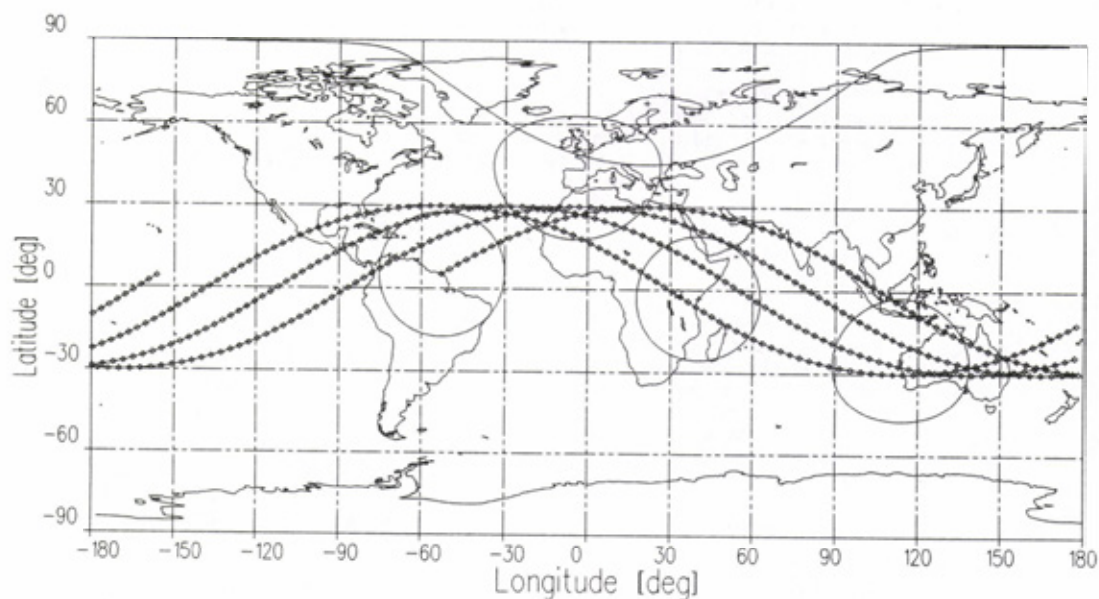


Bild 3 Bahnprojektionen eines Satelliten mit  $30^\circ$  Inklination

Trotz gleichbleibendem Abstand der Bahnen am Äquator hat sich der senkrechte Abstand erheblich verringert, die Beobachtungstreifen überlappen stark und die Beobachtungswiederholrate (nicht die Bahnwiederholrate) hat sich erhöht.

Der bevorzugte Beobachtungszeitpunkt ist selbst wieder ein Kompromiss widersprüchlicher Forderungen. Für ein tropisches Land mit typischen Nachmittagsregen wäre eine Beobachtung am frühen Vormittag wegen der geringeren Quellbewölkung vorteilhaft. Für ein europäisches Land würde dies wegen des niedrigen Sonnenstands zu starken Schatten und damit schlecht beobachtbaren Bergtälern führen. Andererseits kann aus den Schatten auf die Höhe beobachteter Objekte geschlossen werden.

Dazu kommt, dass ein Satellit, der um 12.00 Uhr Ortszeit den Äquator überquert, sich in jedem Umlauf etwa 20 Minuten lang im Erdschatten befindet und nur aus Batterien versorgt werden kann. Dagegen bleibt ein polnaher Satellit, der den Äquator um 6.00 Uhr (oder 18.00 Uhr) überquert, immer in der Sonne. Er fliegt allerdings vorwiegend über der Dämmerungszone mit schlechten Beleuchtungsverhältnissen. Für einen Radarsatelliten könnte dies eine recht vorteilhafte Bahn sein.

Im Zusammenhang mit Fernerkundungssatelliten wird häufig von einer sonnensynchronen Bahn gesprochen. Eine Satellitenbahn wird dann als sonnensynchron bezeichnet, wenn der Satellit einen Ort immer zur gleichen lokalen Sonnenzeit (nicht Ortszeit) überfliegt. Dazu darf die Orientierung der Bahnebene aber nicht fest im Raum bleiben, sondern muss sich mit der Bewegung der Erde um die Sonne pro Tag um fast ein Grad (pro Jahr um  $360^\circ$ ) drehen. Dies wird bei polnahen Bahnen vorwiegend durch Nutzung der mit dem Abstand zum Erdmittelpunkt variierenden Anziehungskräfte erreicht.

3-5

Um bei einer sonnensynchronen Bahn eine Wiederholgenauigkeit von  $\pm 1$  km zu erreichen, muss etwa einmal pro Monat eine Bahnkorrektur durchgeführt werden. In Jahren mit extrem hoher Sonnenaktivität können Bahnkorrekturen alle drei Tage notwendig werden.

### 3. SENSOREN

#### 3.1 NUTZBARE SPEKTRALBEREICHE

Um die Erde von einem Satelliten aus beobachten zu können, muss die von einem Sensor im Satelliten empfangene Strahlung mindestens einmal die Atmosphäre durchdringen. Allerdings hat die Atmosphäre die Eigenschaft, Strahlungen mit bestimmten Wellenlängen mehr oder weniger stark zu absorbieren. Bild 4 zeigt das Absorptionsspektrum der Atmosphäre.

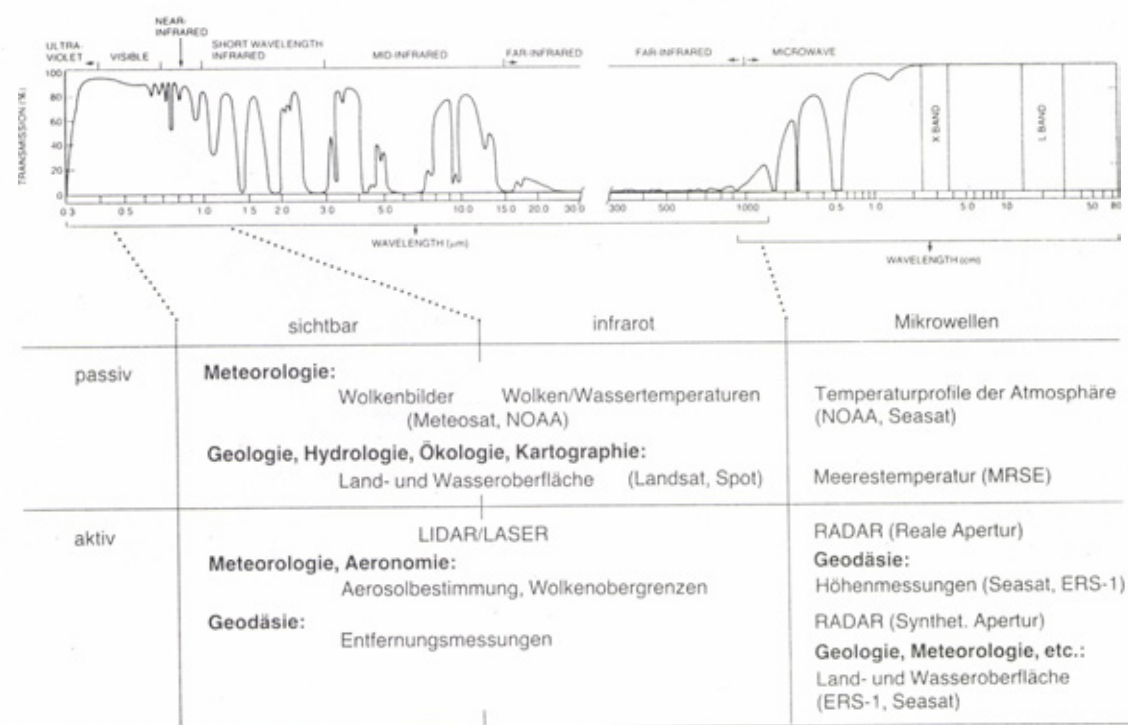


Bild 4 Absorptionsspektrum der Erdatmosphäre

Zwei Bereiche werden für die Erdbeobachtung heute vorwiegend benutzt:

- der optische Bereich von  $0.4 \mu\text{m}$  (blau) bis  $13 \mu\text{m}$  (thermisches IR)
- der Mikrowellenbereich für abbildende Radarsysteme von 1 GHz bis 20 GHz

Einige andere Spektralbereiche werden sowohl mit passiven als auch mit aktiven Sensoren, besonders zur Untersuchung der Atmosphäre, benutzt.

Nachfolgend soll kurz auf einige typische Eigenschaften der Sensoren eingegangen werden. Wegen der Gedrängtheit des Vortrags werden einige starke Vereinfachungen vorgenommen, die Fachleute bitte entschuldigen mögen.

#### 3.2 OPTISCHE SENSOREN

Für die Fernerkundung werden ausschliesslich passive Sensoren benutzt, die die von der Erde reflektierte oder emittierte Strahlung messen. Für die Aufklärung wurden anfangs ausschliesslich Kameras wie etwa Reihenschlitzkameras mit verlängerter Brennweite benutzt. Belichtete Filme wurden in Kapseln abgeworfen.

Die notwendigen Belichtungszeiten machten bei der hohen Eigengeschwindigkeit und der niedrigen Flughöhe (um 150 km) eine Bewegungskompensation der Kamera notwendig.

Bei den zivilen Fernerkundungssatelliten wurden von Anfang an elektronische Sensoren eingesetzt. Dabei entsteht das Bild durch zeilenweises Abtasten des Beobachtungstreifens quer zur Flugrichtung. Die Satelliten des Typs Landsat tragen Einzelsensoren; die zeilenweise Abtastung erfolgt über Schwingspiegel (Bild 5).



3-6

Zur Aufteilung in die unterschiedlichen Spektralkanäle mit teilweise engen Bandbreiten, werden sowohl die Empfindlichkeitsbereiche der speziellen Halbleiter als auch Filter und Prismen als Strahlteiler eingesetzt:

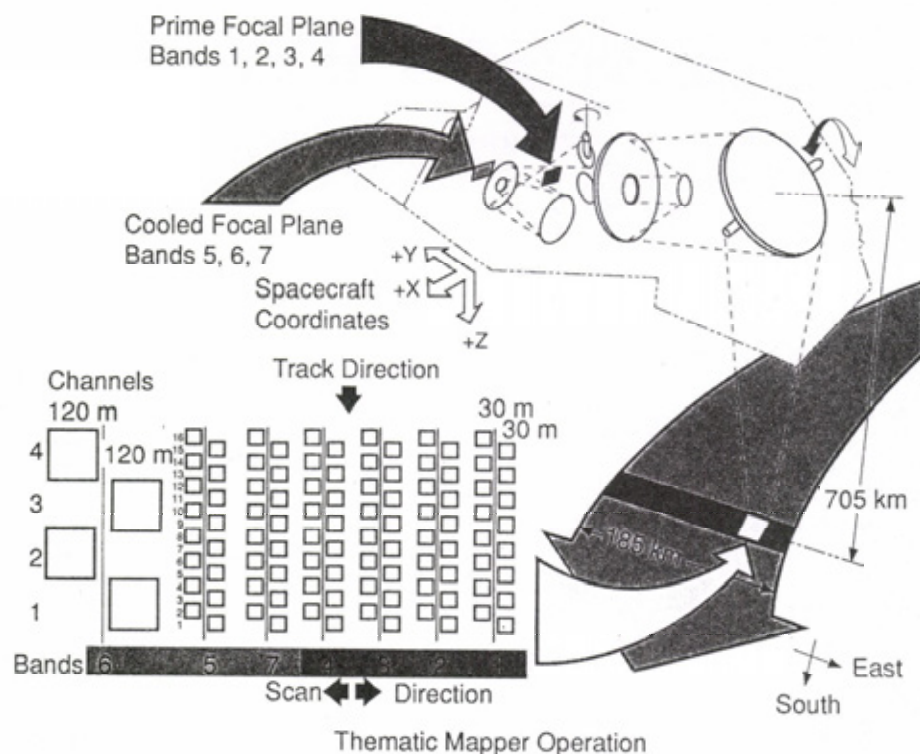


Bild 5 Prinzipbild des Thematic Mapper Sensors auf Landsat-D

Bei den gegenwärtigen zivilen Fernerkundungssatelliten werden folgende Spektralbereiche benutzt:

Landsat		SPOT	
MSS	TM	multispektr.	panchrom.
80 m	30 m	20 m	10 m
0,5 - 0,6 $\mu\text{m}$	0,45 - 0,52 $\mu\text{m}$	0,50 - 0,59 $\mu\text{m}$	0,51 - 0,73 $\mu\text{m}$
0,6 - 0,7 $\mu\text{m}$	0,52 - 0,60 $\mu\text{m}$	0,61 - 0,68 $\mu\text{m}$	
0,7 - 0,8 $\mu\text{m}$	0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$	0,79 - 0,89 $\mu\text{m}$	
0,8 - 1,1 $\mu\text{m}$	0,76 - 0,90 $\mu\text{m}$		
	1,55 - 1,75 $\mu\text{m}$		
	2,08 - 2,35 $\mu\text{m}$		
	10,40 - 12,50 $\mu\text{m}$		

Für SPOT werden ebenso wie für moderne Aufklärungssatelliten (z.B. "Big Bird" oder "Key Hole") sogenannte CCD-Sensoren eingesetzt (Bild 6). Mit diesen hochintegrierten zeilenförmigen Sensoren kann auf Schwingspiegel verzichtet werden. Als Nachteil muss noch gesehen werden, dass sich gegenwärtig nur Halbleitermaterialien so hoch integrieren lassen, deren spektrale Empfindlichkeit bei etwas über 1  $\mu\text{m}$  endet.

Für den Bereich mittleres bis thermisches Infrarot wird man vorerst noch auf Einzelsensoren angewiesen sein, obwohl grosse Anstrengungen in Forschung und Entwicklung gemacht werden und teilweise erste Labormuster von Zeilensensoren schon verfügbar sind.

Die Zeilensensoren haben zumindest bei SPOT eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Beobachtungshäufigkeit eröffnet. SPOT hat am Eingang der Teleskope (SPOT trägt zwei identische Instrumente, die beide gleichzeitig arbeiten können) einen Spiegel, der eine Änderung der Blickrichtung (quer zur Flugrichtung) von  $\pm 27^\circ$  erlaubt (Bild 7). Dies entspricht einem möglichen Gebiet von 950 km Breite, in dem ein Streifen von 60 km - 80 km Breite beobachtet werden kann. Daher kann trotz der Wiederholrate von 26 Tagen ein spezielles Gebiet aus Bahnen, die bis zu 450 km entfernt sind, etwa alle 5 Tage beobachtet werden.

3-7

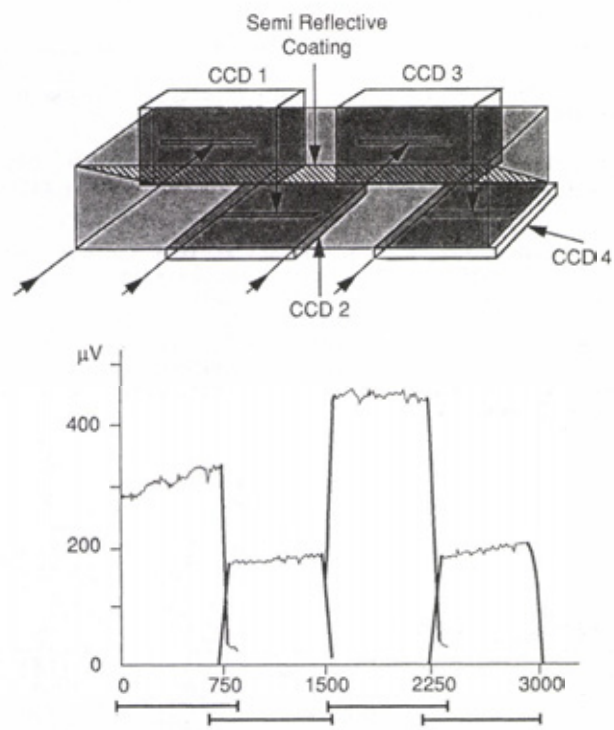


Bild 6 Prinzipbild der Sensorzeile bei SPOT  
Sensoranordnung und Sensorempfindlichkeit

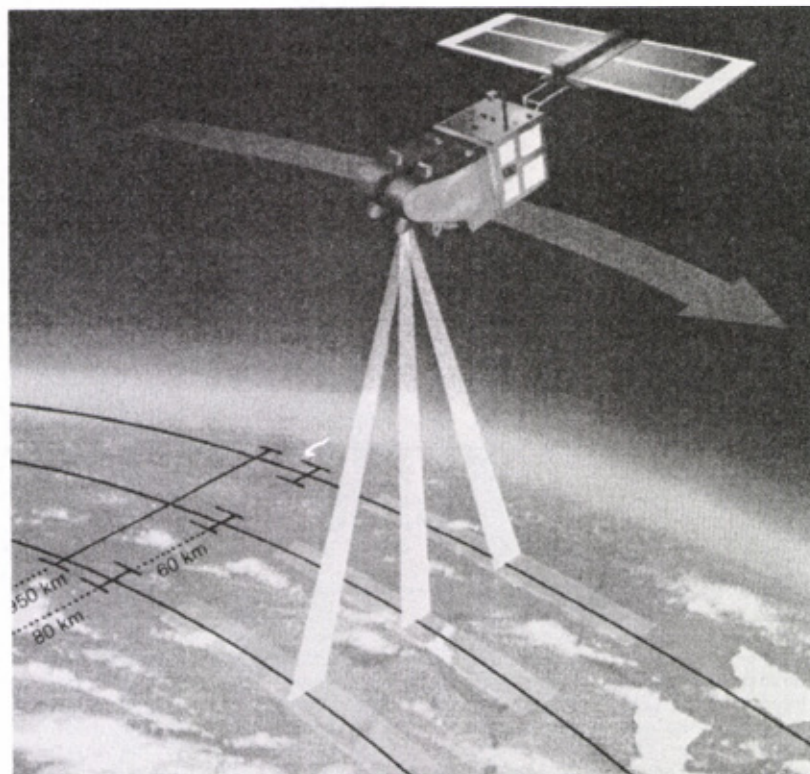


Bild 7 Beobachtungsbereiche von SPOT



3-8

### 3.3 MIKROWELLEN-SENSOREN

Trotz all dieser sehr weit entwickelten Technologien haben alle optischen Sensoren einen wesentlichen Nachteil. In Gebieten mit starker Bewölkung liefern sie erstklassige Bilder der Wolken, aber keine vom Boden. Da Mitteleuropa eine mittlere Wolkenbedeckung von etwa 60 % hat, sind optische Sensoren nur eingeschränkt einsetzbar.

Abhilfe bietet hier der aktive Mikrowellen Sensor SAR (Synthetic Aperture Radar). Zum Funktionsprinzip eines SAR sei auf die in den Referenzen auszugsweise zitierten Veröffentlichungen verwiesen.

Die SAR Bilder entstehen über sehr komplexe Verarbeitungsschritte aus den Rohdaten. Die Möglichkeiten heutiger digitaler Signalverarbeitung erlauben gegenwärtig die Ablösung der bisher eingesetzten optischen "Prozessoren" auch für die Echtzeitverarbeitung.

Bild 8 gibt einen Ueberblick über die gegenwärtig bei abbildenden SAR's benutzten Frequenzen. Dabei muss man berücksichtigen, dass seit 1979 (Seasat, 3 Monate Betrieb) nur flugzeuggetragene SAR's und Experimental-SAR's mit dem Space-Shuttle zum Einsatz kamen. Das nächste Satelliten-SAR wird mit ERS-1 im Dezember 1990 gestartet werden.

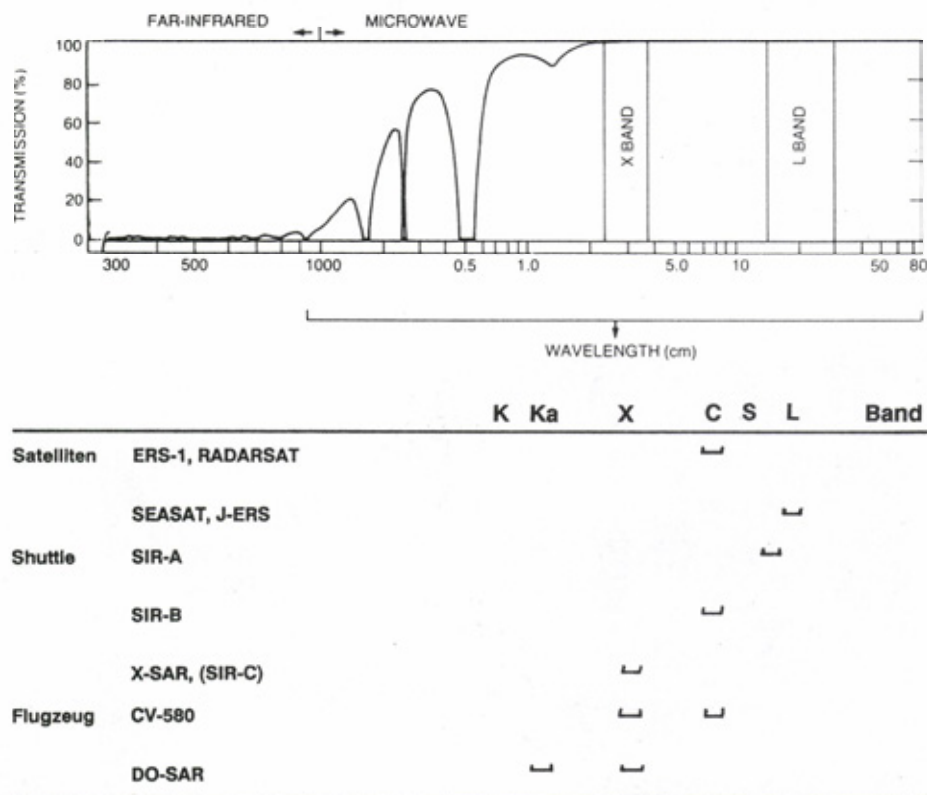


Bild 8 Arbeitsfrequenzen aktiver Mikrowellensensoren (Synthetic Aperture Radar, SAR)

Auf drei besondere Eigenschaften der SAR's sei hier hingewiesen:

- Polarisation  
Die üblichen Hohlleiter-Schlitzantennen haben eine regelmässige Orientierung der Schlitze (Send- und Empfangsdipole) und strahlen daher ein in einer Ebene polarisiertes Feld ab. Man spricht dabei von horizontaler (Schlitze parallel zur Antennenlängsachse, H) oder vertikaler (Schlitze senkrecht, V) Polarisation. Wird nur eine Antenne als Send- und Empfangsantenne benutzt, so ist ein HH oder VV Betrieb möglich. Werden zwei Antennen mit unterschiedlicher Polarisation eingesetzt, so kann zusätzlich auch ein VH- und HV-Betrieb durchgeführt werden. Ausreichende Erfahrungen, welche zusätzlichen Informationen mit diesen verschiedenen Polarisationen gewonnen werden können, liegen bisher noch nicht vor.

3-9

- **Abbildungsgeometrie**  
Bei einem Radar, und das ist beim SAR nicht anders, erfolgt die geometrische Zuordnung eines reflektierenden Objekts ausschliesslich aufgrund der Signallaufzeit. Bild 9 zeigt schematisch einen Berg und die Wellenfront des Radarsignals bei unterschiedlicher Blickrichtung. Bei einer steilen Blickrichtung des SAR erreicht die Wellenfront den Berggipfel früher als dessen Fusspunkt. Dieser wird daher im SAR Bild gegenüber dem Fusspunkt nach links verschoben sein. Der bei diesem steilen Blickwinkel entstehende Abschattungsbereich, der vom Radarsignal nicht erfasst wird, ist relativ klein. Bei einem flachen Blickwinkel ist die Verschiebung des Gipfels gegenüber dem Fusspunkt erheblich geringer, dafür ist der Abschattungsbe- reich wesentlich grösser geworden.

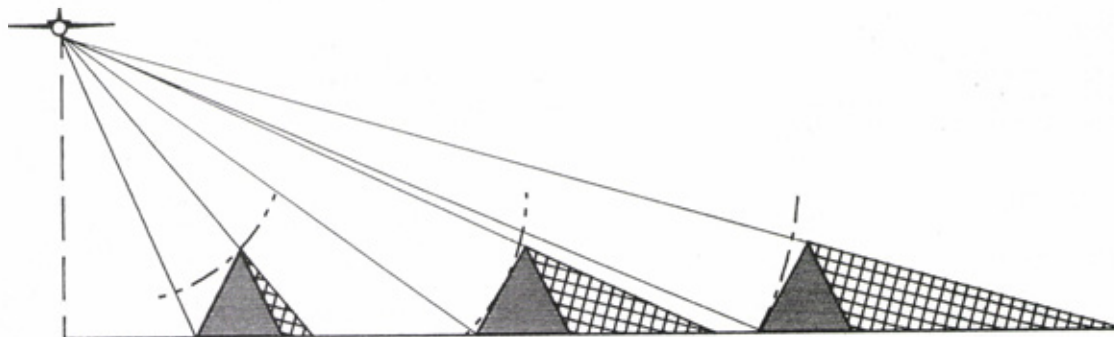


Bild 9 Prinzipbild zur Abbildungsgeometrie eines SAR

In bergigem Gelände, das man nur von einer Seite beobachten kann, wird man einen steilen Blickwinkel bevorzugen, um die Einsehbarkeit der Täler sicherzustellen. Um geometrisch genaue Bilder zu erhalten, müssen die Daten allerdings mit digitalen Höhenmodellen korrigiert werden.

In ebenem Gelände kann mit einem flachen Blickwinkel gearbeitet und unter Umständen auf eine Korrektur mit einem Höhenmodell verzichtet werden.

Hier seien noch zwei in diesem Zusammenhang häufig benutzte Begriffe kurz erläutert:

- **Slant range image**  
SAR Bild, dessen Bezugsebene die mittlere Blickrichtung des SAR ist.
- **Ground range image**  
SAR Bild, dessen Bezugsfläche ein angenommenes Geoid ist, das meist durch ein Kugelflächen- segment angenähert wird. Bei kleineren Bildern wird oft auch eine ebene Fläche als Bezugsflä- che benutzt.
- **Dopplerverschiebung**  
Die Lage eines Objektes entlang der Flugrichtung wird aufgrund der Dopplerverschiebung ermit- telt. Bewegt sich ein Objekt selbst, trägt seine Eigengeschwindigkeit zu dieser Dopplerver- schiebung bei, was naturgemäss zu einer fehlerhaften Ortsbestimmung führt. Dies kann dann zur Folge haben, dass die Autos im SAR Bild neben der Strasse fahren.

#### DATENUEBERTRAGUNG, DATENSPEICHERUNG

Bei der Forderung nach immer höherer Auflösung wird oft übersehen, dass die Daten auch noch zum Boden übertragen werden müssen.

Die Problematik sei an einem einfachen Beispiel verdeutlicht. Für eine zweiwöchentliche Beobach- tung von Europa muss bei einem Satelliten der Beobachtungstreifen etwa 150 km breit sein. Be- rücksichtigt man weiterhin, dass die Datenrate für ein SAR Rohsignal etwa 10 mal grösser sein muss als für Bilddaten, dann ergeben sich etwa folgende Datenraten in Abhängigkeit der Auflösung für die Uebertragung eines Kanals. Für Multispektraldaten ergibt sich das jeweilige Vielfache.

Auflösung	Datenrate optisch (Bilddaten)	(150 km Bildstreifen) SAR (Rohdaten)
100 m	0,82 Mbps	8,2 Mbps
30 m	9,1	91
10 m	82	820
3 m	910	9.100
1 m	8.200	82.000

Die Datenrate wächst umgekehrt proportional mit dem Quadrat der Auflösung.



## 3-10

Der Direktempfang vom Satelliten ist erstens auf den Empfangsbereich einer lokalen Bodenstation mit einem Empfangsradius von (je nach Flughöhe) 2000 km bis 3000 km beschränkt und auf den von CCIR zugelassenen Frequenzbereich von 8 GHz bis 8.4 GHz begrenzt. Die verfügbare Bandbreite von etwa 100 MHz lässt auch bei Vierphasenmodulation nur eine Datenrate von höchstens 160 Mbps zu. Eine Alternative bietet der Einsatz von speziellen geostationären Relaisatelliten und die daraus resultierende Nutzung von anderen Frequenzbändern. Aber auch hier wird man für die kommenden Jahre auf Datenraten von unter 400 Mbps beschränkt sein.

Eine weitere, heute bei Aufklärungssatelliten schon genutzte Methode ist die globale Ueberwachung mit geringer Auflösung und die gezielte Aufklärung spezieller Gebiete (kleine Streifenbreite) mit hoher Auflösung (sog. Spot-Mode).

Ein mindestens so grosses Problem wie die Datenübertragung ist die Datenspeicherung. Für eine Zwischenspeicherung direkt beim Empfang der Daten können gegenwärtig nur sehr spezielle Magnetbandgeräte eingesetzt werden, die im Augenblick aber auf Datenraten von etwa 250 Mbps beschränkt sind. Diese Magnetbänder sind allerdings zur langfristigen Datenspeicherung nur eingeschränkt nutzbar. Durch die gegenseitige Beeinflussung der magnetischen Partikel im Bandwickel nimmt die Feldstärke im Laufe der Jahre ab. Zur Datensicherung müssen solche Bänder daher etwa alle drei Jahre kopiert werden. Eine langfristige Alternative sind optische Platten für die Datenarchivierung.

Dabei können zur Datenreduktion Bildkompressionstechniken eingesetzt werden. Je nachdem welche Fehler bei der Bildrekonstruktion tolerierbar sind, können Kompressionsfaktoren zwischen 2 und 10 erreicht werden. Wesentlicher für eine Datenreduktion und Uebersichtlichkeit des Archivs ist jedoch eine präzise Konzeption und Festlegung der zu archivierenden Daten.

## 5. DIGITALE VERARBEITUNG

### 5.1 ABTASTUNG

Bei photographisch entstandenen Bildern wird von Auflösung und eventuell von Dynamik gesprochen. Die Auflösung ist begrenzt einerseits durch die Kameraoptik und andererseits durch die Filmempfindlichkeit und die Korngrösse. Die Dynamik hängt primär vom Filmmaterial und dessen minimaler und maximaler Dichte ab. In Analogie zu elektrischen Signalen kann man bei einem photographischen Bild von einer analogen, bandbegrenzten (Auflösung) und amplitudenbegrenzten (Dichte) Darstellung sprechen.

Wird das über ein Teleskop entstandene Bild in der Bildebene nicht von einem Film, sondern von einem elektrooptischen Sensor in ein elektrisches Signal umgewandelt, dann entspricht dieses Signal der von der Fläche dieses Sensors aufgenommenen Lichtmenge. Aufgrund der räumlichen Ausdehnung des Sensors spricht man dann von einem Pixel (picture element). Idealisiert wird das einzelne Pixel einem quadratischen Flächenelement entsprechend der nominellen Auflösung zugeordnet (Bild 10). Wegen der Abbildungseigenschaften eines Teleskops müsste man eher von Kreisflächen ausgehen, wobei die Empfindlichkeit zum Rand hin abnimmt. Solange die Auflösung aufgrund der räumlichen Ausdehnung des einzelnen Sensorelements wesentlich schlechter ist als die des Teleskops, wird durch den idealisierten Ansatz nur ein geringer Fehler gemacht.

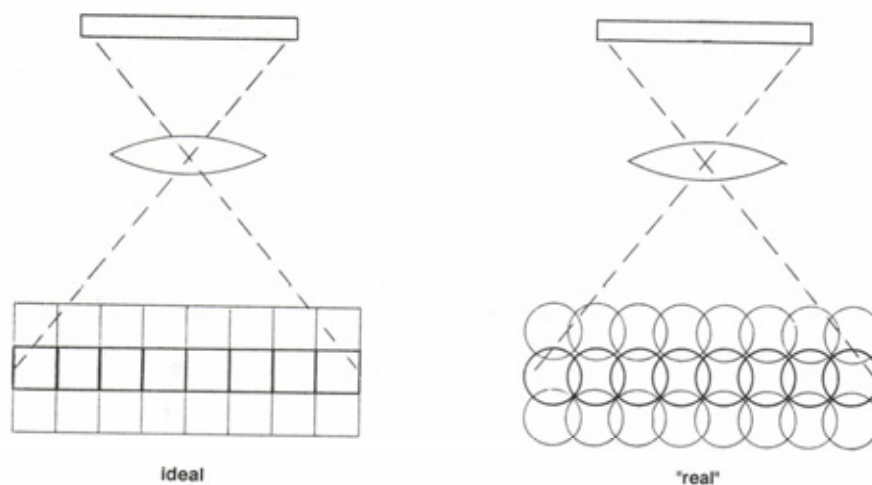


Bild 10 Abtastprinzip einer Sensorzeile

Lässt man stark strahlende (oder reflektierende) Punktquellen ausser Betracht, kann vereinfachend gesagt werden, dass die in einem Sensorelement gemessene Strahlung entsprechend der Strahlung des zugeordneten Auflösungselements (oder Pixels) am Boden ist.



### 3-11

Ein solches Auflösungselement umfasst wegen seiner endlichen Ausdehnung häufig eine Reihe verschiedener Oberflächen (Strasse, Wiese, Baum, Dach, etc.) mit unterschiedlichem Flächenanteil. Deshalb wird häufig salopp von Mixeln (mixture elements) statt von Pixeln gesprochen. Da diese Zuordnung unterschiedlicher Flächenelemente zu einem Auflösungselement (und damit einem Pixel) nur zufallsbedingt ist, muss davon ausgegangen werden, dass sie sich nicht wiederholt.

Ein Auffinden von zeitlichen Änderungen (change-detection) ist daher für kleinräumige Änderungen auf der Basis des Vergleichs einzelner Bildelemente nicht möglich.

#### BILDERVERBESSERUNG

Unter Bildverbesserung sollen solche Vorgänge verstanden werden, die die Interpretation eines Bildes wesentlich erleichtern. Im Englischen wird dies meist als Enhancement bezeichnet. Nachfolgend sollen einige Beispiele dafür skizziert werden.

Hierzu ist allerdings zu bemerken, dass diese Methoden immer auf der Benutzung digitaler Bilddaten beruhen und meist nicht reversibel sind. Zielrichtung ist immer die bessere und leichtere Interpretation des Bildinhaltes durch einen Auswerter am Bildschirm.

Die einfachste Methode ist die Histogrammverbesserung, d.h. individuell im Histogramm (Grauwertverteilung) durch Grauwertverschiebung den Kontrast und die Helligkeit zu verändern. Das ist von Interesse, wenn ein Bild besonders dunkel oder besonders hell ist. Der Vorgang entspricht etwa der Veränderung des Kontrastes an einem Bildschirm.

Viel häufiger kommt jedoch der Fall vor, dass einzelne Bildteile sehr dunkel und andere sehr hell sind. Da der Mensch von den 256 Graustufen (8 bit pro Pixel) nur etwa 20 bis 30 unterscheiden kann, ist es ihm nicht möglich, Details in solchen Bildteilen zu erkennen. Wird eine Histogrammverbesserung nur aufgrund der lokalen Situation durchgeführt, kann die Anzahl der Graustufen reduziert und damit die Auswertbarkeit durch einen Beobachter verbessert werden. Bild 11 zeigt ein Beispiel hierfür. Da dabei die radiometrischen Werte der einzelnen Pixel verändert wurden, ist eine weitergehende Nutzung eines so veränderten Bildes nur eingeschränkt möglich.

Ein anderes Beispiel ist die Kantenverstärkung, die meist bei Bildern mit sehr geringer Dynamik benutzt wird. Das Bild wird über einen Hochpass transformiert. Dabei werden alle flächigen Teile unterdrückt und Kanten und Übergänge bleiben erhalten. Addiert man dies Ergebnis zum ursprünglichen Bild, wirkt dies plastisch, und vorher kaum erkennbare Strukturen werden hervorgehoben.

Ein drittes hier hervorzuhebendes Verfahren ist die sogenannte Pseudofarbdarstellung. Dabei wird einem Grauwert eine bestimmte Farbe zugeordnet. Statt 256 Grauwerten werden also 256 Farben dargestellt. Das Verfahren ist mit sehr viel Vorsicht zu benutzen. In den allermeisten Fällen entstehen bunte Bilder, denen oft ein künstlerischer Wert nicht abzusprechen ist. Die Interpretierbarkeit wird aber nur in Sonderfällen verbessert (Computer Tomographie u.ä.).

#### MULTISPEKTRALAUSWERTUNG

Unter Multispektraldaten versteht man ortsgleiche Bilder, von denen jedes nur die Strahlung in einem bestimmten schmalen Spektralbereich wiedergibt. Jedes dieser Bilder ist für sich ein Halbtonbild. Der Begriff Halbtonbild wird hier benutzt, um ein Bild mit vielen unterschiedlichen Graustufen zu bezeichnen. Grauwert und Halbton sind als Synonym zu betrachten. Die Bezeichnung Schwarz-Weiss-Bild wurde bewusst vermieden, da hinter diesem Begriff oft Graphiken mit der Unterscheidung Schwarz-Weiss (d.h. Binärbilder) verstanden werden. Da die meisten Begriffe nicht standardisiert sind, ist bei ihrer Benutzung und Interpretation sehr viel Vorsicht angebracht.

Kombiniert man je ein Bild aus den Spektralbereichen Blau, Grün und Rot unter Beibehaltung der Farbzurordnung, so spricht man von Echtfarbdarstellung. Kombiniert man Bilder beliebiger Spektralbereiche und ordnet man diese einer beliebigen Bildschirmfarbe (B, G, R) zu, spricht man von Falschfarbdarstellung.

Hier sei der Hinweis erlaubt, dass die Bezeichnungen Pseudofarb- und Falschfarbdarstellung öfters falsch benutzt werden. Ein typisches Beispiel für Falschfarbdarstellung sind Infrarotbilder, bei denen die an sich grüne Vegetation rot dargestellt wird. Die bunten Bilder zum Wärmeverlust am Haus sind Pseudofarbdarstellungen von Halbtonbildern in thermischem Infrarot.

Jede Oberfläche (Baum, Wiese, Acker, Strasse, Dach, Sumpf, Kies etc.) hat sehr spezifische Reflektions- und Emissionsspektren. Sie hinterlässt in einer Multispektralaufnahme ihre spezifische Signatur oder ihren "Fingerabdruck". Kennt man diese Signatur, kann man sie in einer Multispektralaufnahme auch wiederfinden und zuordnen. Dieser als Klassifizierung (Zuordnen zu Klassen) bezeichnete Vorgang ist leider nicht ganz einfach, da jahreszeitliche und klimatische sowie atmosphärische Einflüsse die theoretische Eindeutigkeit infrage stellen. Im späten Frühjahr sehen ein Rübenacker in der Ebene und ein Maisfeld 300 Meter höher fast gleich aus. Trockener und feuchter Boden, obwohl sonst identisch, werden kaum als gleich erkennbar sein.

Lässt man hier die notwendige Vorsicht walten, können aus klassifizierten Daten auch Veränderungen (z.B. grössere Baumassnahmen) erkannt werden.

3-12



Bild 11a SPOT-Bild panchromatisch, original



Bild 11b SPOT-Bild panchromatisch nach adaptiver Histogrammanpassung



#### 5.4 DATENFUSION

Die Erfahrung hat gezeigt, dass die ausschliessliche Betrachtung eines Bildes (auch multi-spektral) bei vielen Fragestellungen nicht wesentlich weiterführt. In sehr vielen Fällen hilft nur die Kombination der Daten unterschiedlicher Quellen. Dies setzt jedoch voraus, dass diese Daten auch verknüpfbar sind. Bei Satellitenbildern lässt sich dies nur über eine einheitliche geometrische Darstellung erreichen. Daher werden von Dornier nur noch geometrisch unkorrigierte Daten bestellt und selbst auf die Kartenblattschnitte der topographischen Karten umgerechnet. Die so entstehende Datenbasis erlaubt die beliebige Kombination von Daten unterschiedlicher Herkunft (Landsat, SPOT, Seasat, Karten, Höhenmodelle etc.).

Untersuchungen haben gezeigt, dass bei ausreichend genau vorhandenen Passpunkten ein mittlerer geometrischer Fehler bei den umgerechneten Satellitenbildern von weniger als der halben Auflösung erreichbar ist (bei SPOT besser 6 m).

Aus den vielen Möglichkeiten, die eine solche Datenfusion bietet, seien nur zwei beispielhaft hervorzuheben:

- Kombination Landsat - SPOT  
Die Kombination von multispektralen Daten von Landsat (30 m Auflösung) und panchromatischen Bildern von SPOT (10 m Auflösung) erlaubt detaillierte Analysen unter Beibehaltung der Informationstiefe der multispektralen Daten von Landsat und der hohen geometrischen Auflösung von SPOT.
- Kombination mit Karten  
Die Kombination mit gegenwärtig raster-digitalisierten Karten (GEOGRID) und Satellitenbildern vereinfacht die Interpretation und verdeutlicht Unterschiede zwischen der aktuellen Situation und den kartographisch erfassten Gegebenheiten.

#### 5.5 SAR DATENAUSWERTUNG

Bisher wurde nur über die Auswertung von optischen Daten gesprochen. Die Verarbeitung der Daten von Mikrowellensensoren und hier besonders des SAR (Synthetic Aperture Radar) wurde übergangen.

Dies hat den einfachen Grund, dass digital erzeugte SAR Bilder bisher noch Mangelware sind und den Forschungsbereich kaum verlassen haben. Nur von Seasat liegen bisher SAR-Daten aus dem Jahr 1979 vor (Seasat hat nur 3 Monate gearbeitet). Daten der Shuttle SAR's SIR-A und SIR-B (Shuttle Imaging Radar) sind von der NASA nur soweit freigegeben, wie sie militärisch vollkommen unbedenklich sind. Die offen zugänglichen Daten von flugzeuggetragenen SAR's (z.B. CV-580) dienen der Feststellung landwirtschaftlicher Flächennutzung und der Waldschadenserkenkung.

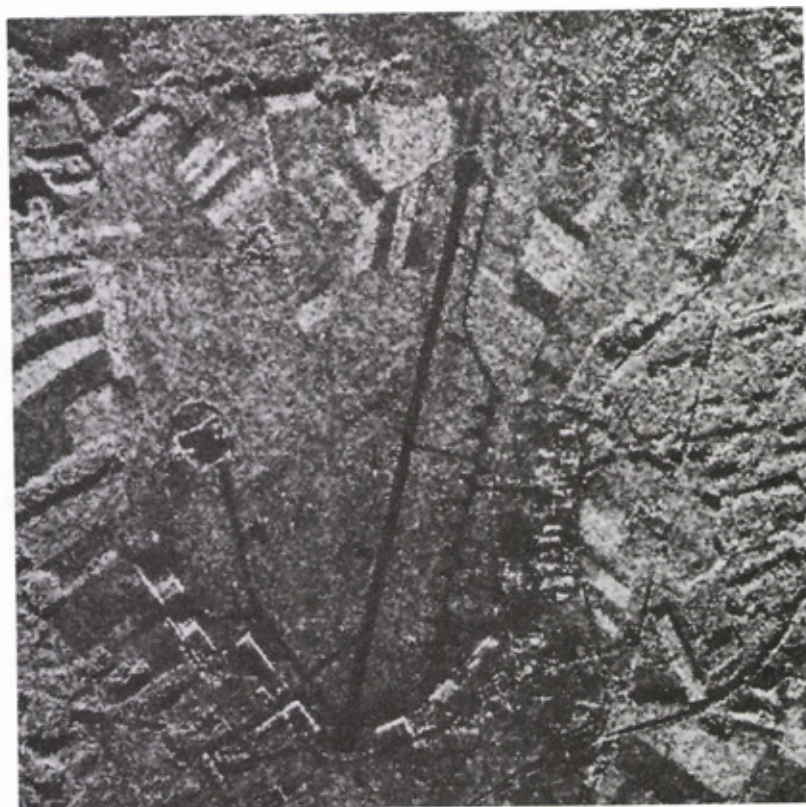


Bild 12a SAR Bild im C-Band, original



3-14



Bild 12b SAR Bild im C-Band  
Statistische Bildauswertung, Hauptwert

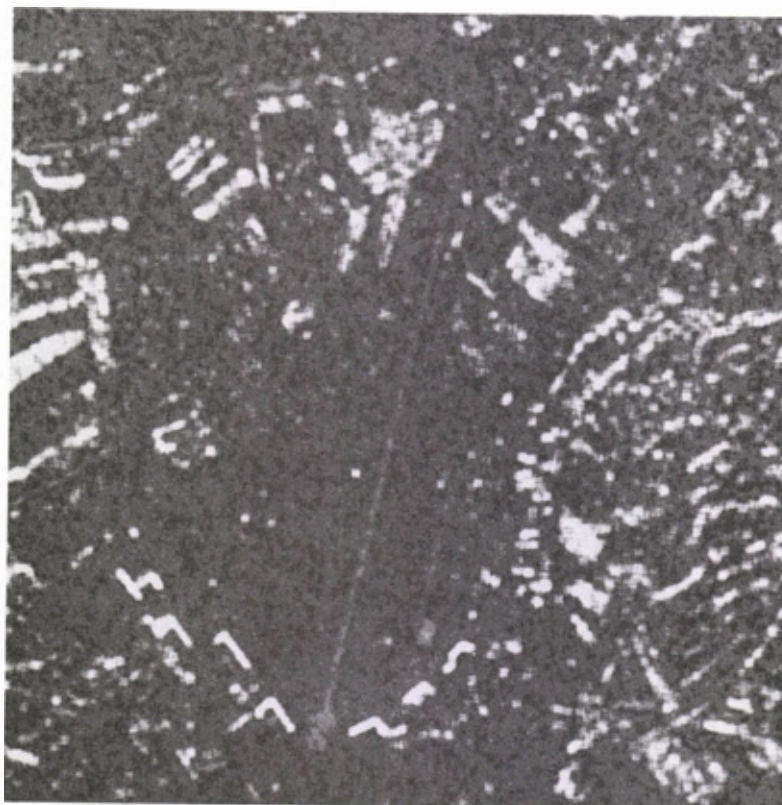


Bild 12c SAR Bild im C-Band  
Statistische Bildauswertung, Energie

3-15

Der heutige Status der SAR-Bilddatenverarbeitung entspricht etwa dem Zustand der Bildauswertung von Landsat-Daten von vor 10 Jahren. Dies liegt nicht am mangelnden Ehrgeiz der Forscher, sondern an den fehlenden Daten, mit denen entsprechende Forschungen betrieben werden könnten. Hinzu kommt, dass die Wechselwirkung zwischen Boden und bildgebenden SAR Sensoren noch kaum untersucht ist, und dass für diese Wechselwirkungen kaum Analogien zu optischen Beziehungen existieren.

Als Beispiel für diese Problematik mögen drei SAR-Bilder dienen. Bild 12a zeigt das SAR Bild (5,4 GHz, HH) eines Flughafens. Von diesem Bild wurde eine statistische Analyse gemacht, um das SAR typische Rauschen (Speckle) zu untersuchen. Bild 12b stellt den Hauptwert (Means) und Bild 12c die Energie dar. Der Unterschied in der Betonung flächiger Elemente und strukturierter Elemente (Gebäude, Rollbahn) ist evident. Dennoch gibt es Bildbestandteile, die sich gegenwärtig noch einer direkten Interpretation entziehen.

#### 6. ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN

Welche Möglichkeiten bieten nun die Daten heutiger ziviler Fernerkundungssatelliten im militärischen Bereich? Die Antwort scheint auf den ersten Blick einfach: Bei der Aufklärung.

Dieses Wort Aufklärung deckt jedoch einen extrem grossen Bereich unterschiedlicher Aufgaben ab, die sich auch noch durch die jeweilige Situation (Frieden, Krise, Krieg) erheblich unterscheiden. Lässt man sehr dynamische Vorgänge während einer akuten Krise oder gar im Kriegsfall ausser Acht, da diese im nach Tagen oder Wochen zu rechnenden Beobachtungsintervall ziviler Satelliten nicht aufgeklärt werden könnten, verbleiben immer noch eine Reihe von Aufklärungsaufgaben. Generell könnten diese in folgende drei Kategorien eingeordnet werden:

- Basisdatenbeschaffung zur Infrastruktur
- Erkennen und Lokalisieren transportabler Anlagen
- Erkennen und Lokalisieren mobiler Ausrüstungen

Um im Weiteren Missverständnisse möglichst auszuschliessen, da Terminologie und Interpretation oft sehr unterschiedlich sind, sei an einzelnen Beispielen erläutert, was unter den einzelnen Begriffen verstanden wird:

- Infrastruktur
  - Topographie, Gelände, Strassen, Brücken
  - Flughäfen, Seehäfen, Kasernen, Werften, Depots, Versorgungseinrichtungen, Eisenbahn-Knotenpunkte
- Verlegbare Einrichtungen (quasistationär)
  - Schwer und relativ langsam verlegbare Einheiten wie Feuerstellungen, Versorgungspunkte, Fernmeldeeinrichtungen, Stäbe, Wartungseinheiten und ähnliches in der Etappe



Bild 13 SPOT-Bild panchromatisch  
Baustelle eines Kraftwerks



## 3-16

- Mobile Einheiten  
Einfach und relativ schnell verlegbare Einheiten wie Kampftruppen auf dem Vormarsch, Versorgungsverkehr, Pioniertruppen

Zur Aufklärung von Einzelobjekten wird üblicherweise von der nachfolgenden Stufung ausgegangen, wobei zum Erreichen der jeweiligen Stufe eine bestimmte Anzahl von Bildelementen (Pixeln) benötigt wird:

- Entdecken                    2 - 10 Pixel
- Erkennen                    6 - 40 Pixel
- Identifizieren            30 - 100 Pixel

Je nach gegebener Auflösung des Satelliten folgt daraus direkt, welche Einzelobjekte noch entdeckbar oder erkennbar sind.

Berücksichtigt man aber, dass Einzelobjekte (etwa der einzelne Panzer) in vielen Fällen bedeutungslos sind, da nur die Kombination von einzelnen Objekten das eigentliche Aufklärungsziel ausmachen, wird aus dem Entdecken einiger Einzelobjekte das Erkennen oder gar das Identifizieren eines Aufklärungsziels.

Als typische Beispiele seien Strassen oder Flughäfen genannt. Bei einer Auflösung von 10 m sind selbst schmale Strassen (ca. 5 m Breite) gut erkennbar. Dies hat zwei Gründe: Zum einen hebt sich die Strasse meist gut von ihrer Umgebung ab, d.h. sie dominiert den Mischinhalt eines Pixels und zum anderen bildet sie eine Linie aus vielen Pixeln und damit eine ausgeprägte Struktur.

Ein gut ausgebauter Flughafen ist aufgrund seiner Grösse leicht auszumachen, während gut getarnte Unterstände unsichtbar bleiben. Gut erkennbare Zuführungswege, die plötzlich im Nichts enden, lassen aber auf die Anzahl, den Abstand und damit die Grösse solcher Unterstände schliessen.

Wird neben der direkten Umgebung im Bild auch noch weiteres Datenmaterial berücksichtigt (z.B. Geländedaten), können meist bessere Ergebnisse erzielt werden.

Generell kann gesagt werden, dass sich mit heutigen zivilen Fernerkundungssatelliten die Infrastruktur mit ausreichender Zuverlässigkeit aufklären lässt. Die Aufklärung transportabler Anlagen ist teilweise möglich, während die von mobilen (meist getarnten) Ausrüstungen nicht möglich ist.

Vergrössert man die Auflösung von gegenwärtig 10 m (bei SPOT) auf 3 m oder besser (bei HELIOS), verschieben sich die Grenzen der Möglichkeiten entsprechend. Dabei darf allerdings nicht vergessen werden, dass die Datenmengen auf das mehr als zehnfache steigen und dann sehr spezielle Techniken für die Auswertung erfordern.

Wer auf Dauer die Techniken der digitalen Bilderfassung und Bildauswertung benutzen möchte, sollte möglichst frühzeitig mit der Auswertung der Daten ziviler Satelliten beginnen.

Sowohl die Auswertetechnik für digitale Bilddaten als auch Bildbeschaffung (d.h. Empfang), Zwischenspeicherung und Archivierung, erfordern ausgereifte Prozeduren und Techniken und sehr gut ausgebildetes Personal.

## 7. LITERATUR

Nachfolgend ein kurzer Auszug aus einer sehr langen Liste.

ERIC A. Smith  
"Orbital Mechanics and Analytic Modeling of Meteorological Satellite Orbits, Applications to the Satellite Navigation Problem"  
Colorado State University  
Atmospheric Science Paper No. 321, 1980

Philip H. Swain  
Shirley M. Davis  
"Remote Sensing, The Quantitative Approach"  
Mc Graw-Hill, 1978

Joseph Lintz, Jr.  
David S. Simonett  
"Remote Sensing of Environment"  
Addison-Wesley Publishing Company, 1976  
Reading, Massachusetts

Ralph Bernstein  
"Digital Image Processing for Remote Sensing"  
IEEE Press, 1978, New York

Charles Elachi  
"Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques"  
IEEE Press, 1987, New York

Fawwaz T. Ulaby  
Richard K. Moore  
Adrian K. Fung  
"Microwave Remote Sensing"  
Artech House Inc. 1986, Norwood, MA 02062