



geoinformation.net

Projektpartner: Universität Karlsruhe -
Institut für Photogrammetrie
und Fernerkundung
Datum: 04.09.2003

3 Aufnahmesysteme

Einleitung

Bilder sind Informationsträger, die radiometrische und geometrische Komponenten enthalten. Die geometrische Komponente sagt etwas über die Lage eines Bildpunktes aus, die radiometrische Komponente enthält die Intensität und spektrale Zusammensetzung der empfangenen Strahlung. Ein Aufnahmesystem muss also die elektromagnetische Strahlung und die Richtung, aus der die Strahlung kommt, abbilden. Die dafür benutzten Systeme nennt man Sensoren.

Im Folgenden werden digitale Aufnahmesysteme, sowie photographische Systeme beschrieben. In einem eigenen Kapitel ist die Mikrowellenfernerkundung erklärt. Hier wird auf das aktive System Radar näher eingegangen.

Inhalt

3. Aufnahmesysteme

3.1 Unterscheidungskriterien	3
3.2 Fernerkundungsplattformen	7
3.2.1 Satellitenbahnen	7
3.2.2 Analoge Aufnahmesysteme im Weltraum	9
3.2.3 Elektronische Aufnahmesysteme im Weltraum	10
3.2.4 Bildauflösung	10
3.3 Photographische Systeme	12
3.3.1 Spektrale Empfindlichkeit	12
3.3.2 Farbfilme	13
3.3.3 Gradation	15
3.4 Abtast-Systeme (Scanner)	17
3.4.1 Kanäle	17
3.4.2 Opto-mechanische Scanner	19
3.4.3 Optoelektronische Scanner	21
3.5 Radar	22
3.5.1 Radargleichung	23
3.5.2 Funktionsweise eines Radar	24
3.5.3 Radargeometrie	26
3.5.4 Radiometrische Eigenschaften von Radarbildern	31
3.5.5 Weitere Radaranwendungen	37
3.5.6 Anwendungsbeispiele (Radar allgemein)	38
3.5.7 Auswahl einiger Radarsysteme	39
3.6 Qualitätsmaße	40
3.6.1 Überblick	40
3.6.2 Konventionelle Bestimmung der geometrischen Auflösung	41
3.6.3 Von Grauwertdifferenzen zur MTF	42
3.7 Literatur	46

3.1 Unterscheidungskriterien

Die in der Fernerkundung verwendeten Sensoren lassen sich im Wesentlichen nach den folgenden Kriterien unterscheiden:

Plattformen

Objekte von welchen aus Fernerkundungssysteme eingesetzt werden:

- Flugzeuge (Flughöhe ca. 1.000 m - 10.000 m)
- Satelliten (Flughöhe ca. 500km bis 37.000 km)
- Raumstationen
- Ballons, Modellflugzeuge (experimentelle Anwendungen)

Hauptmerkmal der verschiedenen Plattformen ist die Flughöhe und die daraus resultierende Bildauflösung und Größe des aufzunehmenden Gebietes.

Im Beispiel wird vom Raum Karlsruhe je ein Luftbild (Flugzeugplattform) und Satellitenbild in Echtfarben gezeigt. Auf dem Luftbild kann man deutlich einzelne Häuser und Bäume erkennen. Auf dem Satellitenbild kann man nur noch großflächige Objekte, wie Waldflächen und Siedlungsflächen erkennen. Größere Strassen und Flüsse sind aber immer noch gut sichtbar.



Daedalus Scanner Karlsruhe August 1997
multispektrale Kanäle (rot:5 grün:3 blau:2)
Raster 2m x 2m

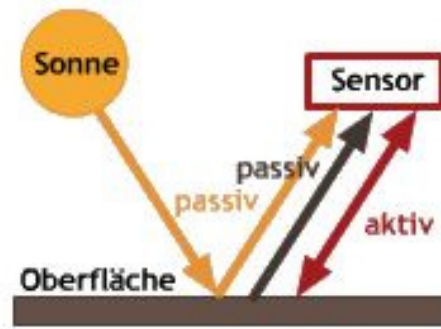


LANDSAT TM5 Karlsruhe 01. Aug. 1993
multispektrale Kanäle (rot:3 grün:2 blau:1)
Raster 2m x 2m

Passive / aktive Sensoren

Passive Sensoren registrieren die von der Erdoberfläche reflektierte oder von der Erde selbst ausgesandte Strahlung. Zu den passiven Sensoren zählen Scanner-Systeme und die Photographie.

Aktive Sensoren senden selbst Strahlungsenergie aus und registrieren die reflektierte Sensorstrahlung. Beispiele für aktive Systeme sind z.B. Radar und Laserscanning.



Analoge / digitale Sensoren

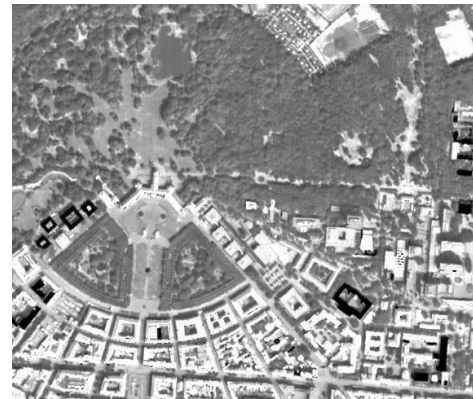
Bei analogen Sensoren wird die Bildinformationen auf einem analogen Medium gespeichert. Informationsträger sind hier lichtempfindliche photographische Schichten.

Digitale Sensoren wandeln ein Signal so um, dass diese in einer digitalen Bildmatrix abgespeichert werden.

Spektralbereiche

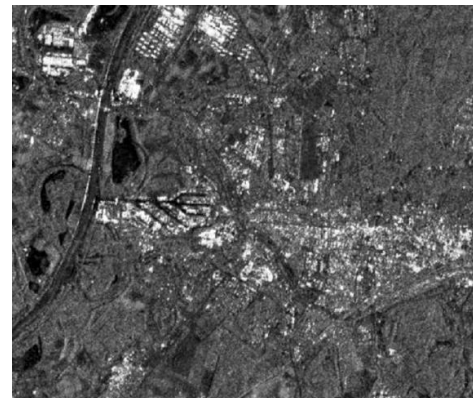
Sensoren lassen sich nach den Wellenlängenbereichen der aufgenommenen elektromagnetischen Strahlung unterscheiden. Diese Bereiche werden Kanäle oder Bänder genannt und erstrecken sich vom sichtbaren Licht über den Infrarotbereich bis zu Mikrowellen, dem Radarbereich. Wenn gleichzeitig mehrere Kanäle erfasst werden, spricht man von einem multispektralen System.

Im ersten Beispiel wird ein Luftbild im thermalen Bereich gezeigt. Je heller der Grauton ist, um so "wärmer" ist es in diesem Bereich. Die schwarzen Flächen enthalten keine Information. Hier handelt es sich um Blechdächer, die keine Strahlung emittieren.



Daedalus Scanner Karlsruhe August 1997
thermaler Bereich, Raster 2m x 2m

Im zweiten Beispiel sieht man ein Satellitenbild im Radarbereich. Deutlich erkennt man die starke Reflexion bei Siedlungsflächen und Industrie, sowie eine starke Absorption bei Gewässern.

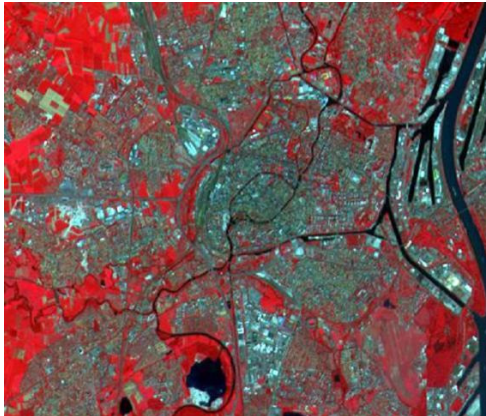


ERS-1 SAR Karlsruhe 1992
C-Band (5 GHz); Raster 25m x 25m

Auflösungsvermögen

Das räumliche Auflösungsvermögen des Sensors beschreibt die Eigenschaft bis zu welcher Grenze eng beieinanderliegende Objekte unterschieden werden können. In der Fernerkundung unterscheidet man zwischen Systemen hoher (high resolution) und niedriger (low resolution) Auflösung.

Im ersten Beispiel sieht man ein Satellitenbild von Strasbourg in Falschfarben und einer Pixelgröße von 20 m. Vegetationsflächen erscheinen rot. Das zweite Beispiel ist ein hochauflösendes Satellitenbild in Falschfarben mit einer Pixelgröße von ca. 1 m. Bei dieser Auflösung kann man sogar Details wie Autos und einzelne Bäume erkennen, die hier ebenfalls in rot erscheinen.



1. Beispiel:

SPOT 4 Strasbourg 21. Juli 1998
 multispektrale Kanäle rot:3 grün:2 blau:1
 Pixel 20m x 20m



2. Beispiel:

IKONOS Atlantikküste Südbrasilien
 (Guaratuba, Mai 2000)
 multispektrale Kanäle rot:4 grün:3 blau:2
 Pixel 1m x 1m



Dies ist ein Ausschnitt des Bildes links
 (blaues Quadrat)
 Details wie Boote und Autos sind deutlich
 zu erkennen.

Weitere Auflösungsarten sind die spektrale, radiometrische und die zeitliche Auflösung, welche ausführlich in [Kapitel 3.2.4](#) behandelt werden.

3.2 Fernerkundungsplattformen

Damit ein Sensor von der Erdoberfläche oder einem anderen Objekt reflektierte oder emittierte Energie aufnehmen kann, muss er auf einer Plattform montiert sein. Alternativen sind: Boden, Flugzeug oder Ballon oder Satellit/Raumfahrzeug.

Im Folgenden soll näher auf Satellitenplattformen eingegangen werden und die Charakteristika von Satelliten dargelegt werden.

Bei unbemannten Plattformen müssen sowohl die Datenaufnahme sowie die Datenübertragung automatisiert werden. Zur Klassifizierung von Erderkundungssatelliten hat sich eine Einteilung nach folgenden Gesichtspunkten bewährt:

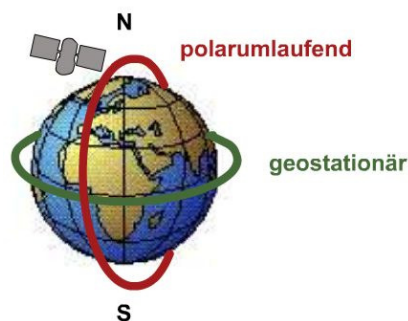
- **Arbeitsweise:**
Bei der Arbeitsweise kann zwischen **photographischen (analogen)** und **elektronischen** Systemen unterschieden werden
- **Genauigkeit:**
Die Genauigkeit ist bei Erderkundungssatelliten direkt mit der Größe der **Bodenauflösung** verbunden. Unter Bodenauflösung wird hier das kleinste erfasste Bildelement, bezogen auf seine Ausdehnung auf der Erdoberfläche verstanden
- **Universalität:**
Wesentlichen Einfluss auf den Grad der Universalität haben hier vor allem: Anzahl und Lage der **Spektralkanäle**, **Stereooption**, Flexibilität bei **Szenenauswahl**, Kanälen und Auflösung, **Unabhängigkeit** von Wolken und Tageslicht

3.2.1 Satellitenbahnen (Orbits)

Der Weg, den ein Satellit um die Erde nimmt, wird als Umlaufbahn bezeichnet. Umlaufbahnen können charakterisiert werden nach:

- ihrer Höhe (Geometrie der Bahnellipse)
- ihrer Orientierung (Bahnebene zu Äquatorebene)
- und ihrer Rotation relativ zur Erde (Bewegung des Satelliten in der Bahn)

Zwei Arten von Bahnen: umlaufende und geostationäre



Geostationärer Orbit:

Der Satellit bewegt sich in großer Höhe (ca. 35,790 km) über dem Äquator genauso schnell wie die Erde so dass er über einem festen Punkt zu stehen scheint. Die Umlaufzeit beträgt daher ca. 24 Stunden.

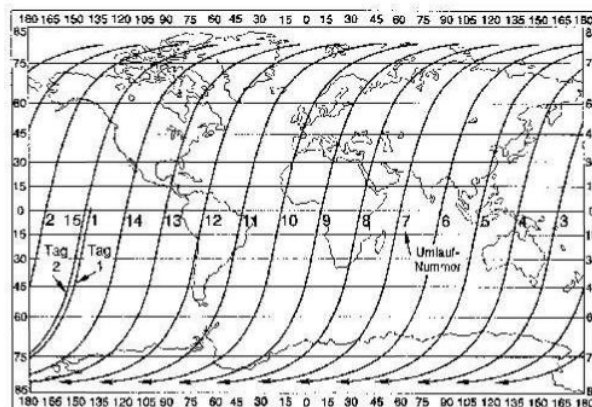
Beispiel: Wetter- und Telekommunikationssatelliten

Die Satellitenbahn behält ihre Lage im Raum bei, die Erdoberfläche hingegen wandert wegen der Erdrotation darunter hindurch. Die Bodenspuren der aufeinanderfolgenden Umläufe sind daher etwas gegeneinander versetzt, so dass die gesamte Erdoberfläche aufgenommen werden kann.

Inklination: Der Winkel zwischen Bahn- und Äquatorebene heißt Inklination i . Er gibt an, bis zu welchen Breiten ein Satellit fliegt.

Polarumlaufender Orbit:

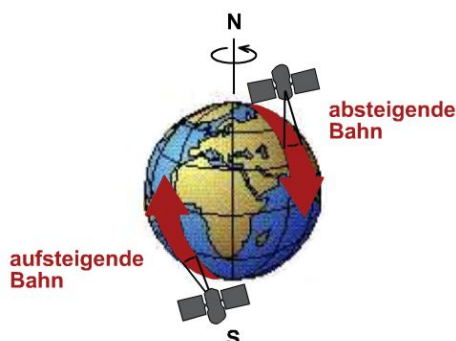
Diese Satelliten befinden sich in ca. 700 bis 800 km Höhe. Ihre Umlaufbahnen haben eine Inklination nahe 90° und werden daher auch als polnah bezeichnet. Die Bahnen liegen sonnensynchron, d.h. die Satelliten überqueren jeden Ort der Erde täglich etwa zur selben lokalen Zeit. Das verschafft gleichbleibende Aufnahmebedingungen.



Bodenspuren für die Satelliten Landsat 1-3
 [Bähr 1985]

Aufsteigende und absteigende Bahn

Der Satellit bewegt sich auf einer Seite der Erde nach Norden (aufsteigende Bahn) und auf der anderen Seite Richtung Südpol (absteigende Bahn). Wenn die Umlaufbahn sonnensynchron ist, ist die aufsteigende Bahn des Satelliten meist auf der sonnenabgewandten Seite der Erde und die absteigende auf der sonnenzugewandten.



Aufsteigende und absteigende Bahn eines polarumlaufenden Satelliten

3.2.2 Analoge Aufnahmesysteme im Weltraum

Die photographischen Systeme auf Satellitenplattformen sind heute durch die elektronischen Systeme überholt.

Eigenschaften:

- Standardisierte Bildformate, Kamerakonstanten und Auswertegeräte.
- Zur Erstellung topographischer Karten (vor allem in Entwicklungsländern).
- Photogrammetrie aus dem Weltraum bei Zielmaßstäben von 1:50.000 und kleiner ist schneller und wirtschaftlicher als aus dem Flugzeug.
- Die meisten Missionen hatten jedoch nur experimentellen Charakter (nur die Sowjetunion hat die Missionen mit hoher Auflösung fortgeführt).
- Nutzung von Stereoskopie (photogrammetrische Auswertung möglich).

Datenübertragung

- Filmabwurf
- Transport über Raumfähren

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • gute geometrische Auflösung 	<ul style="list-style-type: none"> • schlechte spektrale Auflösung (Film) • Umständliche Datenübertragung • nur Kurzmissionen

Tabellarische Übersicht (analoge Kamerasysteme):

Land	Kamera	Auflösung(en) [m]	Spektralbereich [µm]	Bildformat [cm] (Bodenfläche [km])	Kamerakonstante [cm]	Flughöhe [km]	Bemerkungen
Russland	KFA-1000	4 - 6 6 - 10	0.450 - 0.70 0.570 - 0.810	30 x 30 bis 217 x 217	100	240	Kurzmissionen Filmabwurf
	MK-4	8 - 12 6 - 8 6 - 8 12-15	0.515 - 0.565 0.635 - 0.690 0.810 - 0.900 0.580 - 0.800	18 x 18 (160 x 160)	30	240	Stereo
	KATE-200	15 - 30	0.500 - 0.600 0.600 - 0.700 0.700 - 0.900	18 x 18 (225 x 225)	20	240	
USA	LFC =Large Format Camera	10 x 10 20 x 20	0.400 - 0.900	23 x 46	30.5	240 - 370	Stereoskopie Bildbewegungs- kompensation Reseau
Europa (ESA)	Metric Camera	20 x 20	0.53 - 0.70 o. 0.53 - 0.90	23 x 23	30.5	250	Zeiss RMK Stereoskopie

Links: <http://www.sovinformsputnik.com/index.html>

3.2.3 Elektronische Aufnahmesysteme im Weltraum

Möglichkeiten der digitalen Datenübertragung:

- **unmittelbar**
nur für einen relativ kleinen Bereich in der Umgebung der Empfangsstation (Horizont)
- **über Zwischenspeicher auf der Plattform**
Empfang auch von Gebieten, welche außerhalb des Antennenbereichs der Empfangsstation liegen
- **indirekt, über Relais-Stationen** (kein Zwischenspeicher notwendig)

Problem und Engpass bei der Datenübertragung ist die Beschränkung der Datenrate (ca. 200 MB/s). Die Steigerung der Bildauflösung ist daher weniger ein Problem des Sensors als ein Problem der schnellen Datenübermittlung und Speicherung.

3.2.4 Bildauflösung

Im Folgenden wird die Bildauflösung elektronischer Aufnahmesysteme auf Satellitenplattformen behandelt. Es werden 4 verschiedene Arten von Auflösungen unterschieden:

Spektrale Auflösung:

Bezieht sich auf die Wellenlängenbereiche, die ein Sensor aufnehmen kann. Je höher die spektrale Auflösung, desto schmaler ist der Wellenlängenbereich für einen bestimmten Kanal (ein bestimmtes Band). Bei hoher spektraler Auflösung können einzelne Objekte besser erkannt und spektral unterschieden werden. Kanal 3 des Landsat TM Sensors beispielsweise hat eine hohe spektrale Auflösung, weil er in dem engen Bereich von 0,63 - 0,69 μm aufnimmt.

Räumliche („geometrische“) Auflösung:

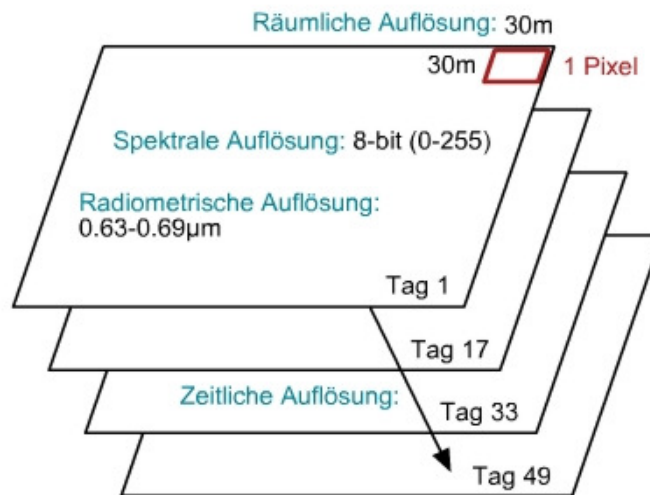
Bezieht sich auf die kleinste Fläche am Boden, über die das von einem Sensor erfasste radiometrische Signal integriert wird („Pixelgröße am Boden“; „Bodenauflösung“). Sie ist abhängig von den Merkmalen des Sensors und der Höhe der Plattform. Zum Beispiel: Meteosat: 1000m; SPOT: bis 10m

Radiometrische Auflösung:

Sie beschreibt den dynamischen Bereich oder die Anzahl der Grauwerte, die zur Aufzeichnung der Strahlungsenergie für eine einzige Messung verwendet werden. Je feiner die radiometrische Auflösung, desto besser können kleine Unterschiede in reflektierter/emittierter Energie gemessen werden. Geläufig: 8 bit, d.h. 0-255 Grauwerte

Zeitliche Auflösung:

Die zeitliche Auflösung kennzeichnet den zeitlichen Abstand, der zwischen zwei Aufnahmen desselben Gebietes mit einem Sensor liegt. Er hängt also maßgeblich von der Umlaufbahn des Satelliten ab.



Landsat ETM+ Kanal 3:
4 Arten der Auflösung

3.3 Photographische Systeme

Bei photographischen Aufnahmesystemen wird das aufzunehmende Objekt durch ein Objektiv auf eine lichtempfindliche Schicht projiziert. Diese Schicht wird durch die Belichtung so verändert, dass durch den photographischen Prozess ein dauerhaftes Bild entsteht.

Während Schwarzweißfilme nur Grauwerte speichern, bestehen Farbfilme aus drei lichtempfindlichen Schichten, die jeweils in einem anderen Spektralbereich empfindlich sind.

Filme zeigen im Wesentlichen vier Unterscheidungskriterien:

- spektrale Empfindlichkeit
- Schwarzweißfilm - Farbfilm
- Kontrast
- Auflösungsvermögen

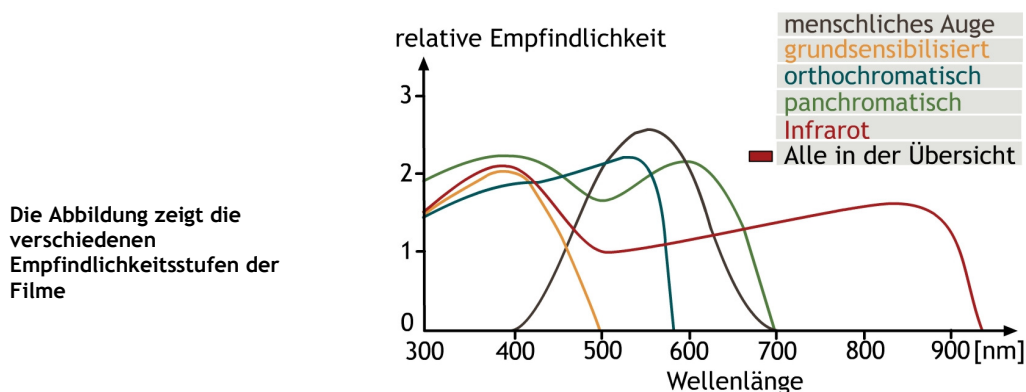
3.3.1 Spektrale Empfindlichkeit

In der Photographie kann Strahlung im sichtbaren Licht und nahen („photographischen“) Infrarot mit der Wellenlänge von 0,4 bis 1,0 μm aufgenommen werden. Da die Schichten von Schwarzweiß- und Farbfilmen von Grund auf nur für kurzwelliges Licht bis etwa 0,5 μm empfindlich sind, werden sie durch Zusatzstoffe für längerwelliges Licht sensibilisiert. Im Folgenden werden die verschiedenen Filmtypen und ihre spektralen Empfindlichkeiten vorgestellt.

Grundsensibilisierte und Orthochromatische Schichten sind nur blau- bzw. blau-grünempfindlich. Durch den Wegfall des Roteinflusses (Dunkelkammer-Rotlicht) kommt es zu einer besseren Unterscheidung im blau-grün Bereich.

Panchromatische Schichten geben alle Spektralbereiche des sichtbaren Lichtes wieder. Alle Farben werden in ihren natürlichen Grautönen wiedergegeben.

Infrarotempfindliche Schichten sind auch im sichtbaren Bereich empfindlich. Will man eine reine Infrarotaufnahme, muss man durch einen Infrarotfilter belichten.



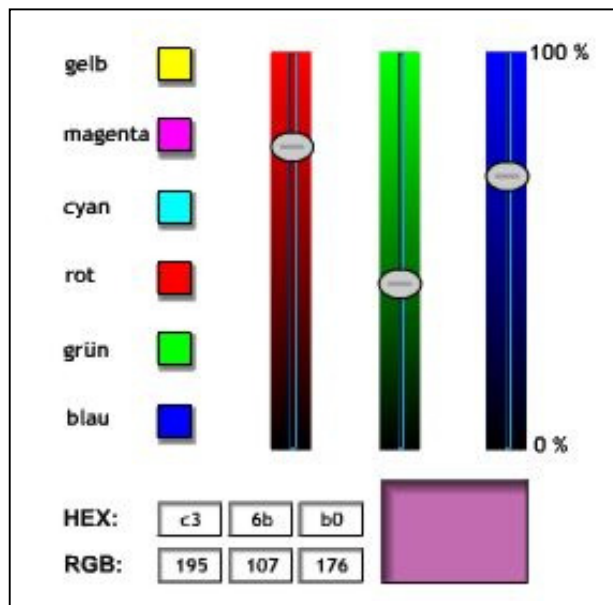
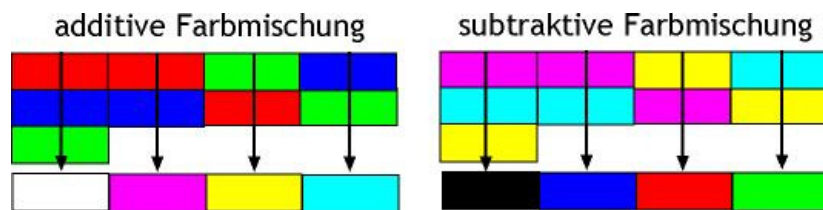
Farbfilme und Farbinfrarotfilme werden hauptsächlich für die Luftbildinterpretation eingesetzt, bisher weniger für photogrammetrische Kartenherstellung.

3.3.2 Farbfilme

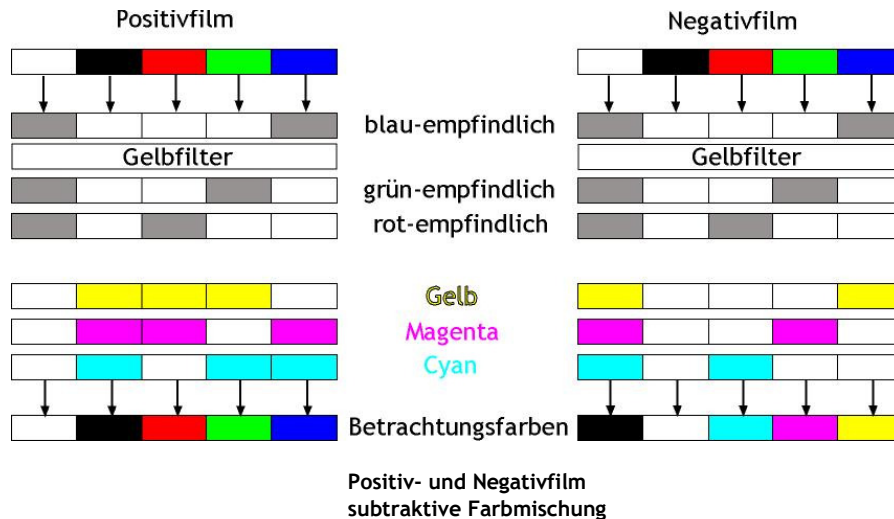
Farbmischung

Das sichtbare Licht lässt sich in drei Grundfarben zerlegen: in Blau, Grün und Rot. Durch Addition der Grundfarben lassen sich alle anderen Farben mischen. Dies nennt man **additive Farbmischung**. Werden alle drei Grundfarben mit gleichem Anteil gemischt, entsteht weiß.

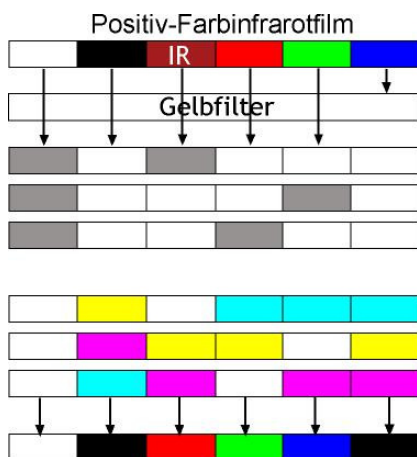
Werden nur zwei Farben in gleichem Verhältnis gemischt, entsteht die sogenannte Komplementärfarbe zu der Farbe, die nicht mit vermischt wurde. Die weggelassene Farbe wurde sozusagen von weiß subtrahiert. So entstehen die Farben: gelb, magenta, cyan. Mischungen mit den Komplementärfarben nennt man **subtraktive Farbmischungen**.



Farbfilme besitzen, anders als Schwarzweißfilme, drei lichtempfindliche Schichten, die jeweils für einen anderen Spektralbereich empfindlich sind. Die oberste Schicht ist für blaues Licht empfindlich. Da aber alle drei Schichten für blaues Licht empfindlich sind, wird zwischen der obersten und mittleren Schicht eine Gelbfilterschicht gesetzt, die das blaue Licht von den tieferen Schichten fernhält. Die mittlere Schicht ist grün-, die unterste rotempfindlich. Jede Schicht enthält Farbkuppler für die jeweiligen Komplementärfarbe, mit der beim **Negativfilm** der belichtete, beim **Positivfilm** der nicht belichtete Teil eingefärbt wird. Beim Negativfilm entsteht erst durch ein Kopierprozess ein positives Bild.



Beim Farbinfrarotfilm werden die Schichten so sensibilisiert, dass der Infrarotbereich rot, der rote Bereich grün und der grüne Bereich blau wiedergegeben wird. So entsteht eine für den Betrachter völlig unnatürliche Farbwiedergabe. Man spricht in diesem Fall auch von einem Falschfarbenbild.



Farbinfrarotbild vom 30.7.1984 zur Waldschadenserhebung in Vorarlberg. [Kraus, 1994]

Gesunde Fichten erscheinen in starkem Rot, kranke Fichten in blassen Rottönen. Absterbende Bäume werden in Grau bis Blaugrün wiedergegeben.

3.3.3. Gradation (Schwärzungskurve)

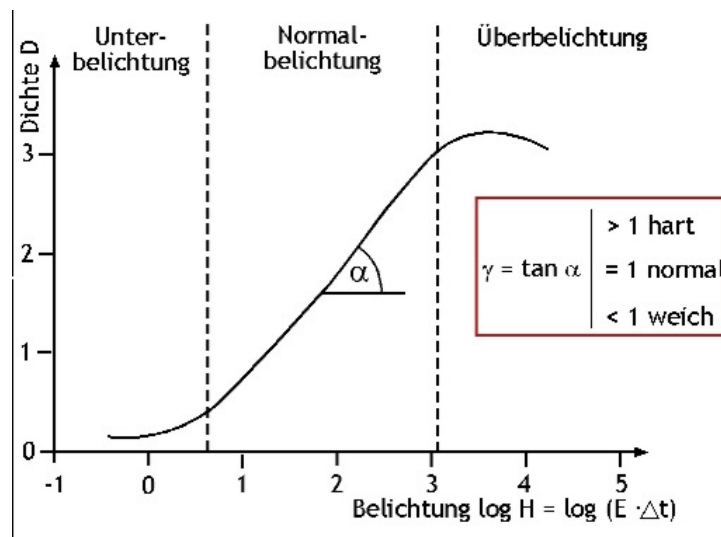
Die Gradation stellt einen Zusammenhang zwischen der **Belichtung H** und der **Dichte D** (Schwärzung) eines Filmes dar. Die Belichtung H ist das Produkt aus der **Beleuchtungsstärke E** [lx = Lux] und der Belichtungszeit t [s].

$$H = E \cdot \Delta t$$

Ein Maß für die Schwärzung gewinnt man durch den Vergleich eines auf einen Film auffallendes Lichtstromes Φ_0 mit dem vom Film nicht absorbierten Anteil Φ . Das Verhältnis Φ_0/Φ heißt **Transparenz τ** . Der Logarithmus von $1/\tau$ ist schließlich die Dichte D.

$$D = \log 1/\tau = \Phi/\Phi_0 = \log (E \Delta t)$$

Den Zusammenhang zwischen der Belichtung und der Dichte lässt sich in der Schwärzungskurve erkennen. Nur im linearen Mittelteil werden Kontraste der Objekte in Schwärzungsunterschieden wiedergegeben, welche für quantitative Weiterverarbeitung nutzbar sind.



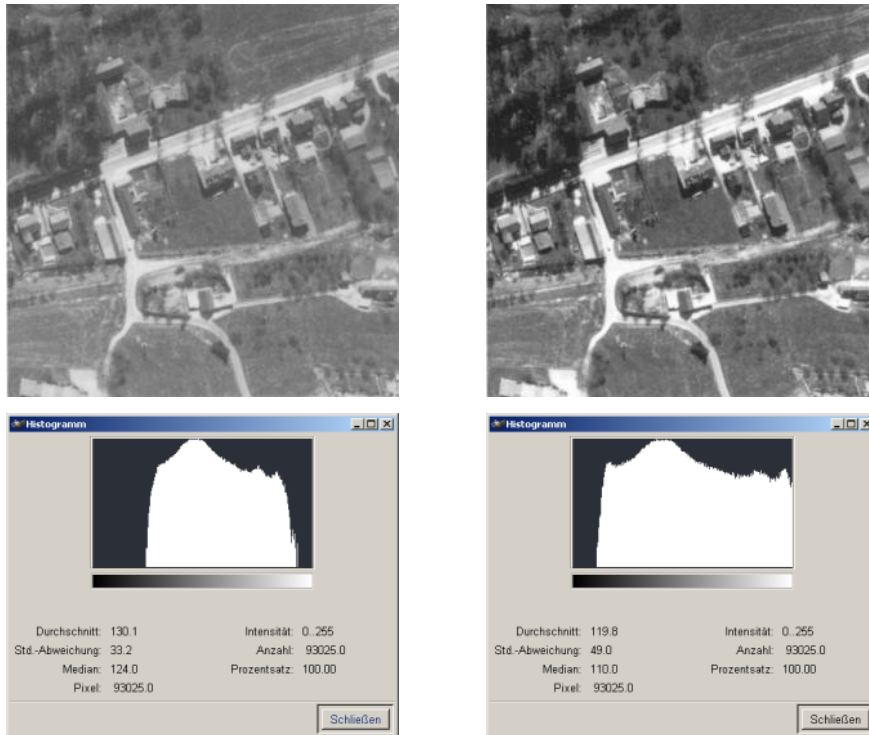
Schwärzungskurve: Zusammenhang zwischen Dichte und Belichtung

Die Gradation $\gamma = \tan \alpha$ zeigt an, wie kontrastreich das Bild wiedergegeben wird. Der Kontrast hängt also direkt mit der Steigung der Kurve zusammen.

Ist $\gamma < 1$, so spricht man von weichen Schichten, die zu kontrastarmen Bildern führen. Bei $\gamma = 1$, bzw. $\gamma > 1$ spricht man von normalen, bzw. harten Schichten, die zu kontrastreichen Bildern führen.

Beispiel der Auswirkung verschiedener Gradationen

Gezeigt werden zwei Luftbilder. Das linke wurde mit weich, das rechte mit hart arbeitendem Photomaterial aufgenommen:



Während der Kontrast mit der Steigung der Schwärzungskurve zusammenhängt, ist die Empfindlichkeit von der Lage der Kurve abhängig. Sie gibt an, welche Lichtmenge für eine bestimmte Schwärzung erforderlich ist. Die Empfindlichkeit eines Filmes wird nach der deutschen Norm DIN /Deutsches Institut für Normung) oder der amerikanischen Norm ASA (heute: ANSI = American National Standards Institute) angegeben. Die internationale Norm ISO (International Standards Organisation) kombiniert beide Normen (Beispiel: ISO 100/21°). Folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Werte:

DIN	12	15	18	21	24	27	30	33
ASA	12	25	50	100	200	400	800	1600

Ein Film mit doppeltem ASA-Wert bedeutet, dass er halb so lang belichtet werden muss.

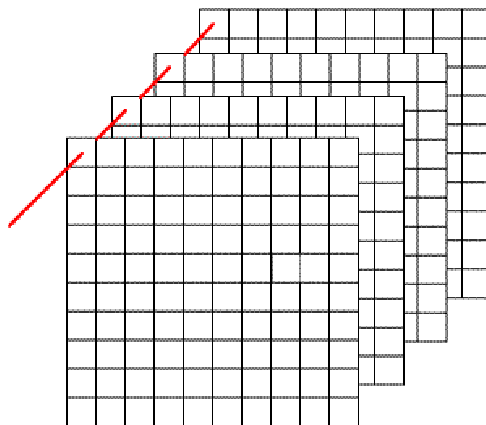
3.4 Abtast-Systeme (Scanner)

Abtaster (Scanner) nehmen, anders als photographische Systeme, nur ein kleines Flächenelement auf (Sensorelement SEL aus Halbleitermaterial). Um ein größeres Bild zu bekommen, müssen viele Beobachtungen gemacht und zusammengesetzt werden. Man unterscheidet zwischen opto-mechanischen und opto-elektronischen Scannern.

Ein großer Vorteil der Scanner ist die Möglichkeit viele schmalbandige Spektralbereiche (Kanäle oder Bänder) gleichzeitig aufzunehmen. Die so entstehenden Multispektralbilder lassen viel mehr Interpretationsmöglichkeiten zu als z. B. photographische Farbbilder mit nur 3 breitbandigen Kanälen.

3.4.1 Kanäle

In den Kanälen werden für die Intensität der Strahlung Grauwerte vergeben („Quantisierung“) und digital als Pixel gespeichert. Geläufig sind 8 Bit, also Werte von 0 bis 255. Üblicherweise werden mehrere Spektralbereiche aufgezeichnet (Landsat TM hat 7 Kanäle). Jeder Kanal wird innerhalb einer eigenen Bildmatrix abgelegt und stellt somit eine eigene Ebene dar (s. Abb.).



$$\underline{x}_{i,j} = (x_1, x_2, x_3, x_y)_{i,j}$$

Jeder Kanal wird in einer eigenen Bildmatrix gespeichert und stellt eine Ebene dar.

Die Kanäle von Landsat TM mit Anwendungsbeispielen sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

Kanal	Spektralbereich [μm]	Anwendung
1	0.45 - 0.52	Anwendung für Küstengewässer, Verschmutzungen; Unterscheidung von Boden und Vegetation
2	0.52 - 0.60	Hauptsächlich zur Untersuchung von Vegetation (kleines Maximum der Reflexion in Kanal 2, Minimum in Kanal 3 und hohe Reflexion in Kanal 4)
3	0.63 - 0.69	
4	0.76 - 0.90	
5	1.55 - 1.75	Feuchtigkeitsindikator für Böden und Vegetation
6	10.40 - 12.40	Thermalkanal
7	2.08 - 2.35	Unterscheidung von Gesteinen (geolog. Anwendungen)

Kanalkombinationen

Durch die Vergabe der Farben rot, grün und blau an drei verschiedene Kanäle und deren Überlagerung entsteht durch additive Farbmischung ein Farbbild. So können leicht interpretierbare Ergebnisse erreicht werden. Im Folgenden sind Beispiele verschiedener Kanalkombinationen einer einzigen Landsat TM Aufnahme vom Raum Karlsruhe dargestellt:



Rot=Kanal 3,
 Gruen=Kanal 2,
 Blau=Kanal 1



Rot=Kanal 4,
 Gruen=Kanal 3,
 Blau=Kanal 2



Rot=Kanal 5,
 Gruen=Kanal 4,
 Blau=Kanal 3

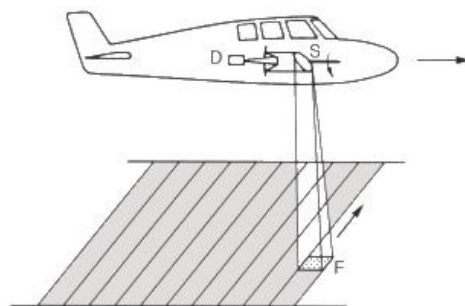


Rot=Kanal 7,
 Gruen=Kanal 4,
 Blau=Kanal 1

3.4.2 Opto-mechanische Scanner

Beim opto-mechanischen Scanner wird die elektromagnetische Strahlung durch ein Spiegelsystem auf einen Detektor fokussiert und durch diesen in ein elektrisches Signal umgewandelt. Die Signale werden dann digitalisiert und gespeichert.

Durch das Rotieren der Spiegel quer zur Flugrichtung wird die Geländeoberfläche zeilenweise abgescannt. Durch Vorwärtsbewegung des Flugzeuges entstehen kontinuierliche Bildstreifen.



Zeilenabtastung mit einem opto-mechanischen Scanner.

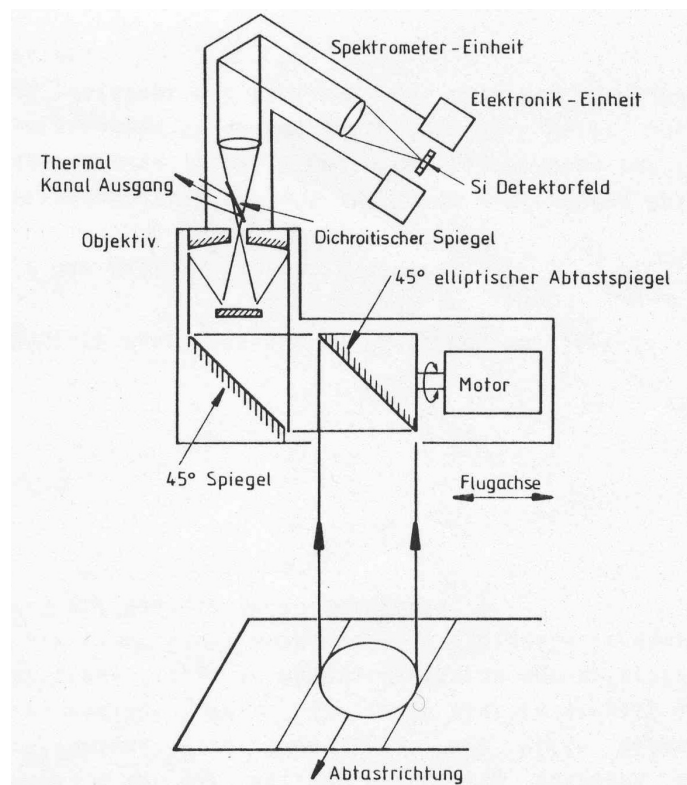
F = beobachtetes Geländeelement

S = rotierender Spiegel

D = Detektor

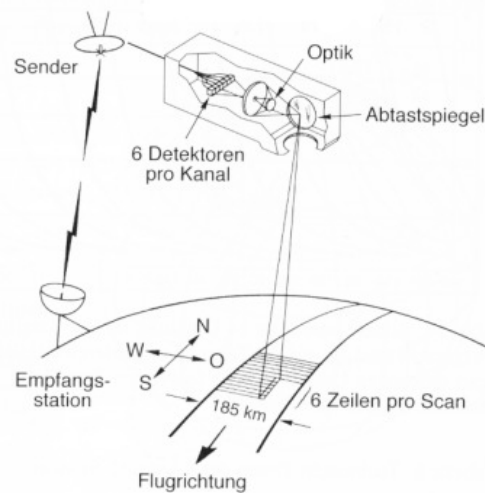
[Albertz 2001]

Man unterscheidet zwischen einkanaligen und multispektralen Systemen. Einkanalige Systeme besitzen nur einen Detektor und werden normalerweise zur Aufnahme der Thermalstrahlung benutzt. Bei multispektralen Systemen wird die empfangene Strahlung durch Filter, Prismen oder Gitter in Spektralbereiche (Kanäle) zerlegt. Jeder Spektralbereich wird durch einen eigenen Detektor aufgenommen und abgespeichert.



Funktionsweise eines opto-mechanischen Scanners
 [Pfeiffer 1983; nach Higham, Wilkinson, Kahn 1973]

Bekannte Vertreter der opto-mechanischen Scanner sind die Sensoren der Satelliten Landsat. Beim Multispektralscanner (MSS) der Satelliten Landsat 1-3 werden durch Oszillation eines Spiegels gleichzeitig 6 Zeilen in vier Kanälen aufgenommen. Es wird die aufzunehmende Strahlung also gleichzeitig auf 24 Detektoren fokussiert (Bodenauflösung 56×79 m).



Schematische Darstellung der Aufnahme mit dem Landsat MSS-System
 [Albertz 2001]

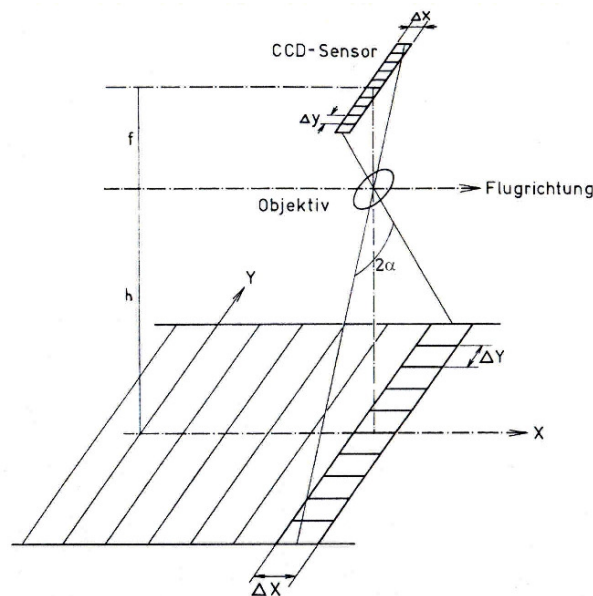
Der Thematic Mapper (TM) der in den Satelliten Landsat 4 und 5 zum Einsatz kommt, erfasst sogar 16 Zeilen gleichzeitig und nimmt 6 Kanäle auf (Bodenauflösung 30×30 m, thermal 120×120 m).

Der Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) von Landsat 7 hat einen weiteren Kanal und eine verbesserte Bodenauflösung (15 m im panchromatischen Bereich, 60 m im Thermalkanal).

3.4.3 Optoelektronische Scanner

Bei optoelektronischen Scannern wird die Aufnahme durch zeilenweise angeordnete Halbleiter-Sensorelemente (SEL) erzielt. Solche „Charge Coupled Devices“ wandeln Strahlungsenergie in elektrische Ladungen im Halbleitersubstrat um. Die Ladungen werden ausgelesen und digitalisiert. Durch die zeilenweise Anordnung der CCD-Sensoren in der Bildebene eines Objektivs quer zur Flugrichtung wird das Gelände streifenweise aufgenommen. Der Vorteil dieser Technik ist, dass eine komplette Zeile zugleich aufgenommen wird. Daher sind die geometrischen Eigenschaften der Bilddaten im Vergleich zu den opto-mechanischen günstiger.

Die Anordnung mehrerer Sensorzeilen erlaubt ebenfalls die Aufnahme multispektraler Bilder.



Optoelektronische Aufnahme mit einem CCD-Sensor.
 Alle Bildelemente einer Zeile werden gleichzeitig aufgenommen. Durch die Wahl der Brennweite f und der Flughöhe h können der Öffnungswinkel α und die Pixelgröße am Boden variiert werden.

3.5 Radar

Die Systeme der Mikrowellenfernerkundung unterscheiden sich grundlegend von den bisher beschriebenen Aufnahmeverfahren bezüglich Aufnahmetechnik, verwendeter elektromagnetischer Strahlung, sowie physikalischer Parameter.

In der Mikrowellenfernerkundung wird elektromagnetische Strahlung im Bereich von 1cm bis 1m benutzt. Sie kann bis zu einem gewissen Grade Wolken durchdringen und ist unabhängig von Beleuchtung und atmosphärischen Bedingungen wie z.B. Dunst.

1. Passive Systeme:

- messen die von der Geländeoberfläche emittierten Mikrowellen
- die von einem Objekt emittierte Energie ist abhängig von Temperatur und Wassergehalt
- Anwendungen: Meteorologie, Hydrologie und Ozeanographie
- Sensoren: Radiometer und Scanner (ähnliche Funktionsweise wie VIS und IR Sensoren)

2. Aktive Systeme:

- senden Mikrowellen zur Erdoberfläche und erfassen die reflektierte Strahlung
- 2 Kategorien: abbildende und nicht-abbildende Systeme (imaging und non-imaging)
- Abbildendes System: RADAR
- Nicht-abbildende Systeme: Altimeter, Scatterometer

Radar ist die Abkürzung für **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging. Radar ist ein System zur Ortung (detection) und (Distanz-)Messung (ranging). Der Sensor strahlt Mikrowellen zur Erdoberfläche aus und misst die zurückkommende Strahlung. Die Stärke der Rückstrahlung und die Zeitverzögerung zwischen Aussenden und Empfangen des Signals bestimmen die Distanz zum Objekt.

Radarsensoren wurden ursprünglich für militärische Zwecke entwickelt (2. Weltkrieg). Das System wird im Folgenden näher erklärt.

Vorteile und Nachteile von Radarsystemen:

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Die Systeme sind wetterunabhängig, da die großen Wellenlängen kaum von Atmosphäre gestört werden und daher Wolken, leichten Regen und Schnee durchdringen können. • unabhängig von Sonnenstrahlung, daher Aufnahmen bei Tag und Nacht möglich. • Eindringtiefe erlaubt Informationen über Oberflächenschicht von einigen mm bis m Dicke. • Informationen über Wasserhaushalt möglich, da die Emission und Reflexion von Mikrowellen hauptsächlich von den elektrischen Materialeigenschaften ("Dielektrizität") abhängen. 	<ul style="list-style-type: none"> • grobes Auflösungsvermögen • Emissionen sind gering, daher Überlagerungen mit anderen Strahlungsquellen möglich • Radarsignale enthalten keine eindeutigen spektralen Eigenschaften (nur Unterschied in Topographie und Feuchtigkeitsgehalt) • komplizierte Auswertung und kostenintensiv

Die Einsatzgebiete von Radarsystemen sind vielseitig durch ihre Unabhängigkeit von Wetter und Sonnenstrahlung, aber auch wegen der besonderen Eigenschaften von Mikrowellen, die Beobachtungen unter einer Vegetationsdecke (z.B. Wald) oder einer dünnen Bodenschicht, sowie über den Wasserhaushalt erlauben. Radarsysteme werden in Ozeanographie, Hydrologie, Geologie, Glaziologie, sowie Landwirtschaft und Forstwesen verwendet.

3.5.1 Radargleichung

Ein Radarsystem erfasst die Stärke der aufgenommenen zurückgestreuten Energie. Die physikalischen Zusammenhänge zwischen ausgesendeter und empfangener Energie können durch die Radargleichung ausgedrückt werden:

$$P_r = \frac{G^2 \lambda^2 P_t \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

Wobei

P_r reflektierte Leistung

P_t Sendeleistung

G Antennengewinn (= Erhöhung der Leistungsdichte durch gerichtete Abstrahlung der Energie)

λ Wellenlänge

σ Rückstrahlfläche (Funktion der Objektcharakteristika und der Größe des bestrahlten Gebietes)

R Entfernung Antenne - Objekt

3 Faktoren bestimmen die Rückstreuung:

- **Systemparameter:** Wellenlänge, Antenne, Polarisierung
- **Systemgeometrie:** Radarpuls, Einfallswinkel, Depressionswinkel, Entfernung (bestimmt die Größe des bestrahlten Gebietes)
- **Objektparameter:** Oberflächenrauigkeit, Oberflächenform und -material, Topographie, Orientierung zum Sensor, Dielektrizitätskonstante

Ein Radarbild besteht aus Pixeln; jedes Pixel gibt die Radarrückstrahlung in Grauwerten wieder für ein bestimmtes Gebiet auf der Erdoberfläche. Dabei repräsentieren dunkle Pixel auf einem Radarbild Gebiete mit geringer Rückstrahlung, helle Pixel Gebiete mit hoher Rückstrahlung.

3.5.2 Funktionsweise eines Radars

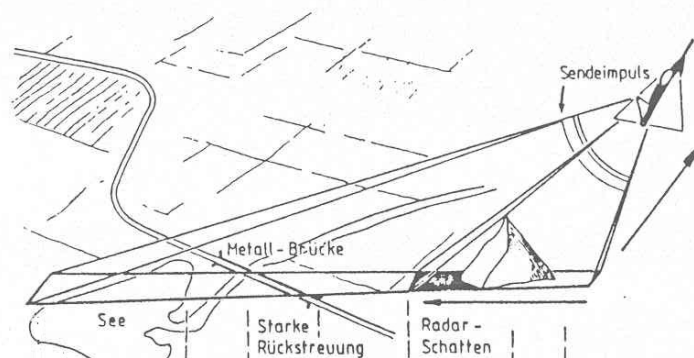
Ein Radargerät besteht aus Transmitter, Empfänger, Antenne und Aufnahmegerät.

1. SLAR:

= Sidelooking Airborne Radar (Seitensicht radar)

Ein SLAR gehört zu den Real Aperture Radar-Systemen (RAR). Der Transmitter generiert kurze Mikrowellenpulse in regelmäßigen Intervallen die über die Antenne schräg nach unten ausgesendet werden. Der Anteil der reflektierten Strahlung, der zur Antenne zurückkehrt (=Radarecho) wird in Form von Signalen empfangen, registriert und in ein Bild umgesetzt.

Die geometrische Auflösung wird bestimmt von der Größe der beobachteten Fläche und ist eine Funktion der Impulslänge und der Breite der Radarkeule.



Aufnahmeprinzip eines SLAR [nach Sabins 1978]

Die Dauer des ausgesandten Mikrowellenimpulses bestimmt die Auflösung quer zur Flugrichtung (range resolution). Je kürzer der Impuls, desto höher ist die Auflösung.

Die Breite des Radarstrahles bestimmt die Auflösung in Flugrichtung (azimuth resolution), ist also eine Funktion der Baulänge der Antenne. Sie ist direkt proportional zur Wellenlänge und umgekehrt proportional zur Antennenlänge; je länger die Antenne, desto enger wird die Radarkeule und damit verbessert sich die Auflösung:

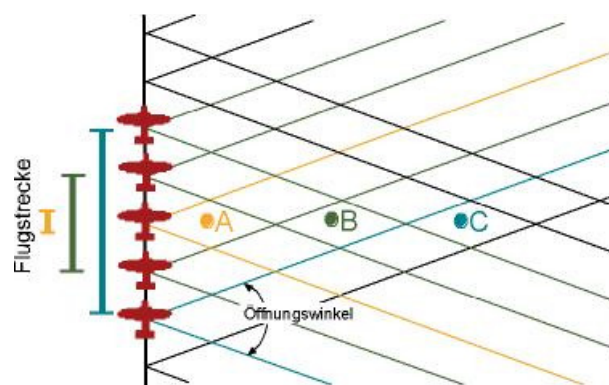
$$\beta = \frac{\lambda}{A} \quad , \text{ wobei } \beta = \text{Breite der Radarkeule, } \lambda = \text{Wellenlänge und } A = \text{Antennenlänge}$$

Aus praktischen Gründen kann die Baulänge nicht beliebig gesteigert werden, daher eignet sich ein SLAR nur für geringe Flughöhen, bei denen die Entfernung zwischen Antenne und Gelände nicht zu groß ist.

2. SAR:

= Synthetic Aperture Radar (Synthetische Apertur)

Mit einer synthetischen Apertur kann eine höhere Auflösung in Flugrichtung erreicht werden. Es wird dabei nur eine kurze Antenne verwendet, die die Mikrowellenimpulse in einer kurzen Keule mit einem bestimmten Öffnungswinkel ausstrahlt. SAR beruht darauf, dass jedes Objekt vom Radar über eine bestimmte Zeit hinweg erfasst wird während es in der Flugbahn liegt. Die empfangenen Reflexionssignale werden dann miteinander korreliert. Einzelne Geländepunkte werden daher mehrmals bestrahlt (siehe Abb). Je weiter sie von der Antenne weg sind, desto häufiger werden sie abgebildet. Die max. Länge der Antenne wird durch die Flugstrecke bestimmt, bei der ein Zielpunkt gerade noch im Radarstrahl bleibt.



Funktionsweise eines SAR [nach Albertz 2001]

Der nahe gelegenen Punkt A wird nur einmal, Punkt C dagegen 5 mal während einer Flugstrecke erfasst.

Doppler-Effekt:

Weil sich das SAR relativ zum Boden bewegt unterliegen die Echos dem Doppler-Effekt (höhere Frequenzen wenn es sich auf ein Objekt zubewegt, niedrigere wenn es sich wegbewegt), wie man es auch beim Vorbeifahren eines Autos mit Sirene beobachten kann. Die Variation in der Doppler Frequenz eines jeden Punktes auf dem Bild wird korreliert und die korrekte relative Position des Objekts wird errechnet.

Durch diese Rekonstruktion kann eine lange Antenne nachgeahmt werden. Allerdings ist der technische Aufwand größer als beim SLAR, erlaubt jedoch auch Aufnahmen von Satelliten aus.

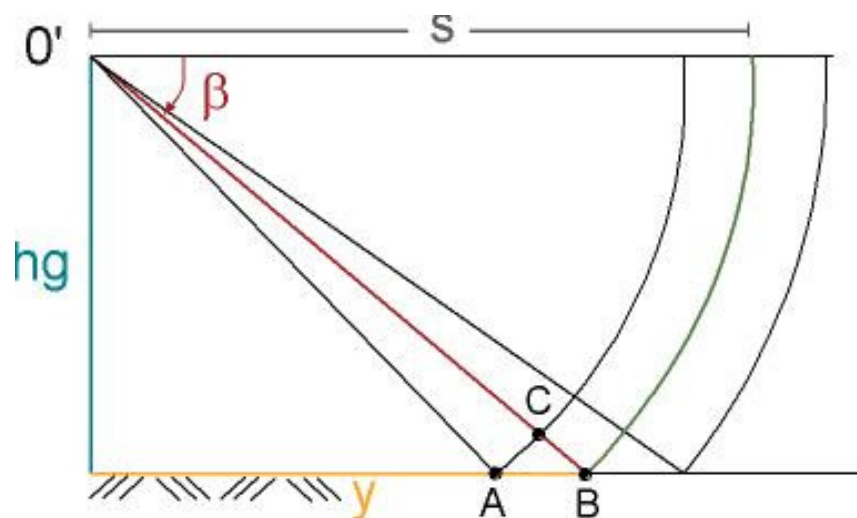
3.5.3 Radargeometrie

Der Seitensichtcharakter des Radarsystems bringt es mit sich, dass Objekte in **Schrägentfernung** aufgezeichnet werden. Das hat geometrische Verzerrungen zur Folge. Daher bestimmen der Einfallswinkel und das Relief die Bildgeometrie. In stark unebenem Gelände, z.B. im Gebirge, sind Verzerrungen besonders stark. Die Folge davon sind **layover-** und **foreshortening-Effekte**, sowie **radar shadow**.

Im Folgenden soll der Unterschied zwischen Schrägentfernung und Horizontalentfernung (slant range und ground range) erklärt werden, sowie layover, foreshortening und Radarschatten.

a. Schrägentfernung - Horizontalentfernung

Definitionen:



$$s = \sqrt{y^2 + hg^2} \quad \text{Schrägentfernung (slant range), gemessen}$$

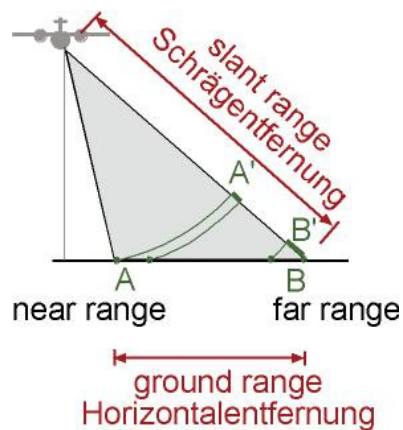
$$y = \sqrt{s^2 - hg^2} \quad \text{Horizontalentfernung (ground range)}$$

$$\beta = \arccos \frac{y}{s} \quad \text{Depressionswinkel}$$

$$90 - \beta \quad \text{Streifwinkel}$$

Schrägentfernung (slant range): bezeichnet die von der Antenne gemessene Entfernung an jedem Punkt der Erdoberfläche der im Radarstrahl liegt. Eine nahe gelegene Geländestrecke wird von der Wellenfront schneller durchlaufen als eine entfernt gelegene, sie wird also im Schrägentfernungsbild verkürzt wiedergegeben. Daher wird der Abbildungsmaßstab in Querrichtung vom Nahbereich (near range) zum Fernbereich (far range) größer. Die der Antenne am nächsten gelegenen Bereiche erscheinen gestaucht.

Horizontale Entfernung (ground range): die aus der Schrägentfernung abgeleitete Horizontale Entfernung. Die Laufzeitunterschiede in slant range werden durch Korrekturverfahren kompensiert.



Schrägentfernung und Horizontale Entfernung:

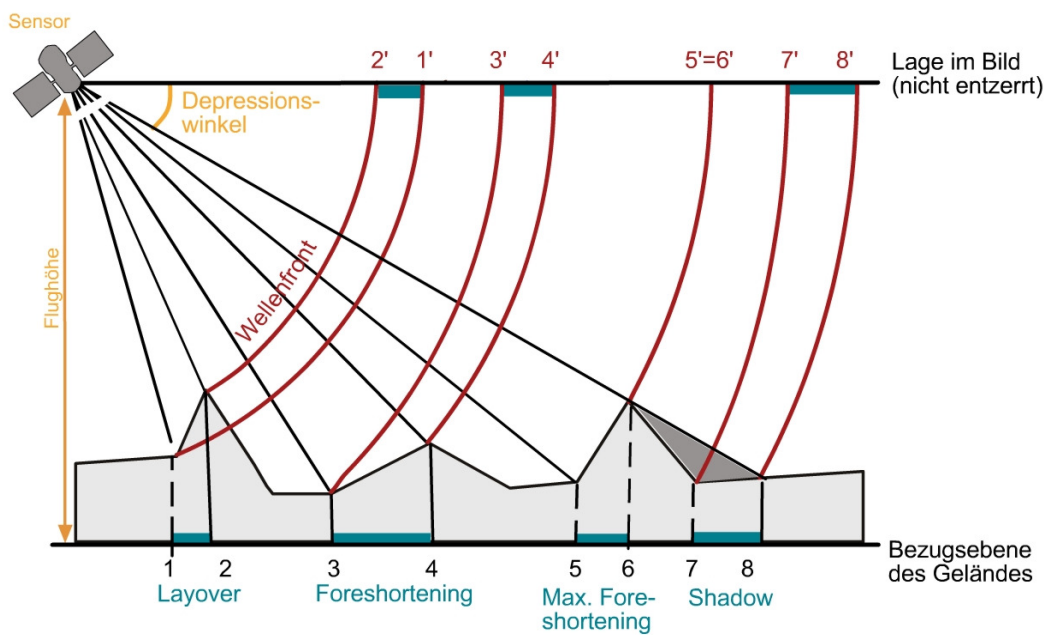
Die Entfernungen A und B sind gleich. In Schrägsicht jedoch erscheinen Entfernungen in naher Reichweite (near range) (siehe A') geringer als in far range (siehe B'); das bewirkt eine Stauchung.

b. Foreshortening, layover, radar shadow

Geländepunkte, die in der Bezugsebene liegen, werden grundrisstreu abgebildet. Zur Antenne hin orientierte Geländeflächen werden verkürzt dargestellt (**engl. foreshortening**) (siehe Strecke 3'4'). Höhere Geländepunkte werden dadurch zum Radarsystem hin versetzt. Im Extremfall werden die Signale gleichzeitig empfangen (siehe Strecke 5-6), man spricht von maximaler Verkürzung.

Bei steilen Hängen (wenn Depressionswinkel größer als Hangneigung) erreicht das Radarsignal vom Gipfel früher das Radarsystem als das vom Fußpunkt des Berges; so entsteht eine **Überlagerung (Umklappung) (engl. layover)** (siehe Strecke 2'1').

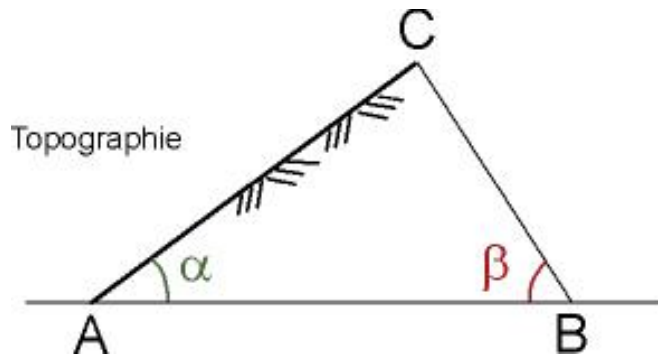
Wird die vom Sensor abgewandte Seite des Hanges und ein Teil des anschließenden Geländes nicht von einer Radar-Wellenfront getroffen und deshalb nicht wiedergegeben, spricht man von **Radarschatten (engl. radar shadow)** (Bereich 7'-8' im Bild). Radarschatten kann vorteilhaft sein, weil er den Reliefeindruck verstärkt. In reliefstarken Gebieten wirkt er sich jedoch nachteilig aus. In diesen Gebieten wird daher die Aufnahme aus großer Flughöhe und mit einem steilen Radarstrahl gewählt, damit wenig Überlagerungen auftreten.



Radarbilder: Foreshortening, Layover und Radarschatten

Zur Verdeutlichung:

Umklappung (Layover):



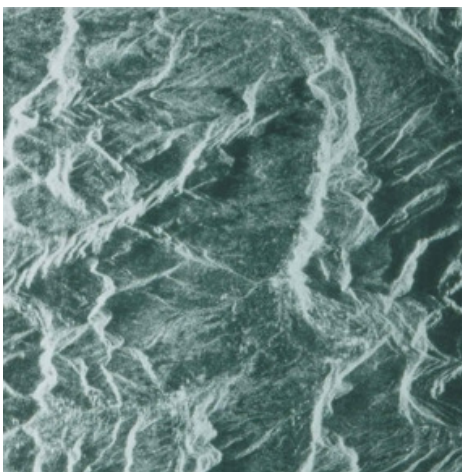
Modellvereinfachung: \overline{AB} sei eine gerade Linie (kein Kreissegment)

dann ist für:

- $\alpha + \beta = 90^\circ$ gleichzeitige Erfassung von A und B
- $\alpha + \beta < 90^\circ$ keine Umklappung (B wird früher erfasst als A)
- $\alpha + \beta > 90^\circ$ Umklappung (B wird später erfasst als A)

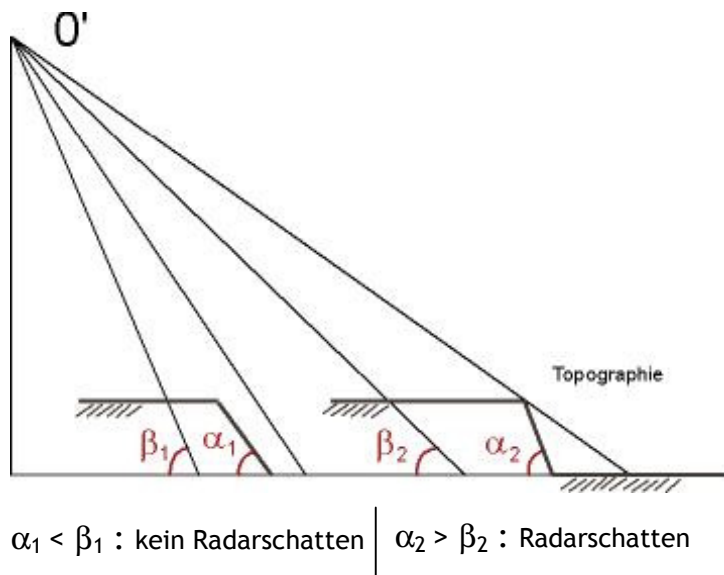
Foreshortening:

Die Strecke \overline{AB} wird verkürzt dargestellt aufgrund der in jedem der 3 Fälle verkürzten Laufzeiten des Impulses zwischen A und C aufgrund der topographischen Verhältnisse.

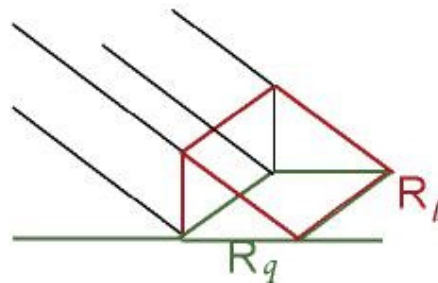


Die Abbildung links zeigt den foreshortening-Effekt (Verkürzung) in gebirgigem Gelände. Hänge in near-range werden verkürzt dargestellt, die abgewandten Seiten verlängert. Die Satellitenbahn lag links vom Bild.
 Seasat, Gebiet Mont Blanc

Radarschatten:



c. Geometrische Auflösung bei Radar



R_q Auflösung am Boden quer zur Flugrichtung

R_l Auflösung am Boden in Flugrichtung

$$R_q \approx \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cos \beta}$$

Δt Dauer Radarimpuls

$$R_l \approx \frac{s \cdot \lambda}{l}$$

l wirksame Antennenlänge (vgl. SAR [Kapitel 3.5.2](#))

Die geometrische Entzerrung von Radarbildern ist ein sehr komplexes, aufwendiges Problem. Voraussetzung sind die Elemente der inneren und äußeren Sensororientierung sowie ein digitales Geländemodell.

3.5.4 Radiometrische Eigenschaften von Radarbildern

Diese sagen etwas aus über die Objekte an der Erdoberflächen durch Interpretation des Radarsignals bzw. den Grauwert eines Bildpunktes. Die Rückstrahlung ist von mehreren Faktoren abhängig:

1. Mikrowellenspektrum:

Das Radarspektrum umfasst den Bereich von 1mm bis 1m. Es werden mehrere Bänder unterschieden, deren Codes aus dem 2. Weltkrieg stammen. Die Wechselwirkungen mit verschiedenen Materialien sind je nach Band unterschiedlich.

Bandbezeichnung	Wellenlänge
Ka	0.75 - 1.18 cm
K	1.18 - 1.67 cm
Ku	1.67 - 2.40 cm
X	2.40 - 3.75 cm
C	3.75 - 7.50 cm
S	7.50 - 15 cm
L	15 - 30 cm
P	60 - 300 cm

fett = die am häufigsten genutzten Bänder



SAR-Radarbilder, Solothurn, Schweiz: Unterschiede im Rückstrahlverhalten

Linke Aufnahme: X-Band, 3 cm

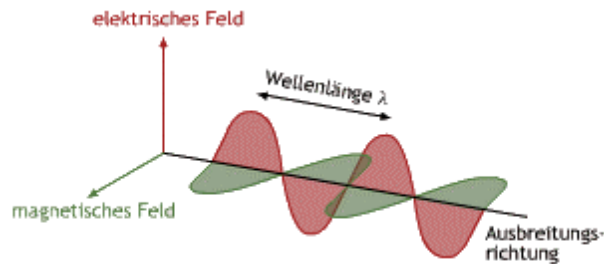
Rechte Aufnahme: P-Band, 70 cm

Die Ackerflächen sind im X-Band in verschiedenen Grautönen wiedergegeben, im P-Band dagegen wirken sie viel glatter und erscheinen im Bild dunkel. Andererseits durchdringt die langwellige Strahlung des P-Bandes den Baumbestand viel besser und Boden und Baumstämme tragen zur Rückstrahlung bei.

[Albertz, 2001]

2. Polarisation:

Sie kennzeichnet die Orientierung des elektrischen Feldes einer elektromagnetischen Welle. Die von der Antenne gesendeten Mikrowellen können **horizontal (H)** oder **vertikal (V)** polarisiert sein und wiederum als horizontale oder vertikale Wellen empfangen werden:

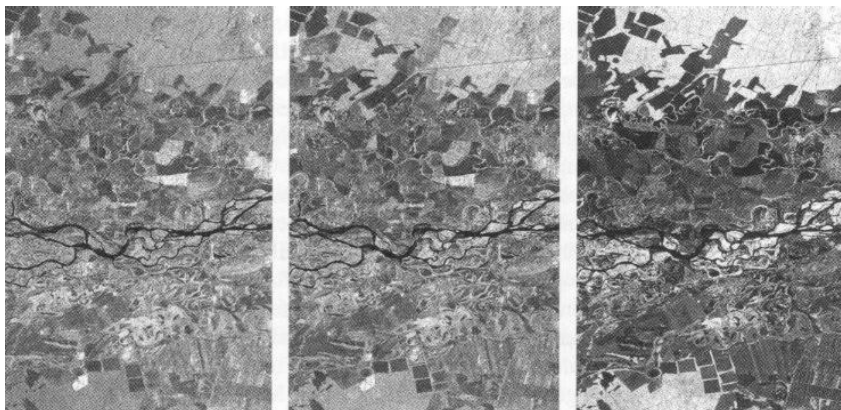


Vier Kombinationen sind möglich:

- **Gleichpolarisation** (=like-polarisation)
 HH - Horizontale Aussendung, horizontaler Empfang
 VV - Vertikale Aussendung, vertikaler Empfang
- **Kreuzpolarisation** (=cross-polarisation)
 HV - horizontale Aussendung, vertikaler Empfang
 VH - vertikale Aussendung, horizontaler Empfang

Effekt der Polarisation: Vertikal stehende Objekte (z.B. Getreide) strahlen VV-Polarisation gut zurück, wohingegen HH durchgelassen wird und mit dem Boden darunter reagiert.
 → je nach Anwendung ist Polarisation zu wählen

- VV-Anwendung: Ozeanwellen
- HH-Anwendung: Bodenfeuchtigkeit, Unterscheidung von Meereis und Wasser (Kontrast besser weil HH insensitiver ist für kleine Wellen)



SIR-C Radarbild in 3 verschiedenen Polarisationsarten (L-Band): nahe Baikalsee.

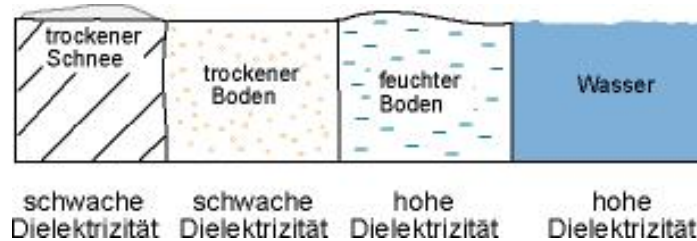
Links: VV-Polarisation Mitte: HH-Polarisation Rechts: HV-Polarisation

Bei HH-Polarisation ist die Rückstreuung vor allem der Waldflächen höher. Bei der HV-Polarisation tritt ein höherer Kontrast zwischen Vegetation und unbewachsenen Feldern auf.

[Albertz, 2001]

3. Dielektrizität:

Die Dielektrizitätskonstante ist ein Maß für die elektrische Leitfähigkeit einer Substanz. Sie wächst fast linear mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt, d.h. je höher der Feuchtigkeitsgehalt, desto größer ist die Konstante.



Dielektrizität verschiedener Objekte der Erdoberfläche

starke Reflexion = metallische Objekte (Eisenbahnschienen, Hochspannungsleitungen), hoher Wassergehalt (feuchter Boden)

schwache Reflexion = Sand, Schnee, trockene Flächen

Die Dielektrizitätskonstante gibt Auskunft über die Eindringtiefe:

hoch = starke Reflexion, geringe Eindringtiefe

niedrig = schwächere Reflexion, höhere Eindringtiefe

Bei rauen Oberflächen ist die Rückstreuung umso größer, je größer die Dielektrizitätskonstante (helle Pixel im Bild); also erscheint z.B. feuchter Boden heller als trockener Boden

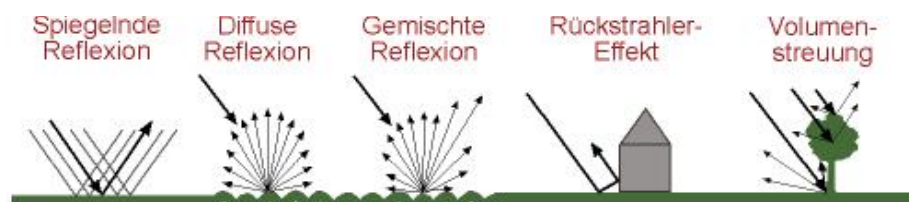
Achtung: glatte Oberflächen allerdings, auch wenn sie hohe Leitfähigkeit haben, sind im Radarbild dunkel, da sie spiegelnd reflektieren (z.B. glatte Wasserflächen) (siehe unten).

4. Rückstreuung und Reflexion:

Radarrückstreuung (=backscatter) ist abhängig von

- Oberflächenbeschaffenheit des Objektes (Geometrie, elektrische Leitfähigkeit, spektrale Merkmale)
- Einfallswinkel, Wellenlänge und Polarisierung

Folgende Arten sind zu unterscheiden:



Glatte, feuchte Flächen (wie Wasser) wirken wie ein Spiegel; Radarimpulse werden vom Sensor weg reflektiert, erscheinen daher dunkel im Radarbild. Wasserwellen dagegen leiten Radarsignale, aus denen Wellenspektren ableitbar sind.

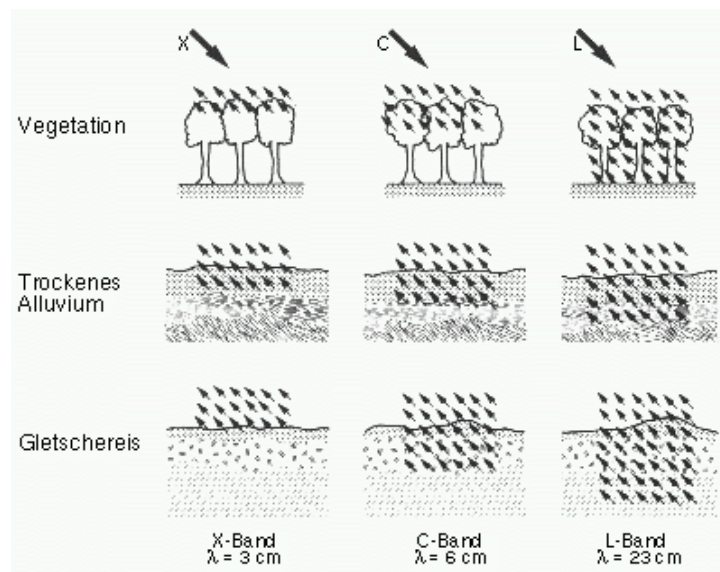
Volumenreflexion (volume scattering):

Diffuse Reflexion, die innerhalb eines Objektes stattfindet. Sie wird hervorgerufen durch Diskontinuitäten im Objekt (verschiedene Brechungsindizes).

5. Eindringtiefe

Wie tief die Mikrowellen in die Objekte eindringen können ist abhängig von der Wellenlänge und der Dielektrizitätskonstanten der Oberflächenschicht:

- eine abnehmende Dielektrizitätskonstante bedeutet, dass das Reflexionsvermögen abnimmt und damit die Eindringtiefe zunimmt
- zunehmende Wellenlänge bedeutet zunehmende Eindringtiefe
- je steiler der Einfallswinkel des Sensors, desto größer ist die Eindringtiefe



Wechselwirkung zwischen Mikrowellen und Erdoberfläche in Abhängigkeit von Wellenlänge und Leitfähigkeit
 [Albertz 2001]

6. Oberflächenrauigkeit:

- = Maß für die Unregelmäßigkeiten einer Oberfläche; abhängig von der Wellenlänge und dem lokalen Einfallswinkel
- Die Wellenlänge des Radarstrahls bestimmt die relative Oberflächenrauigkeit der Zielfläche und damit die Intensität der Rückstreuung, d.h. die Oberfläche wirkt rauer, je kleiner die Wellenlänge ist (nach Rayleigh-Kriterium)

7. Orientierung des Sensors:

- Zeilenstrukturen an der Oberfläche, die parallel zur Flugrichtung, also senkrecht zur Einfallrichtung liegen, werden betont, z.B. Straßen, Ackerfurchen usw.
- Orientierung der Oberfläche relativ zur Radarwelle wirkt sich auf die Rückstrahlung aus: Es kommt zu Reliefverzerrungen bei Orientierung quer zur Flugrichtung

8. Speckle Effekt:

Dieser Effekt ist eine Besonderheit von Radarbildern. Als Speckle wird eine körnige Struktur in Radarbildern bezeichnet, die aufgrund der Kohärenz der Strahlung auftritt. Sie schränkt damit die Erkennbarkeit von Objektdetails ein.

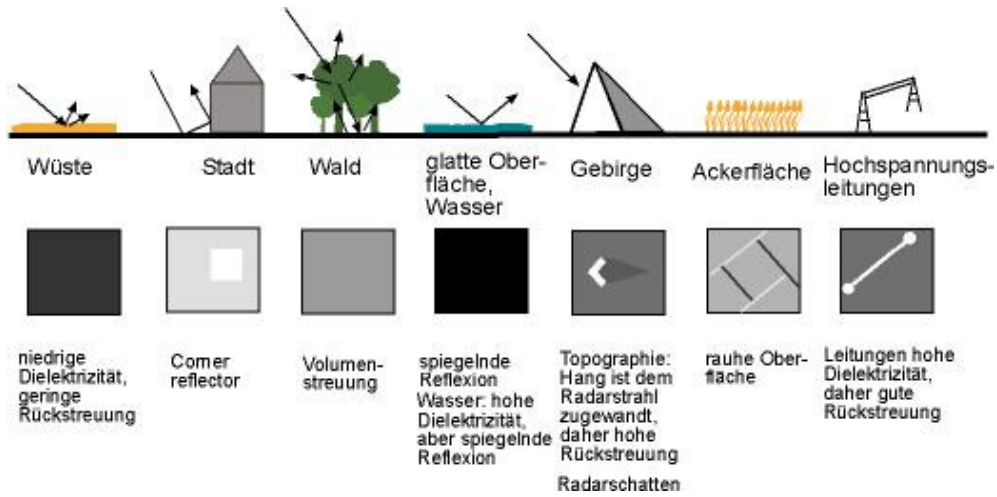
Ursache für den Speckle-Effekt sind Interferenzerscheinungen: Es gibt Bildpunkte bei denen sich durch Wechselwirkungen von Radarstrahlung mit der Oberfläche die zurückgestreuten Wellen der Strahlung zufällig auslöschen und welche, bei denen sie sich überlagern (Interferenzmaxima). Diese Wechselwirkungen rufen Phasendifferenzen in den Wellen hervor.

Das führt dazu, dass ein homogenes Objekt auf der Erdoberfläche, das einheitliche Grauwerte zeigen müsste, Pixel besitzt, die heller oder dunkler sind als der durchschnittliche Grauwert.

Speckle ist im Wesentlichen eine Form von Rauschen, die die Qualität eines Radarbildes herabsetzt und die Interpretation schwieriger macht. Daher wird Speckle vor der Interpretation und Analyse des Bildes reduziert. Es gibt verschiedene Methoden ein Speckle Muster abzuschwächen (z.B. Filterung oder Multi-look processing), jedoch bedeutet das immer einen gewissen Informationsverlust.

Zusammenfassung

Die folgende Abbildung zeigt die Radarrückstreuung verschiedener Oberflächen und ihr Aussehen im Radarbild:



3.5.5 Weitere Radaranwendungen

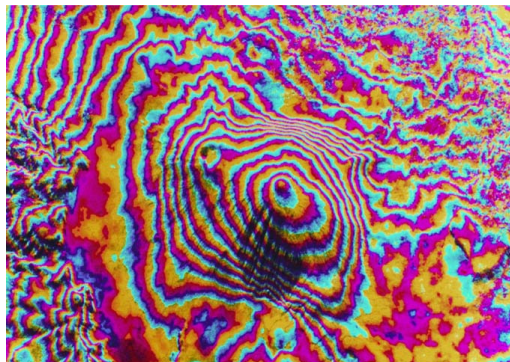
1. Stereo Radar:

Dabei werden Stereoradarbilder aufgenommen, die dasselbe Gebiet aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufnehmen. Die eine Antenne sendet Mikrowellen zur Erdoberfläche aus, wo sie reflektiert werden. Diese und eine zweite Antenne empfangen "stereo" die zurückkommenden Signale. Durch die unterschiedliche Position der beiden Empfangsantennen ergibt sich ein Zeitunterschied in den empfangenen Signalen, aus dem mit aufwendigen Rechen- und Korrekturverfahren die Geländehöhe errechnet werden kann.

Beispiel: Das SRTM-Radarsystem (Shuttle Radar Topography Mission)

2. Interferometrie:

Diese Methode bedient sich der Phaseninformation einer Mikrowelle. Wenn zwei Wellen mit der gleichen Wellenlänge ausgesandt werden, wobei eine mit einem leichten Versatz emittiert wird, bekommt man eine Phasendifferenz zwischen den beiden Wellen. Dieser Abstand zwischen den Wellen kann durch 2 Antennen auf der gleichen Plattform oder durch zwei unterschiedliche Umlaufbahnen erreicht werden. Die Messung der Phasendifferenz der beiden zurückgestrahlten Wellen erlaubt es, Entfernungsunterschiede vom Bruchteil einer Wellenlänge (cm) zu ermitteln. Daraus können Geländemodelle errechnet werden, aber auch zeitliche Veränderungen im mm- und cm-Bereich (Gletscherbewegung, Vulkanismus, Hangrutschungen, Erdbeben, Senkungen etc.) erfasst werden. Die Darstellung erfolgt in sogenannten Interferogrammen.



Interferogramm
[DLR - <http://www.dlr.de>]

3.5.6 Anwendungsbeispiele (Radar allgemein)

- Ozeanographie: Monitoring von Meereis, Wellenbeobachtung, Küstenbeobachtung (Erosion), Windgeschwindigkeiten über Meer
- Glaziologie: Gletscherbewegungen
- Bodenfeuchte
- Katastrophenmanagement: Erdbeben, Vulkanausbrüche, Flut, Waldbrände, Ölverschmutzung
- Kartographie
- Geologie: Lineamente, Oberflächenstruktur, Oberflächendeformation, Gesteine
- Hydrologie: Monitoring von Feuchtgebieten und Schneebedeckung, Überschwemmungen
- Landnutzung: Ertragsvorhersage, Bodenfeuchte
- Forstwirtschaft: Abholzung, Biomasse
- Digitale Geländemodelle

3.5.7 Auswahl einiger Radarsysteme

Satellitengetragene Radarsysteme:

Seasat (USA) 1978 L-Band SAR (23.5 cm) HH-Polarisation Auflösung: ca. 25 m	JERS-1 (Japan) 1992 - 1998 L-Band SAR (23.5 cm) HH-Polarisation Auflösung: ca. 18 m
ERS-1 (Europa) 1991 - 1999 C-Band SAR (5.6 cm), Polarisation: VV Auflösung: ca. 30 m	ERS-2 (Europa) seit 1995 C-Band SAR (5.6 cm), Polarisation: VV
Radarsat 1 (Kanada) seit 1995 C-Band SAR (5.6 cm) HH-Polarisation Auflösung: 10 - 100 m	Envisat (Europa) Start 2002 ASAR (Advanced SAR): C-Band SAR (5.66 cm) Polarisation: HH, VV, VH, HV

Space Shuttle Missionen:

SIR-A (1981)	L-Band SAR HH-Polarisation Auflösung: 40 m
SIR-B (1984)	L-Band SAR
SIR-C/X-SAR (1994)	L- und C-Band SAR Polarisation: HH, VV, HV, VH X-Band SAR (3 cm) VV-Polarisation Auflösung: 10 - 25 m
SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (2000)	C- und X-Band SAR Polarisation: HH, VV, HV, VH

Flugzeuggetragene Radarsysteme:

AirSAR (USA) (seit 1988) auf DC-8 C-, L- und P-Band SAR Polarisation: HH, VV, VH, HV Auflösung: ca. 2-8 m	E-SAR (DLR) (seit 1994) auf Dornier DO 228 P-, L-, S-, C-, X-Band SAR Polarisation: HH, VV, VH, HV Auflösung: 0.6 m - > 3 m
---	---

3.6 Qualitätsmaße

3.6.1 Überblick

Nach der „International Standard Organisation“ (ISO) ist Qualität

die Gesamtheit von Merkmalen einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen [ISO 8402, 1994].

Ob Daten und Verarbeitungsverfahren für eine bestimmte Anwendung geeignet („fit“) sind, kann man beispielsweise kontrollieren durch

- Luftbildinterpretation, ob die zu kartierenden Objekte auch abgebildet werden
- Restfehler nach einer relativen Orientierung von Bildpaaren, ob sie innerhalb der vorgegeben Fehlergrenzen bleiben

Dies „fitness for use“ ist also nicht absolut, sondern relativ zu festgelegten Erfordernissen definiert. Für Bilder der Fernerkundung sind wichtige Qualitätsmaße geometrische, radiometrische, spektrale und zeitliche Auflösung. Wiederholungsperioden von Bildern (zeitliche oder temporale Auflösung) sowie die Anzahl der aufgenommenen Farbkanäle (spektrale Auflösung) bedürfen hier keiner besonderen Diskussion. Im Folgenden werden radiometrische Auflösung (Differenz der Quantisierungsstufen/Grauwerte) und geometrische Auflösung (lokale Trennbarkeit von Signalen, Abtastrate) behandelt. Beide sind korreliert.

Zur Kennzeichnung geometrischer Auflösung werden verschiedene Maße benutzt, insbesondere:

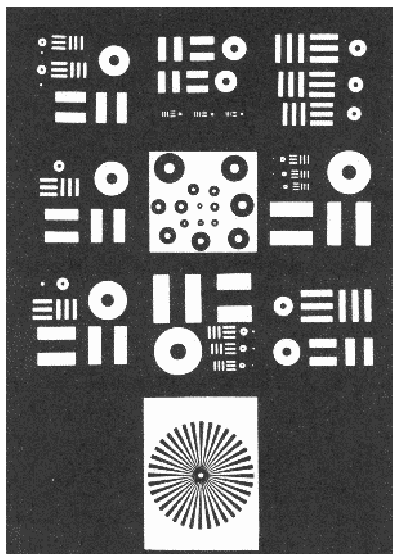
- die in Optik und Photographie gebräuchlichen **Linien pro Millimeter** (L/mm), auch **Linienpaare pro Millimeter** (Lp/mm). Diese Angabe ist ein Frequenzmaß!
- die **Kantenlänge eines Sensorelements** wie in der digitalen Bildverarbeitung üblich. Dabei kann auf die Länge im Bild (in μm) oder des „realen“ Objektes Bezug genommen werden. Im letzteren Fall spricht man in der Regel von „Bodenauflösung“ (in m).

Achtung: Eine strenge Umrechnung von „Linien pro Millimeter“ in „Kantenlänge Sensorelement“ ist nicht möglich.

3.6.2 Konventionelle Bestimmung der geometrischen Auflösung

L/mm gibt an, wie viele Linien man gerade noch unterscheiden kann. Die theoretische Auflösung wird jedoch wesentlich von der Qualität der Optik, vom Kontrastverhältnis und durch den chemischen Entwicklungsprozess beeinflusst.

Das Auflösungsvermögen von Objektiven wird durch Beobachten (optisches Auflösungsvermögen) und photographieren (optisches und photographisches Auflösungsvermögen) von Testtafeln ermittelt.



Testtafel
 [Kraus 1996]

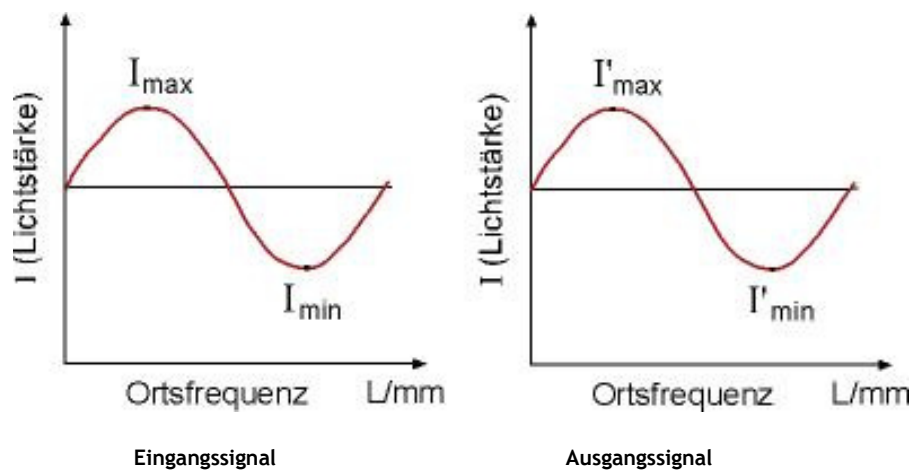
Eine besondere Testtafel ist der „Siemensstern“ (siehe Abbildung unterer Teil), wie er auch in DIN 18716-3 eingeführt wird. Das Auflösungsvermögen (AV) berechnet sich aus dem Durchmesser des Zerstreungskreises, bestimmt durch die Stelle im Siemensstern wo die 64 schwarz-weißen Muster nicht mehr getrennt wahrnehmbar sind:

$$\begin{aligned}
 AV(Lp/mm) &= \frac{n[Lp]}{n d(mm)} = \frac{64}{\pi d} Lp/mm \\
 &= \frac{20}{d} Lp/mm
 \end{aligned}$$

3.6.3 Von Grauwertdifferenzen („Kontrast“) zur Modulationsübertragungsfunktion (MTF)

Das Konzept der MTF ist viel weiter gefasst als das konventionelle Auflösungsmaß des vorausgegangenen Kapitels. Es gilt nicht nur für Bilder sondern für Signale allgemein und liefert gleichzeitig ein strenges Modell für die Signalübertragung. Die MTF wurde in der elektrotechnischen Signalverarbeitung entwickelt.

Definitionen:



Kontrast $C = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}$ normiert auf $I_{\min} = 1$

Dichtedifferenz $D = \log\left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}}\right)$

Modulations- (Kontrast-) Umfang $M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$

Umrechnung:

$$M = \frac{C - 1}{C + 1} = \frac{10^D - 1}{10^D + 1}$$

Kontrast C	Dichtedifferenz D	Modulation M
1000:1	3,0	1,0
100:1	2,0	0,98
10:1	1,0	0,94
5:1	0,7	0,66
2:1	0,3	0,33

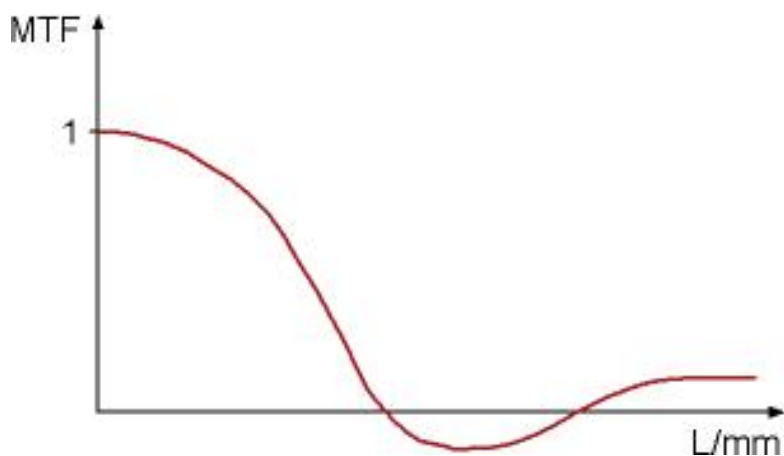
$$MFT = \frac{M_{\text{Ausgang}}}{M_{\text{Eingang}}} = \frac{M'}{M}$$

$$MTF = \frac{I'_{\text{max}} - I'_{\text{min}}}{I'_{\text{max}} + I'_{\text{min}}} \cdot \frac{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}$$

$$0 \leq MTF \leq 1$$

(vgl. Abbildung oben)

Die MFT führt mathematisch auf eine $\frac{\sin x}{x}$ -Funktion (sinc; „gedämpfte Schwingung“)



Jede Systemkomponente hat eine eigene MTF. Bei photographischen Bildern sind solche Systemkomponenten z. B.:

MTF_F	Filmempfindlich- (Körnig-)keit
MTF_B	Bildbewegung
MTF_A	Atmosphäre
MTF_O	Objektiv
etc.	

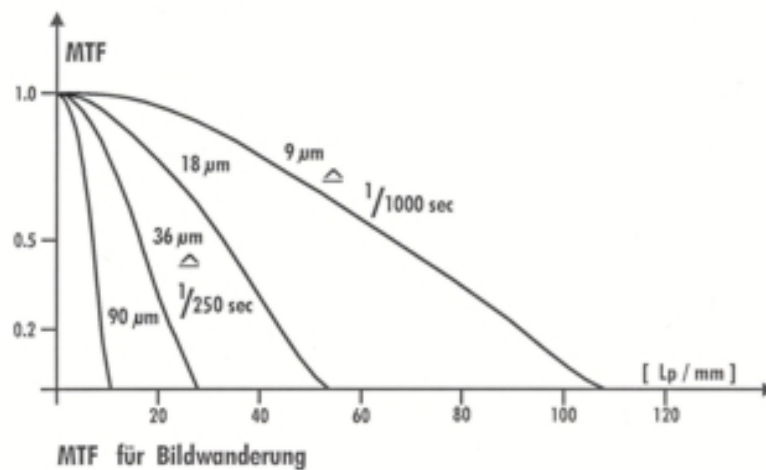
Das Zusammenwirken der Einzelkomponenten wird durch die Multiplikation streng beschrieben:

$$MTF_{gesamt} = MTF_F \cdot MTF_B \cdot MTF_A \cdot MTF_O \cdot \dots$$

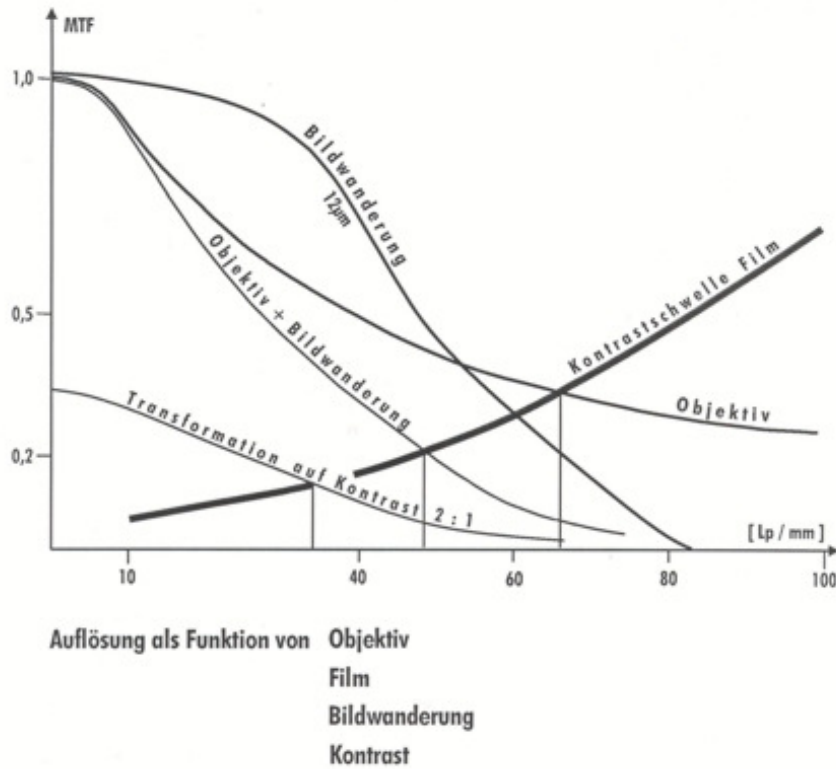
Die verschiedenen Komponenten sind in einigen Fällen gut bekannt, z. B. der Einfluss der Bildbewegung MTF_B :

$$MTF_B = \frac{1}{Lp/mm \cdot w \cdot \pi} \cdot \sin(Lp/mm \cdot w \cdot \pi)$$

wobei w [mm] die Bildwanderung darstellt (z. B. während der Belichtung Δt bei offener Blende).



MTF für Bildwanderung bei verschiedenen Verschlusszeiten (wenn für $v=325 \text{ km/h}$; Bildmaßstab 1:10 000):



Zusammenwirken von Auflösung, Objektiv und Bildwanderung. Die resultierende Bildqualität ist immer schlechter als die schlechteste der einzelnen Komponenten!

Praktisch bestimmt man heute Bildqualität in Form einer MTF über Kantenanalyse. Sie beruht auf einer Faltung mit anschließender Transformation in den Frequenzraum (Fouriertransformation) (vgl. [Kapitel 4.6.2](#))

3.7 Literatur

Albertz, J. 2001: „Einführung in die Fernerkundung“. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.

Bähr, H.-P. 1985: „Digitale Bildverarbeitung: Anwendung in Photogrammetrie und Fernerkundung“. 1. Auflage. Wichmann Verlag, Heidelberg.

Bähr, H.-P. & Vögtle, T. 1991: „Digitale Bildverarbeitung“. 2. Auflage. Wichmann Verlag, Heidelberg.

Campbell, J.B. 1996: „Introduction to Remote Sensing“, 2. Auflage, Taylor & Francis, New York.

DLR - Deutsches Luft- und Raumfahrt Zentrum: HTML: <http://www.dlr.de>. Stand März 2003

Elachi, Ch. 1988: *Spaceborne Radar Remote Sensing - Applications and Techniques*, IEEE Press, New York.

Kappas, M. 1994: „Fernerkundung nah gebracht“. Leitfaden für Geowissenschaftler. Dümmler Verlag, Bonn.

Kraus, K. & Schneider, W. (1988): „Fernerkundung“. Band 2 - Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechnik. Dümmler Verlag, Bonn.

Kraus, K. (1996): „Photogrammetrie“. Band 2 - Grundlagen und Standardverfahren. Dümmler Verlag, Bonn.

Lillesand, T.M. & Kiefer, R.W. 1994: „Remote Sensing and Image Interpretation“, 3. Auflage, John Wiley & Sons, New York.

Pfeiffer, B. 1983: *Dissertation*, Photogrammetrie, Universität Karlsruhe. Erschienen in: Deutsche Geodätische Kommission.

Sabins, F.F 1978: „Remote Sensing, Principles and Interpretation“. San Francisco 1978.

Sovinform Sputnik: HTML: <http://www.sovinform Sputnik.com/index.html>. Stand Nov 2002.

Ulaby, F.T. et al. 1986: *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*. Artech House, Norwood, Ma.