3 Fernerkundung

Die Fernerkundung (*remote sensing*) hat sich in den vergangenen Jahrzehnten innerhalb der Geowissenschaften durch seine rasante technische Entwicklung zu einem wichtigen Hilfsmittel entwickelt.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Einsatzmöglichkeit multifrequenter und multipolarimetrischer Radardaten für die Lokalisierung ehemaliger Flussläufe in Auengebieten der Oder untersucht. Zur Verifikation der Radardaten wurden zusätzlich multispektrale ASTER und Landsat-5-TM-Daten, Laser-Scann-Daten sowie panchromatische und CIR-Luftbilder (*color infrared*) verwendet.

Die Kombination aus multifrequenten und multipolarimetrischen Radardaten mit multispektralen Fernerkundungsdaten und Laser-Scann-Daten stellt zur Zeit eine der fortschrittlichsten Techniken im zivilen Nutzungsbereich der Geoerkundung dar.

3.1 Radarfernerkundung

3.1.1 Einführung

Das Wort Radar ist abgeleitet aus dem englischen ***Ra**dio **D**etection **a**nd **R**anging* und beschreibt die ursprünglich Aufgabe der Lokalisierung und Entfernungsmessung von Objekten mittels Radiowellen.

Radarsysteme arbeiten im Mikrowellenbereich mit einer Wellenlänge von 1 cm bis 1 m, dies entspricht einem Frequenzbereich von 3 GHz bis 0.3 GHz. Im Gegensatz dazu wird der Spektralbereich des sichtbaren Lichts durch Wellenlängen von 0.4 bis 0.6 µm abgebildet. Der Spektralbereich der Mikrowellen wird in sogenannte Bänder unterteilt. Ihre Bezeichnung geht auf eine ursprünglich aus Geheimhaltungsgründen gewählte Codierung zurück und findet noch heute Verwendung (z.B. C-Band).

Mit abbildenden Radarsystemen (*Imaging Radar*) wird eine zweidimensionale Abbildung (CURLANDER & MCDONOUGH 1991) des überflogenen Gebietes ermöglicht. Aus der Rückstreuung des Radarsignals können wichtige Informationen über Rauigkeit, geometrische Struktur und elektrische Eigenschaften der Oberfläche und der unmittelbaren Bereiche unter der Oberfläche abgeleitet werden. Die Rückstreuung ist dabei von der Bodenfeuchte und der Oberflächenrauigkeit abhängig.

Der Einsatz von aktiven Mikrowellensensoren bietet gegenüber den passiven optischen Fernerkundungssystemen in bestimmten Bereichen deutliche Vorteile, die einen komplementären Einsatz der unterschiedlichen Sensoren nahe legen. Im Gegensatz zu passiven Fernerkundungsverfahren, die eine Szene durch Aufnahme des reflektierten Sonnenlichts oder der emittierten Wärmestrahlung abbilden, beleuchten Radarsysteme aktiv eine Szene und nehmen die an der Szene gestreute Strahlung auf. Die Mikrowellenfernerkundung ist damit nahezu unabhängig von Tageszeit und Wetterbedingungen. Ein zusätzlicher

Informationsgewinn gegenüber den optischen Sensoren ist auf die Fähigkeit zurückzuführen, in natürliche Oberflächenmaterialien im beschränkten Maße einzudringen sowie die Oberflächenrauigkeit und den Feuchtigkeitsgehalt des streuenden Mediums widerzuspiegeln.

3.1.2 Grundlagen der Radarfernerkundung

1951 wurde von CARL WILEY das Abbildungsradarsystem mit synthetischer Apertur (SAR: **S**ynthetic **A**perture **R**adar) zum Patent angemeldet. Vorteil dieses Systems gegenüber eines Radarsystems mit ausschließlich realer Apertur (RAR) ist eine wesentliche Verbesserung der geometrischen Auflösung in Azimutrichtung.

Obwohl die Erfindung des SAR-Prinzips bereits mehr als 40 Jahre zurückliegt, wurde erst in den 1980er Jahren mit der Einführung digitaler Technologien in die SAR-Signalverarbeitung die breite Anwendung der SAR-Technik ermöglicht. Flugzeug- und satellitengestützte SAR-Systeme finden seitdem zunehmend Anwendung in der Fernerkundung.

Erst mit den verbesserten technischen Möglichkeiten in der SAR-Signalverarbeitung in den letzten 15 Jahren ist die Verwendung von Inversionsmodellen für die Abschätzung von geophysikalischen Parametern möglich geworden. Es besteht jedoch nach wie vor großer Forschungsbedarf, um operationelle und zuverlässige Verfahren zur Bildklassifizierung und Abschätzung von geophysikalischen Parametern zu etablieren.

3.1.2.1 Interpretation von Radarbildern

Durch die Nutzung verschiedener Bereiche des elektromagnetischen Spektrums unterscheiden sich Radarbilder von optischen Fernerkundungsaufnahmen in vielerlei Hinsicht (Abb. 3.1). Hinzu kommt die unterschiedliche Art der Abbildung, sowie die Verwendung eines kohärenten Sende/Empfangssystems. Um den Inhalt von SAR-Bildern interpretieren zu können, ist daher das Verständnis der Charakteristika von Radarbildern von grundlegender Bedeutung.

Durch die kohärente Aufzeichnung enthalten SAR-Bilder komplexe Werte als Bildinformation. Um zu einer bildlichen Darstellung zu gelangen, benutzt man als Helligkeitswert der Bilder den jeweiligen Betrag der komplexen Werte. Ein typischer Effekt eines kohärenten Abbildungssystems ist die starke Körnigkeit (*speckle*) von flächigen Zielen in den Aufnahmen. Innerhalb eines Auflösungselements tragen alle dort vorhandenen Streuer zur Rückstreuung zum Sensor bei. Der Wert der resultierenden Intensität ist letztendlich ein Zufallswert, der von der jeweiligen Verteilung und Art der Streuungen innerhalb des Bildpunkts abhängt (vgl. Kap. 3.1.2.5 – Abb. 3.8).

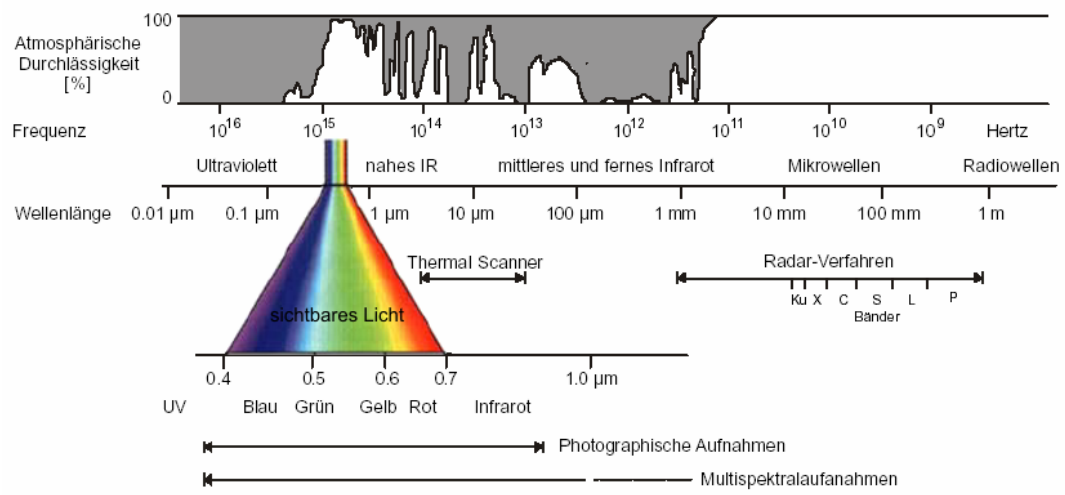


Abb. 3.1: Elektromagnetisches Spektrum und Transmissionsspektrum der Atmosphäre (nach ALBERTZ 1991).

Die Abb. 3.2 zeigt das Erscheinungsbild der Erdoberfläche und der auf ihr befindlichen Oberflächenobjekte für die in dieser Arbeit genutzten unterschiedlichen Fernerkundungssensoren. Im NE dieser Abbildung ist das von einem Wassergraben umgebene Fort Gorgast zu erkennen.

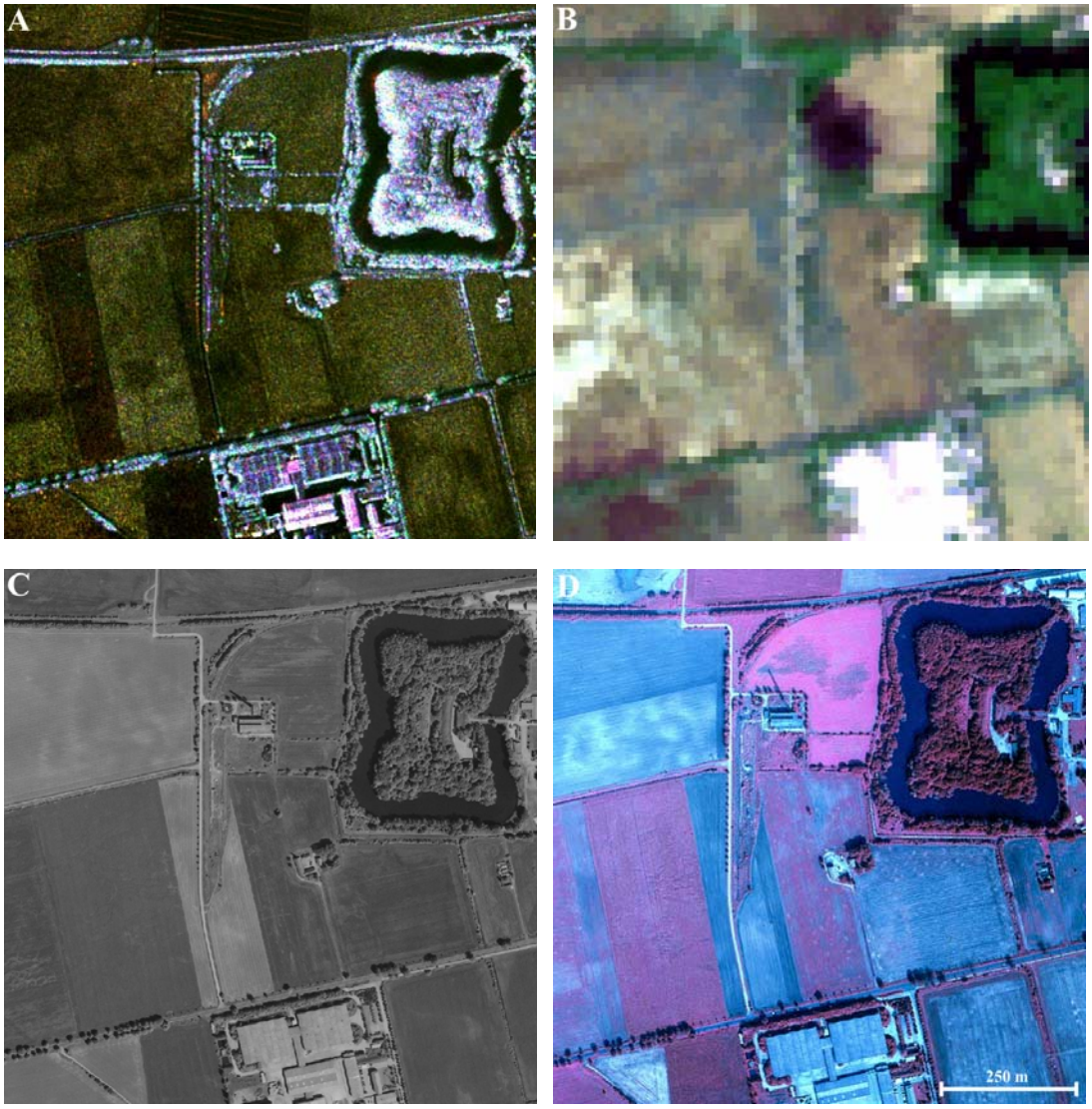


Abb. 3.2: **Erscheinungsbild der Erdoberfläche und der auf ihr befindlichen Oberflächenobjekte für unterschiedliche Fernerkundungssysteme. A) Radar Farbkomposite (E-SAR - L_{VV}, L_{HH}, L_{HV} – August 2001; Auflösung: 1 m / Pixel). B) ASTER Echtfarbkomposite (321 - Juli 2001; Auflösung: 15 m / Pixel). C) Panchromatisches Luftbild (2001; Auflösung: 1 m / Pixel). D) Color Infrared Luftbild (August 2002; Auflösung: 1,3 m / Pixel).**

3.1.2.2 Aufbau eines Seitensichtradars (SLR)

Ein wichtiger registrierter Parameter in der Mikrowellenfernerkundung ist die Laufzeit der ausgesandten Radarstrahlung. Da alle Punkte, die mehr oder weniger senkrecht unter dem Sensor liegen, eine nahezu identische Entfernung vom Sensor haben, besitzen die von diesen Punkten rückgestreuten Signale eine annähernd identische Laufzeit. Dieser Effekt verhindert die Auflösung der Punkte in einem abbildenden Radar. Um diesen Effekt zu vermeiden, werden die Radarwellen senkrecht zur Flugrichtung schräg nach unten abgestrahlt, man erhält ein

Seitensichtradar.

Ein Seitensichtradar mit realer Apertur (SLR: **S**ide **L**ooking **R**adar bzw. SLAR: **S**ide **L**ooking **A**irborne **R**adar) wird bei konstanter Fluggeschwindigkeit betrieben. Dabei steht die Antennenachse senkrecht zum Geschwindigkeitsvektor (Abb. 3.3). Die orthogonalen Bildkoordinaten setzen sich aus Entfernung (engl. *Range*) und Azimut (Flugrichtung) zusammen.

Die Bandbreite der gesendeten Pulse bestimmt die Entfernungsauflösung, während die Azimutauflösung durch die einsetzbare Antennenlänge auf der Trägerplattform (z.B. Flugzeug, Satellit) begrenzt und mit zunehmender Entfernung schlechter wird. SLAR-Systeme erweisen sich daher für große Flughöhen als unbrauchbar. Betrachtet man z.B. ein SLAR-System auf einem Satelliten (Bahnhöhe 800 km, Azimutantennenlänge 15 m, C-Band), so beträgt die Azimutauflösung nur etwa 3 km (MOREIRA 2001).

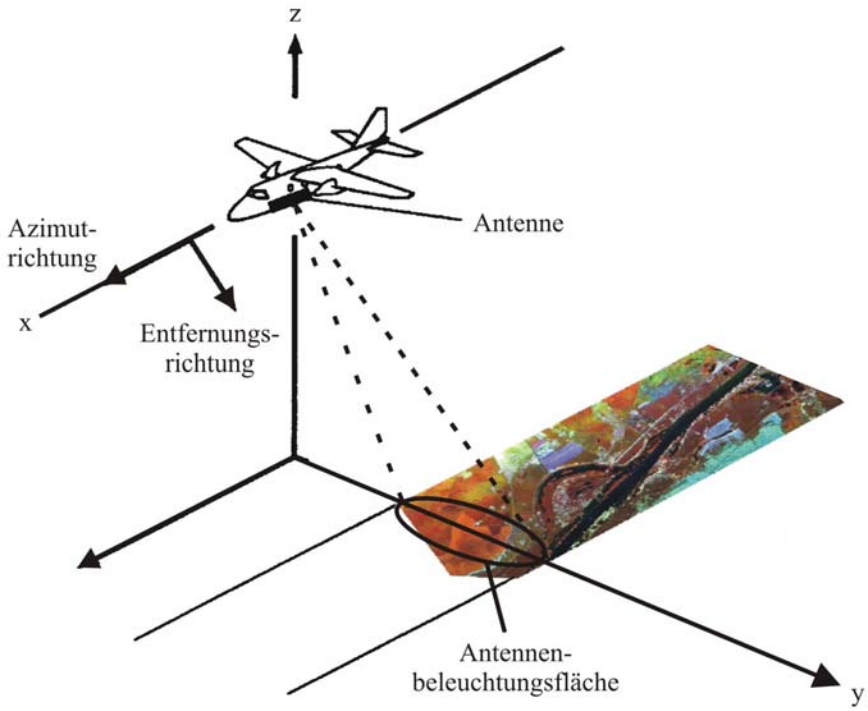


Abb. 3.3: Geometrie eines Seitensichtradars im Streifenmodus. Die Plattform fliegt in x-Richtung und bildet einen Streifen ab, der sich seitlich vom Flugweg befindet (nach MOREIRA 2001; modifiziert von MÜLLENHOFF 2004).

3.1.2.3 SAR-Datenerfassung

Das SAR ist ein aktives bilderzeugendes Radarverfahren, das die zur Beobachtung benötigte Energie, im Gegensatz zu den meisten Fernerkundungsverfahren im optischen Bereich, selbst ausstrahlt. Ein Bruchteil der ausgesandten Energie kann nach der Reflexion an den abzubildenden Objekten wieder vom SAR empfangen werden. Durch die Reduktion der

jeweiligen Objektkoordinaten von drei (Entfernung, Azimut, Zenitdistanz) auf zwei (Range, Azimut) liefert das SAR eine zweidimensionale Abbildung dreidimensionaler Objekte.

Bilderzeugende Radarverfahren und die optische Bilderzeugung unterscheiden sich zudem prinzipiell in der Abbildungsgeometrie. Das optische Verfahren bildet ähnlich dem menschlichen Auge in der Zentralperspektive ab. Ein Bildpunkt wird durch den Raumwinkel festgelegt, der z.B. durch Azimut und Zenitdistanz bestimmbar ist. Die Entfernung eines Objektes wird dabei nicht erfasst. Erst die Verwendung zweier optischer Systeme (z.B. Augenpaar) ermöglicht die Entfernungsbestimmung.

Beim SAR bildet ein gänzlich anderes physikalisches Prinzip die Grundlage für die Aufnahmegeometrie. Vom Sensor werden senkrecht zur Flugrichtung kurze Wellenzüge elektromagnetischer Strahlung ausgesandt und nach der Reflexion am Objekt z.T. wieder empfangen. Die Entfernung zum Objekt berechnet sich dabei aus der Laufzeit der Signale zwischen Aussendung und Empfang und gibt somit die Position des Objektes in Range-Richtung (Richtung quer zur Flugrichtung) an. Die zweite Bildkoordinate, die Position des Objektes in Azimut-Richtung, erhält man durch die gleichzeitige Bewegung des Sensors in Flugrichtung und die ständige Aussendung weiterer Signale. Die im gesamten Bildbereich befindlichen Objekte streuen einen Teil der einfallenden Energie des Radarsignals zum Sensor zurück, so dass man im registrierten Bild für jeden Bildpunkt einen individuellen Rückstreuwert erhält.

Durch die unbestimmte dritte Objektkoordinate, die Zenitdistanz (Winkel zur Vertikalen) der Linie vom Sensor zum Objekt, erzeugt die Abbildungsgeometrie des SAR im Gelände mit Topographie Effekte wie Foreshortening, Layover und Radarschatten (Kap. 3.1.3.2.3) wenn die Slant-Range-Entfernung (Entfernung in Range-Richtung) zweier Punkte vom Sensor identisch ist.

Die geometrische Auflösung bestimmt die Genauigkeit der Abbildung. Sie wird in Range-Richtung durch die Impulsdauer des Radarsignals sowie in Azimut-Richtung durch den Öffnungswinkel, unter dem das Signal ausgestrahlt wird, festgelegt. Eine möglichst große Richtwirkung der Antenne bei einer möglichst kleinen Impulsdauer ist der Garant für eine hohe geometrische Auflösung. Die effektive Impulsdauer lässt sich durch die Kompression eines frequenzmodulierten Signals herabsetzen. Die Richtwirkung der Antenne wird verbessert durch den Einsatz einer synthetisch erzeugten, virtuellen Antenne eines SAR an Stelle einer normalen Radarantenne eines RAR (Real Aperture Radar).

3.1.2.4 Grundprinzip des Radar-Systems mit synthetischer Apertur

In der Radarfernerkundung kommen häufig sogenannte monostatische Systeme zum Einsatz. Sie bestehen im Allgemeinen aus einem im gepulsten Modus betriebenen Mikrowellensender, einer Antenne, die die erzeugten Impulse gerichtet sendet und das zurückgestreute Signal empfängt sowie einem Empfänger, der das empfangene Signal verstärkt und an den Detektor übergibt. Dabei wird ständig von Sende- auf Empfangsmodus und zurück geschaltet. Die einzelnen Impulse werden mit der Wiederholfrequenz PRF (**P**ulse **R**epetition **F**requency)

ausgestrahlt. Ein Modulator bestimmt die Signaldauer τ, von der die Auflösung in Entfernungsrichtung (senkrecht zur Flugrichtung) abhängt (KELLER 2000).

Das Auflösungsvermögen ist für jede Art von Sensoren, die es ermöglichen, eine Szene abzubilden, ein entscheidendes Qualitätskriterium. Die Auflösung der zweidimensionalen Abbildung wird in Entfernungsrichtung (*Range*) durch die Bandbreite bzw. Pulslänge des Sendesignals bestimmt. Die Länge der synthetischen Apertur bestimmt die Auflösung in Flugrichtung (Azimut).

Die Signallaufzeit bei Radarsystemen ist proportional zur Entfernung der einzelnen Streuer. Dabei durchläuft ein gesendeter Puls mit Lichtgeschwindigkeit c den Abstand zum Streuer, wird an diesem gestreut und vom Sensor wieder empfangen. Aufgrund der unterschiedlichen Signallaufzeiten können Streuer, die sich in unterschiedlicher Entfernung befinden, voneinander unterschieden werden. Verringert sich der Abstand zweier Streuer, so dass sich die empfangenen Signale überlagern, kann das Radarsystem die beiden Streuer nicht mehr voneinander unterscheiden. Das Auflösungsvermögen Θrg in der Entfernungsrichtung hängt somit nur von der effektiven Pulslänge τ ab oder der Bandbreite W des gesendeten Signals:

$$\Theta rg = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{W} \qquad \text{(Gl. 3.1)}$$

Das Auflösungsvermögen in Flugrichtung (Azimut) hängt von der Winkelauflösung α_{ra} der Antenne ab, die proportional zur verwendeten Wellenlänge λ und umgekehrt proportional zur realen Antennenlänge L ist:

$$\alpha_{ra} = \frac{\lambda}{L} \qquad \text{(Gl. 3.2)}$$

Eine Verbesserung der Winkelauflösung kann nur durch eine Verringerung der Wellenlänge oder durch eine Vergrößerung der Antennenlänge erreicht werden. Mit Hilfe des Prinzips der synthetischen Apertur sind SAR-Systeme in der Lage, auch mit kleinen Antennen eine hohe Auflösung zu erreichen. Die Winkelauflösung α_{sa} der synthetischen Apertur kann bis auf einen Faktor 2 wie bei der realen Apertur dargestellt werden, mit L_{sa} als Länge der synthetischen Apertur:

$$\alpha_{sa} = \frac{\lambda}{2 * L_{sa}} \qquad \text{(Gl. 3.3)}$$

Die unterschiedliche Ansteuerung der Antennenelemente im Vergleich zum Radar mit realer Apertur drückt sich in dem Faktor 2 in Gl. 3.3 aus. Erst nachdem mehrere Radarimpulse gesendet und die einzelnen Antennenelemente künstlich erzeugt worden sind, entsteht die synthetische Apertur nach der Aufnahmezeit. Bei der realen Antenne entsteht nur auf dem Signalrückweg (vom Ziel zum Radar) der Phasengradient des Empfangssignals. Im Falle der synthetischen Apertur senden die einzelnen Elemente getrennt und nacheinander, dabei geht der Hinweg (vom Radar zum Ziel) des Sendesignals ebenso mit ein, wie der gleich lange Rückweg (vom Ziel zum Radar). Daher sind die Phasenunterschiede zwischen Sende- und Empfangssignalen gerade doppelt so groß wie bei realen Antennen.

Die maximale Länge L_{sa} der synthetischen Apertur entspricht der Länge, die ein Streuer von der realen Apertur in Azimutrichtung beleuchtet wird (Abb. 3.4). Sie ist gleich dem Produkt aus Winkelauflösung der realen Apertur α und Entfernung r_0:

$$L_{sa} = \alpha * r_0 = \frac{\lambda}{L} * r_0 \quad \text{(Gl. 3.4)}$$

Die maximale Winkelauflösung der synthetischen Apertur α_{sa} erhält man aus den Gl. 3.3 und 3.4. Die Länge der synthetischen Apertur ist proportional zur Entfernung des Streuers und umgekehrt proportional zur realen Aperturlänge:

$$\alpha_{sa} = \frac{L}{2 * r_0} \quad \text{(Gl. 3.5)}$$

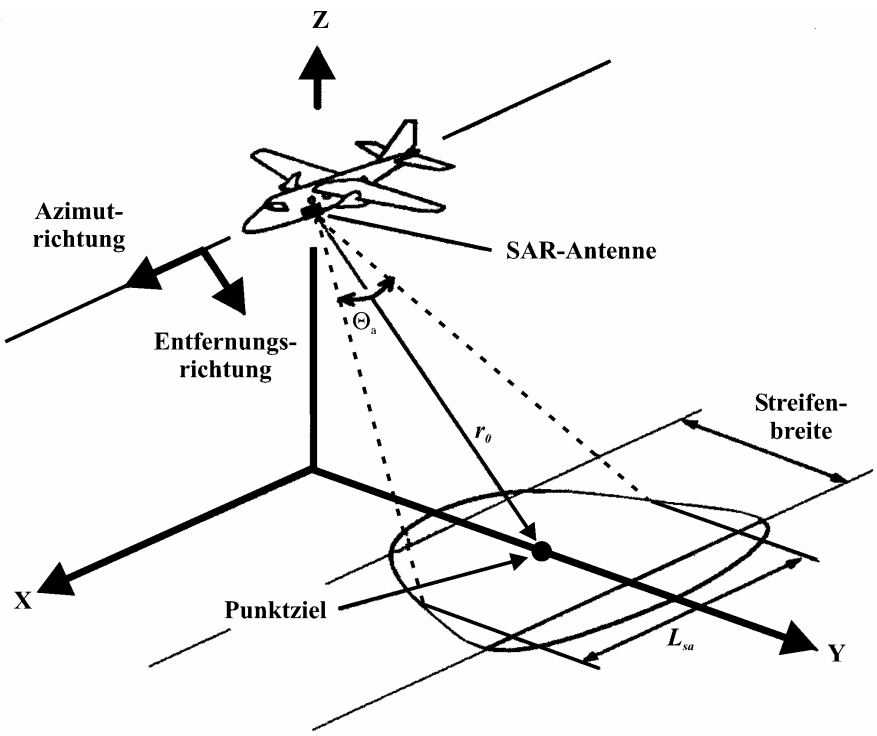


Abb. 3.4: **Bestimmung der SAR-Azimutauflösung im Streifenmodus. Das Punktziel wird von der Radarantenne beleuchtet, die eine Winkelauflösung Θ_a in Azimutrichtung (Flugrichtung) hat. L_{sa} entspricht der Länge der synthetischen Apertur und ist die Strecke am Boden, die von der Antenne beleuchtet wird (nach MOREIRA 2001).**

Die Winkelauflösung ist aufgrund der mit der Entfernung größer werdenden synthetischen Aperturlänge nicht mehr konstant, sondern verbessert sich mit zunehmender Entfernung. Das Produkt der maximalen Winkelauflösung mit der Entfernung r_0 ergibt die maximale räumliche Auflösung der synthetischen Apertur δ_{sa}:

$$\delta_{sa} = \frac{L}{2} \qquad \text{(Gl. 3.6)}$$

Dabei entspricht die maximale Auflösung der synthetischen Apertur δ_{sa} der maximalen Auflösung in Azimutrichtung δ_a und ist gleich der halben Antennenlänge in Azimut. Sie ist von der Entfernung unabhängig.

Die geometrische Auflösung bestimmt die Genauigkeit der Abbildung. In Range-Richtung wird die geometrische Auflösung durch die Impulsdauer des Radarsignals festgelegt. In Azimut-Richtung wird die geometrische Auflösung durch den Öffnungswinkel, unter dem das Signal ausgestrahlt wird, bestimmt. Die geometrische Auflösung wird als die 3-dB-Breite des Hauptmaximums der Impulsantwort definiert. Die Impulsantwort ist die Abbildung eines normierten Punktzieles, wobei zunächst kein Rauschen berücksichtigt wird. Die Azimut- (δ_a) und Entfernungsauflösung (δ_e) können folgendermaßen bestimmt werden:

$$\delta_a = k_a * \frac{v}{B_a} = k_a * \frac{d_a}{2} \quad \text{(Gl. 3.7)}$$

und

$$\delta_e = k_e * \frac{c_0}{2 * B_e} \qquad \text{(Gl. 3.8),}$$

wobei k_a und k_e konstant sind. Dabei entspricht k_a der Dopplerrate, k_e der Modulationsrate des gesendeten Pulses, B_a der Bandbreite des SAR-Signals in Azimutrichtung, B_e der Bandbreite des SAR-Signals in Entfernungsrichtung, c_0 der Lichtgeschwindigkeit, v der Geschwindigkeit und d_a der Antennenlänge in Azimut. Die Entfernungsauflösung ist umgekehrt proportional zur Bandbreite des gesendeten Impulses. Gl. 3.9 gilt für die schräge Entfernungsauflösung in Antennenblickrichtung und ist in allen Fällen besser als die Entfernungsauflösung am Boden (δ_{rg}):

$$\delta_{rg} = k_e * \frac{c_0}{2 * B_e * \sin \Theta_i} \qquad \text{(Gl. 3.9)}$$

Dabei hängt der Einfallswinkel des gesendeten Signals Θ_i von der Höhe, der Entfernung und der Bodenneigung ab.

Die Bildung einer synthetischen Apertur mit anschließender SAR-Verarbeitung wird in Abbildung 3.5 veranschaulicht.

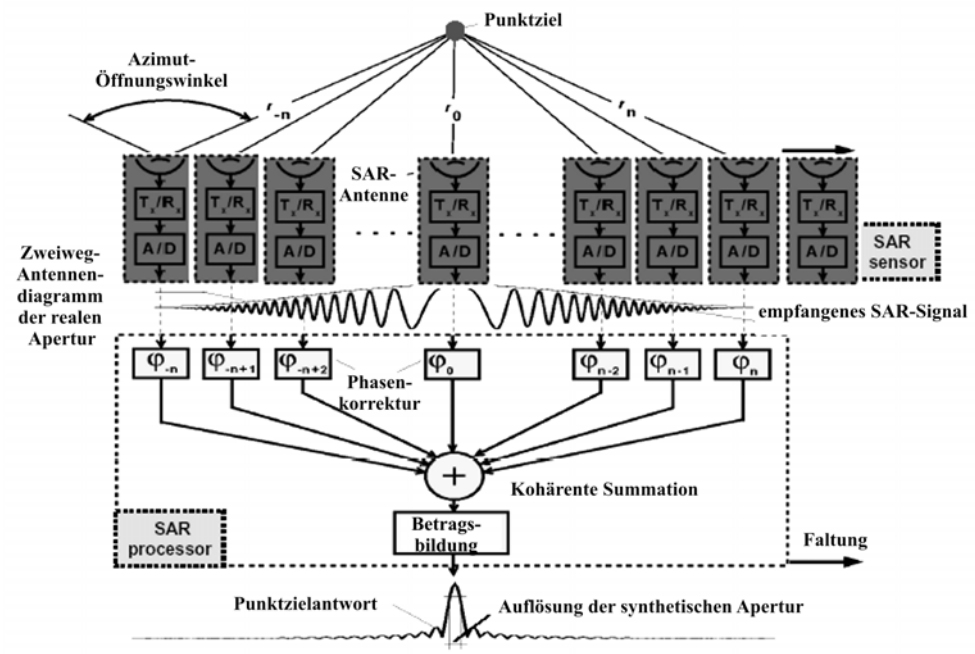


Abb. 3.5: Schematische Darstellung der SAR-Abbildung und Verarbeitung eines Punktziels. Während des Überfluges wird die synthetische Antenne gebildet. Die hohe Auflösung erzielt man erst nach der SAR-Verarbeitung (nach MOREIRA 2001).

Bei der Vorwärtsbewegung der Sensorplattform wird ein Punkt auf der Erdoberfläche nicht nur von einem ausgesendeten Signal, sondern von mehreren beleuchtet. Durch die scheinbare Bewegung des Geländeobjektes durch den Radarrichtstrahl kommt es zu einer auf dem Dopplereffekt beruhende Frequenzverschiebung (KRONBERG 1985). Die Frequenzen der Radarimpulse sind bei Annäherung an das Objekt höher und bei Entfernung vom Objekt niedriger als die der ausgesandten Radarimpulse (BAYER 1990). Im Punkt der größten Nähe zum Geländeobjekt ist die Frequenzverschiebung gleich null. Haben diese Signale eine feste Phasenbeziehung zueinander, kann aus allen Signalen, die den Punkt beleuchten eine synthetische Apertur berechnet werden. Dabei ist die Länge der synthetischen Apertur die Strecke, die ein Sensor zurücklegt, während sich der Punkt innerhalb des beleuchteten Gebietes der ausgestrahlten Signale befindet. Die Erzeugung einer synthetischen Apertur ist unabhängig von der Geschwindigkeit der Trägerplattform. Das Zweiweg-Antennendiagramm der verwendeten Antenne im SAR-Sensor bestimmt die reale Apertur. Der SAR-Empfänger registriert und speichert neben der Dopplerfrequenz auch die Intensität und die Phase der Radarstrahlen sowie die Zeitverzögerung, die zur räumlichen Zuordnung der Rückstreusignale benötigt wird (WEIMANN 1996).

Vor der SAR-Verarbeitung entspricht der Betrag des empfangenen Amplitudenverlaufs dem Antennendiagramm der realen Apertur. Die synthetische Apertur besteht aus der Zusammensetzung mehrerer Antennenelemente. Diese werden durch das periodische Senden und Empfangen während des Überfluges des SAR-Sensors künstlich nacheinander gebildet (Abb. 3.6).

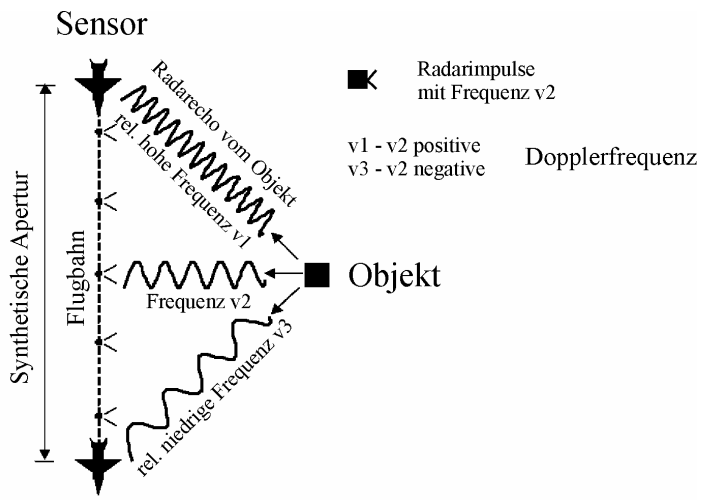


Abb. 3.6: Bildung einer synthetischen Apertur und Dopplereffekt bei SAR-Systemen (nach BAYER 1990).

Die Anzahl der aufsummierten Antennenelemente bestimmt die Auflösung der hochaufgelösten Impulsantwort, die man nach der Verarbeitung erhält. Dabei beträgt die maximal erzielbare Auflösung die halbe Antennenlänge in Azimut (vgl. Gl. 3.6). Die Generierung eines SAR-Bildes beruht auf der zweidimensionalen Verarbeitung des empfangenen Signals. Die Verarbeitung des empfangenen Signals lässt sich in zwei eindimensionale Schritte aufteilen: in die Verarbeitung in Entfernungsrichtung und in die Verarbeitung in Azimutrichtung zur Bildung der synthetischen Apertur. In Abb. 3.7 Ist eine vereinfachte Darstellung der Verarbeitungsschritte zur SAR-Bildgenerierung dargestellt.

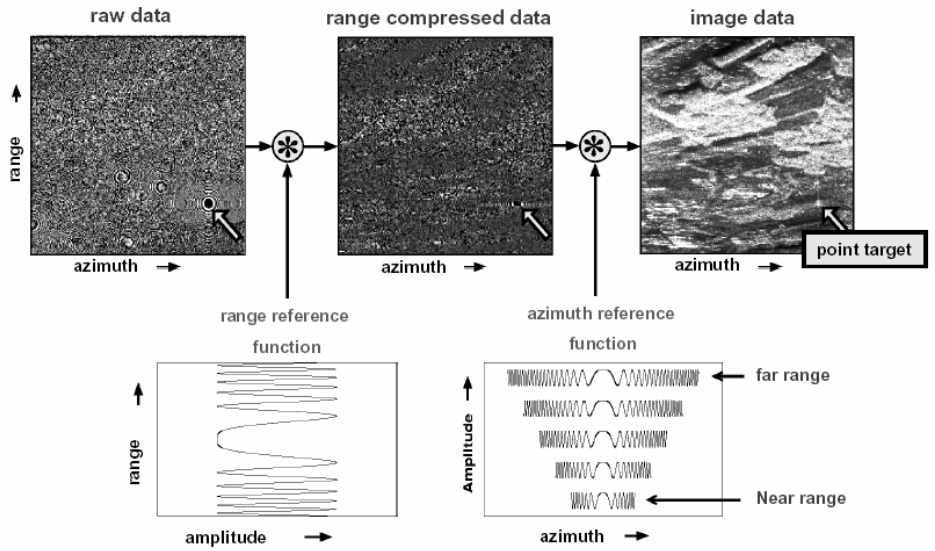


Abb. 3.7: Vereinfachte Darstellung des Signalablaufs zur Generierung eines SAR-Bildes. Die starken Rückstreuungen von Punktzielen sind als schwarze und weiße Ringe (Fresnel-Zone) bei den Rohdaten zu sehen. Die Referenzfunktion in Azimut wird für jeden Entfernungsbereich aktualisiert (nach BUCKREUß 1994).

3.1.2.5 Streuung von Mikrowellen

Die Interaktion der Strahlung an der Erdoberfläche wird in zwei Streumechanismen unterteilt. Zum einen in die Streuung an einer Oberfläche (Oberflächenstreuung). Sie findet an der Grenzschicht zweier Medien mit unterschiedlichen, aber homogenen dielektrischen Eigenschaften statt (ULABY et al. 1982). Die Mikrowellenstrahlen werden teils absorbiert und je nach Eigenschaften des unteren Mediums spiegelnd reflektiert oder diffus gestreut (HOCHSCHILD 1995). Die Oberflächenstreuung unterscheidet sich grundsätzlich von der Volumenstreuung.

Die Volumenstreuung wird vor allem dann wirksam, wenn die Verteilung der Elemente des reflektierenden Mediums inhomogen ist oder wenn die Elemente verschiedene dielektrische Eigenschaften aufweisen. Unter diesen Bedingungen dringt ein Teil der ausgesendeten Welle in dieses inhomogene Medium ein. Zwei Faktoren bestimmen die Art und die Stärke der Volumenstreuung, die Inhomogenität des Mediums und die Eindringtiefe der Welle.

Der Streuprozess wird zudem durch die sensorspezifischen Parameter Einfallswinkel und Polarisation beeinflusst. Im Gegensatz zur Oberflächenstreuung ist der Einfallswinkel bei der Volumenstreuung weniger ausschlaggebend. Die Polarisation spielt dagegen eine wesentlich größere Rolle. Die Kreuzpolarisation weist durch ihre multiplen Streuungen in inhomogenen Medien bei der Volumenstreuung einen höheren Rückstreuanteil auf als bei der Oberflächenstreuung. Gleichpolarisierte Wellen weisen bis zu einem Einfallswinkel von ca. 30° höhere Anteile bei der Oberflächenstreuung auf (HAJNSEK 1999).

Bei der Modellierung der Volumenstreuung werden zwei Ansätze verfolgt (ISHIMARU 1978): Zum einen der Wellenansatz (*coherent* oder *wave approach*), wobei das elektrische Feld (Amplitude und Phase) verwendet wird und zum anderen der Intensitätsansatz (incoherent oder intensity approach), bei dem die Strahlungsintensität verwendet wird.

Das Streuverhalten verschiedener Oberflächen wird in Abbildung 3.8 verdeutlicht. Die Beispiele **a**, **b**, **f** und **h** stellen einen Sonderfall der Oberflächenstreuung, die sogenannte Corner-Reflexion (*double bounce*) dar. Durch die zwei- oder mehrfach spiegelnde Reflexion (z.B. zwischen Baumstämmen und der Bodenoberfläche) gelangen große Anteile der ausgesendeten Radarstrahlung zurück zum Sensor. Die Volumenstreuung ist in Fall **c** angedeutet. Sie findet überwiegend in der Vegetation statt. Aufgrund ihres diffusen Charakters wird ein höherer Anteil der ausgesendeten Strahlung zum Sensor zurück reflektiert als bei der einfachen Oberflächenstreuung. Die Beispiele **d** und **e** zeigen die Rückstreuung von der Oberfläche. Da häufig ein großer Teil der Strahlung durch spiegelnde Reflexion vom Sensor weg gestreut wird, fällt die Rückstreuung geringer aus als bei der Volumenstreuung. Die Oberflächenrauigkeit in Beispiel **d** bedingt eine höhere Rückstreuung. Das Rückstreuverhalten in Beispiel **g** ist gering, da die ausgesendete Radarstrahlung in den Oberboden eindringt und dort durch die Volumenstreuung gedämpft wird. Beispiel **i** weist auf den geometrischen Effekt des Radarschattens hin (vgl. Kap. 3.1.3.2.3 – Abb. 3.18).

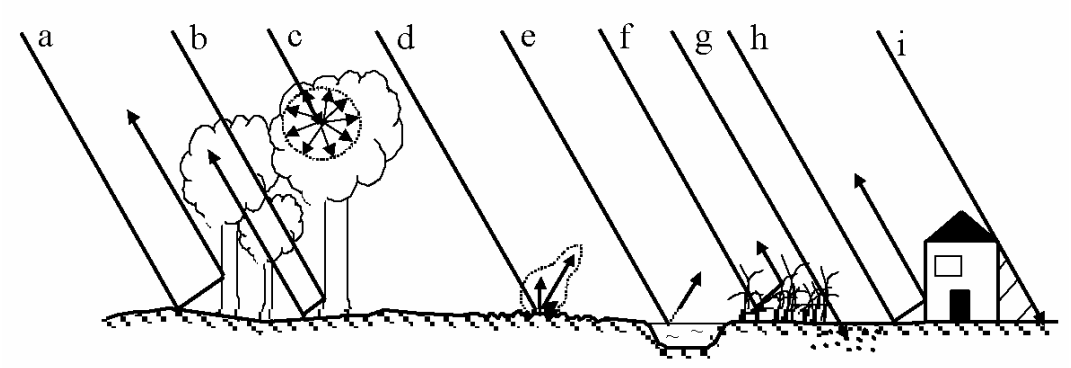


Abb. 3.8: Streuverhalten von Radarstrahlen an verschiedenen Oberflächen (nach RANEY 1998).

Strahlung ist als Summe der verschiedenen Streuvorgänge anzusehen (Abb. 3.9), die abhängig von den System- und Oberflächenparametern unterschiedliche Anteile an der Rückstreuung besitzen (SCHMULLIUS 1992).

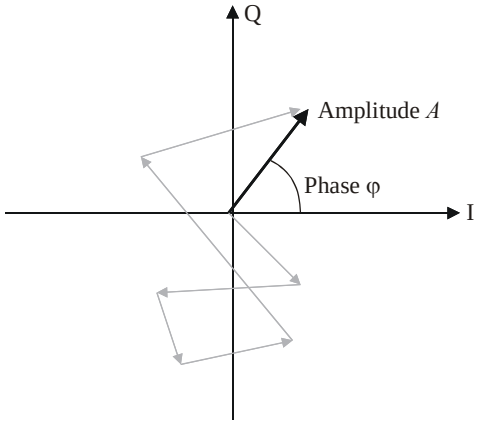


Abb. 3.9: Entstehung des Radarsignals für ein Flächenziel. Die Rückstreuvektoren der Streuzentren summieren sich vektoriell zu einem resultierenden Rückstreuvektor mit Amplitude *A* und Phase φ auf. Dabei gehorcht die Amplitude *A* einer Rayleigh-Verteilung, die Phase φ ist im Idealfall gleich verteilt.

3.1.2.6 Speckle

Bei allen kohärent arbeitenden, bilderzeugenden Systemen kommt es zur Bildung eines multiplikativen Rauschens (*Multiplicative Noise*). Diese körnige Textur wird allgemein als Speckle (Sprenkelung) bezeichnet und ist statistisch unabhängig von der eigentlichen Textur des betrachteten Gebietes. Wellenanteile mit gleicher Frequenz streuen nach der Interaktion mit Oberflächenmaterialien phasenverschoben zurück. Dies führt bereits innerhalb eines räumlich kleinen Bereichs zu konstruktiven und destruktiven Interferenzerscheinungen, die auch in homogen ausgebildeten Flächen einen Speckle-Effekt hervorrufen. Es wird zwischen der Textur der Szene (*Scene Texture*) als der räumlichen Variation des Rückstreumusters bei Aufnahme der Daten mit einem hochauflösenden, inkohärent arbeitenden Radar, und der Textur des Bildes

(*Image Texture*) als räumliche Variation der vom SAR gelieferten Bilddaten unterschieden. Dabei bilden Szenentextur und Speckle zusammen die Bildtextur (RANEY 1998).

3.1.3 Interaktion von Mikrowellen mit einer Oberfläche

Die Radargleichung beschreibt die von der Antenne empfangene Energie unter Berücksichtigung der ausgesendeten Energie sowie der Parameter Frequenz, Polarisation, Antennencharakteristik, Einfallswinkel und Streueigenschaften:

$$P_{rp}(\Theta) = \iint_A \frac{P_{tq} G^2(\Theta) \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_{pq} \quad \text{(Gl. 3.10)}$$

mit P_r = Empfangsenergie

P_t = Sendeenergie

Θ = Einfallswinkel

G = Antennengewinn

R = Distanz zwischen Antenne und Auflösungszelle

σ = Rückstreuquerschnitt (*radar cross section*)

P_q = Empfangene und ausgesendete Polarisation

λ = Wellenlänge

Der Rückstreukoeffizient σ ist abhängig von der Charakteristik des Sensors sowie von der Objektcharakteristik (Abb. 3.10). Strahlungsverluste, die durch die Atmosphäre, die Absorption oder die Anisotropie hervorgerufen werden können, werden dabei vernachlässigt (HILDEBRANDT 1996).

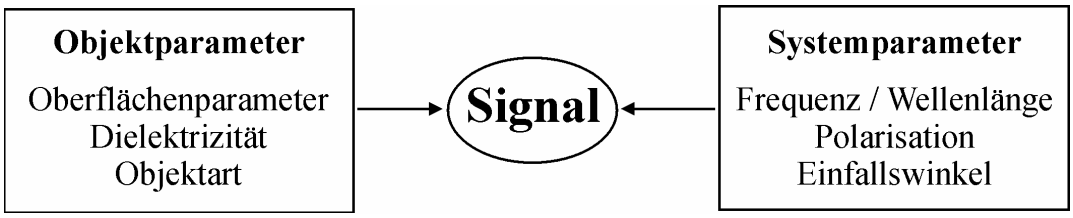


Abb. 3.10: Der Rückstreukoeffizient σ ist abhängig von Objekt- und Systemparametern.

Die dielektrischen Eigenschaften des Mediums Boden und die Bedingungen der Grenzfläche Luft/Boden bestimmen die relativen Anteile der Interaktion der elektromagnetischen Welle mit einer Oberfläche (Streuung, Absorption, Transmission) sowie ihre richtungsspezifische Charakteristik.

Die von einem Radar-System aufgelöste Fläche besteht aus mehreren elementaren Streuern (*point scatterers*), die als stochastisch im Raum verteilt (*distributed target*) betrachtet werden und zum rückgestreuten Summensignal beitragen (Abb. 3.9). Der Anteil der rückgestreuten

Energie eines Punktzieles wird als Radar-Rückstreuquerschnitt (*radar cross section*) bezeichnet und in m^2 angegeben. Bei der Betrachtung eines Flächenzieles wird der Radar-Rückstreuquerschnitt auf eine Fläche bezogen und erhält folgenden Ausdruck:

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A_p} \qquad \text{(Gl. 3.11)}$$

mit σ^0 = Normalisierter Radar-Rückstreuquerschnitt

A_p = Auflösungszelle

Der normalisierte Radar-Rückstreuquerschnitt (σ^0) wird mit einem logarithmischen Maß in Dezibel (dB) angegeben (HOLECZ et al. 1993).

3.1.3.1 Systemspezifische Abbildungsparameter

Unter dem Begriff systemspezifische Abbildungsparameter versteht man die Aufnahmegeometrie sowie die zeitliche, spektrale und radiometrische Auflösung eines Sensors. Die für die Radarfernerkundung bedeutsamen Aufnahmeparameter Wellenlänge/Frequenz, Polarisation und Einfallswinkel werden im folgenden beschrieben.

3.1.3.1.1 Wellenlänge

Elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen von 1 cm bis 1 m bilden die Gruppe der Mikrowellen. Bestimmte Wellenlängenbereiche werden zu sogenannten Bändern zusammengefasst (Tab. 3.1). Ab einer Wellenlänge von ca. 2 cm kann die Mikrowellenstrahlung die Atmosphäre, auch bei Bewölkung, nahezu unbeeinflusst durchdringen. Lediglich starke Regenereignisse können die Transmissivität der Radarstrahlen bis zu 4 cm Wellenlänge beeinträchtigen (ULABY et al. 1981).

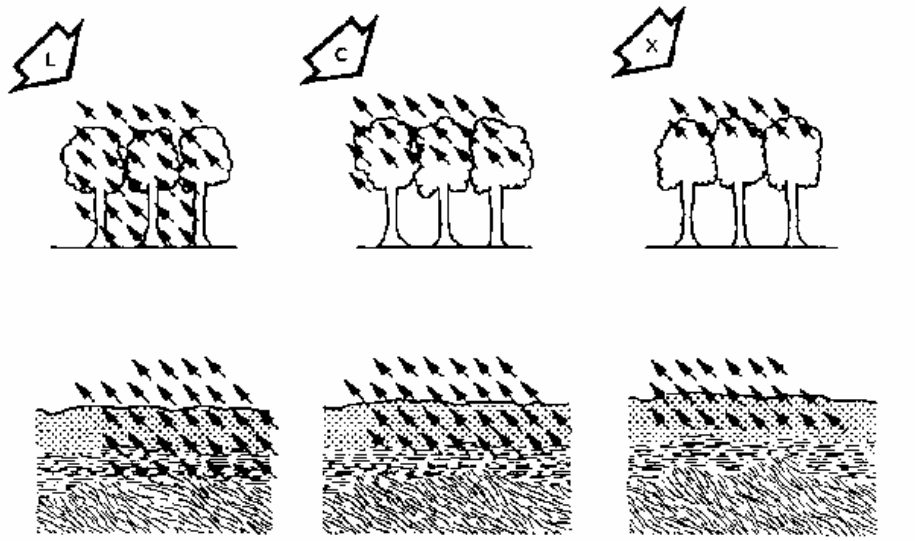
Die Wellenlänge bestimmt den Anteil der Streuung an Objektoberflächen, die Eindringtiefe und die Signaldämpfung der Wellen in der Vegetation oder dem Boden und hat Einfluss auf den Anteil der Volumenstreuung an der Gesamtrückstreuung von der Erdoberfläche (BAYER 1990).

Tab. 3.1: Bandbreite der Mikrowellen (nach WAIT 1976).

Band	Wellenlänge λ (cm)	Frequenzbereich (MHz)
Ka	1,18 – 0,75	26.500 – 40.000
K	1,67 – 1,18	18.000 – 26.500
Ku	2,40 – 1,67	12.500 – 18.000
X	3,75 – 2,40	8.000 – 12.500
C	7,50 – 3,75	4.000 – 8.000
S	15,0 – 7,50	2.000 – 4.000
L	30,0 – 15,0	1.000 – 2.000
UHF	100,0 – 30,0	300 – 1.000
P	136,0 – 77,0	220 - 390

Für langwellige Radarstrahlung (z.B. L- und P-Band) besteht die Möglichkeit, in bestimmte

Medien einzudringen (Abb. 3.11) und somit andere Informationen über das Geländeobjekt zu liefern als es die oberflächlich reflektierende kurzwellige Radarstrahlung (z.B. X-Band) vermag.



L-Band (23 cm) C-Band (6 cm) X-Band (3 cm)

Abb. 3.11: Abhängigkeit des Eindringvermögens sowie des Verhältnisses der Oberflächen- zur Volumenstreuung von Wellenlänge (L-, C- und X-Band), Oberflächengestalt und Materialeigenschaften (nach SCHÄTTLER 1992).

Die Wellenlänge beeinflusst die Rückstreuung auf zwei Arten: Zum einen bestimmt die Relation zwischen Wellenlänge und Oberflächenrauigkeit die effektive Rauigkeit. Sie wird durch die Multiplikation der gemessenen Standardabweichung der Höhe und der Wellenzahl berechnet. Zum anderen bestimmt die Wellenlänge die Eindringtiefe der elektromagnetischen Welle. Die sog. *skin depth* definiert die Tiefe unterhalb der Oberfläche, in der die Amplitude der einfallenden elektromagnetischen Welle um 37% des Wertes an der Oberfläche reduziert ist:

$$\delta_p = \left(\frac{\lambda}{\pi * g * \eta}\right) \qquad \text{(Gl. 3.12)}$$

wobei δ_p die *skin depth*, λ die Wellenlänge, $\eta = (\mu/\varepsilon)^{1/2}$ mit ε (Permitivität) und μ (Permeabilität) ist.

Dabei gilt für ein homogenes Medium, je länger die Wellenlänge bzw. je kleiner die Frequenz ist, desto tiefer können elektromagnetische Wellen eindringen (ULABY et al. 1981, 1982, 1986 – Abb. 3.11).

3.1.3.1.2 Polarisation

Radarsysteme transmittieren elektromagnetische Wellen. Sie bestehen aus einem elektrischen und magnetischen Feld, die orthogonal zueinander und orthogonal zur Ausbreitungsrichtung stehen (Transversalwellen). Die Blickrichtung des Betrachters ist dabei gleich der

Ausbreitungsrichtung der Welle. Im allgemeinen Fall herrscht zwischen beiden Komponenten des E-Feldes eine beliebige Phasenverschiebung ($\delta = \delta_y - \delta_x$). Der Zustand einer Welle wird durch Amplitude und Phase beschrieben. Die in SAR-Daten enthaltene Amplitude ist proportional zur empfangenen Energie und gibt, dargestellt durch die Bildhelligkeit, Aufschluss über räumliche Informationen und Textur der Objekte. Jedes Ziel zeigt während der Vorwärtsbewegung der Sensorplattform einen typischen Phasenverlauf (Kap. 3.1.2.4). Die Frequenz bzw. Wellenlänge ist eine Kenngröße der Welle und beeinflusst als Aufnahmeparameter den Informationsgehalt der SAR-Bilder.

Die von SAR-Systemen ausgesandten Radarstrahlen bewegen sich als Wellen in einer Ebene fort, die entweder horizontal (H) oder vertikal (V) polarisiert sind. Die Polarisation beschreibt dabei die Orientierung des elektrischen Feldvektors ($\vec{E}$). Sie gibt den Weg an, den die Spitze des Feldvektors ($\vec{E}$) in Abhängigkeit von der Zeit beschreibt (Abb. 3.12). Zur Polarisation von elektromagnetischen Wellen verwendet man linear polarisierende Antennen. Zur Erzeugung einer horizontalen Polarisation kann ein horizontaler Dipol als Antenne benutzt werden. Eine vertikale Polarisierung erfolgt entsprechend. Beim Empfang der Welle kann man durch entsprechende Wahl der Antenne den horizontal oder vertikal polarisierten Anteil einer Strahlung ermitteln.

Die Polarisation einer Strahlung kann durch Reflexion verändert werden. Dies ist abhängig von dem einfallenden Winkel, unter dem die Strahlung auf die Geländeoberfläche auftrifft, und von den Materialeigenschaften. Weiterhin kann ein Objekt verschiedene Polarisationen unterschiedlich stark reflektieren. Das Streuverhalten ist charakteristisch für die Art des stattfindenden Streuprozesses.

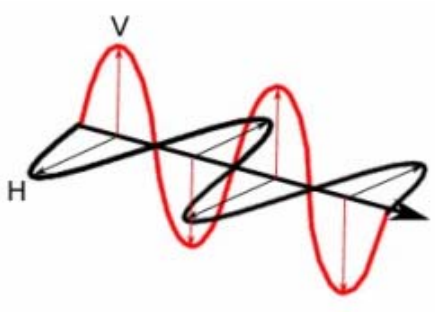


Abb. 3.12: Horizontale (H) und vertikale (V) Polarisation von Wellen.

Radarsensoren sind in der Lage, Signale mit verschiedenen Polarisationen zu senden und zu empfangen. Es wird zwischen gleich- und kreuzpolarisierten Systemen unterschieden. Gleichpolarisierte Systeme senden und empfangen in derselben Polarisation (VV bzw. HH). Während kreuzpolarisierte Systeme Signale in horizontaler oder vertikaler Ebene senden und die Signale in der jeweils anderen Ebene (HV oder VH) empfangen.

In Abhängigkeit von den Objekteigenschaften zeigen verschieden polarisierte Radarstrahlen ein unterschiedliches Rückstreuverhalten. Gleichpolarisierte Radarstrahlen liefern unterschiedliche

Rückstreuwerte in Abhängigkeit von der horizontalen oder vertikalen Struktur der beleuchteten Objektoberfläche.

Die kreuzpolarisierten Kanäle zeichnen nur die rückgestreute depolarisierte Strahlung auf, die vor allem bei Corner-Reflexion und bei diffuser Streuung entsteht. Die Rückstreuintensität ist in den kreuzpolarisierten Kanälen daher geringer als in den gleichpolarisierten Kanälen.

Als multipolarimetrische Systeme werden SAR-Sensoren bezeichnet, die in mehreren Polarisationen senden und empfangen. Wird neben der Rückstreuintensität auch die polarimetrische Phaseninformation aufgezeichnet, spricht man von einem vollpolarimetrischen System. Die Streumatrix [S] jeder Auflösungszelle wird von vollpolarimetrischen Systemen durch die Verwendung von zwei orthogonalen Polarisationen gemessen. Die dabei entstehende Komplexe 2x2 Matrix beschreibt vollständig das polarimetrische Verhalten eines Streuers.

Eine ausführliche Beschreibung der Polarisationszustände, der Darstellung polarisierter Wellen sowie der polarimetrischen Darstellung der Radarrückstreuung finden sich in BÖRNER et al. 1998, BÖRNER 2000, CLOUDE & POTTIER 1996, GLITZ 1995, HELLMANN 2000, KELLER 2000, PAPATHANASSIOU 1999 und ULABY & ELACHI 1990.

3.1.3.1.3 Einfallswinkel (Inzidenzwinkel)

Mit zunehmendem Einfallswinkel nimmt die Rückstreuung bei rauen Oberflächen ab. Rauigkeitseffekte werden stärker, je flacher der Einfallswinkel ist. Am Stärksten ist die Rückstreuung nahe Nadir (senkrechter Einfall). Nahe dem Streifwinkel (*grazing angle*) wird die Rückstreuung Null.

3.1.3.2 Objektspezifische Abbildungsparameter

Verschiedene objektspezifische Abbildungsparameter beeinflussen die Interaktion der Radarstrahlung mit Objekten und somit die Rückstreuintensitäten. Die objektspezifischen Abbildungsparameter sind für die Analyse der Radardaten von besonderer Bedeutung, da über die Rückstreuinformationen auf bestimmte Eigenschaften der untersuchten Oberflächen geschlossen werden kann. Mikrowellen sind sensitiv für die dielektrischen Eigenschaften sowie die Geometrie der beleuchteten Objekte.

So werden die Rückstreuintensitäten der Landbedeckungskategorien Vegetation oder Bebauung durch die Abbildungsparameter Form, Größe und die Orientierung der Objektbestandteile und deren Dielektrizitätskonstante bestimmt. Die Rückstreuintensitäten der Landoberflächenattribute Boden oder Relief werden durch die Dielektrizitätskonstante sowie die geometrischen Eigenschaften bestimmt.

3.1.3.2.1 Dielektrizitätskonstante

Das Messprinzip des Radar beruht darauf, dass die Mikrowellenenergie, die auf eine Oberfläche auftrifft, gestreut, transmittiert oder absorbiert wird. Dabei werden die relativen Anteile jedes dieser Vorgänge und ihre richtungsspezifische Charakteristik durch die dielektrischen

Eigenschaften des Mediums Boden und durch die Bedingungen der Grenzfläche Luft/Bodenoberfläche bestimmt.

In der Wellentheorie wird die Dielektrizitätskonstante mit der Brechung oder Reflexion einer Welle an der Grenzschicht zwischen zwei unterschiedlich dichten Medien beschrieben (Gesetz von Snellius). Der Brechungsindex wird als eine Funktion vom Einfallswinkel sowie der Geschwindigkeit der einfallenden Welle zum Brechungswinkel und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der gebrochenen Welle an einer Grenzfläche beschrieben. Dabei wird der Brechungsindex als die Wurzel aus der Dielektrizitätskonstante definiert und auf das Vakuum oder die Luft bezogen.

Die Dielektrizitätskonstante charakterisiert das Verhalten von Nichtleitern beim Einwirken eines elektrischen Feldes und wird von mehreren Parametern (Frequenz, Temperatur, Salinität, ferromagnetische Substanzen) beeinflusst (HAJNSEK 1999). Durch die Einwirkung eines elektrischen Feldes auf einen Nichtleiter kommt es zur Auslenkung der geladenen Teilchen aus ihrer Gleichgewichtslage und zur Bildung von Dipolen.

Die dielektrischen Eigenschaften eines Mediums werden durch die komplexe Dielektrizitätskonstante ε gekennzeichnet. Die dimensionslose Dielektrizitätskonstante ist von der Wellenlänge abhängig und wird in einen Realteil und einen Imaginärteil unterteilt. Die relative Durchlässigkeit des Mediums entspricht dem Realteil ε', während der Dämpfungsfaktor des Materials durch den Imaginärteil ε'' ausgedrückt wird. Die Fähigkeit des Mediums, eine Welle zu absorbieren und ihre Energie in eine andere Energieform umzuwandeln, wird durch die Größe ε'' beschrieben.

Die Dämpfung des elektrischen Feldes durch ein Medium wird mittels der Dielektrizitätskonstante ermittelt. Die Eindringtiefe δ_p der Wellenlänge beträgt unter der Annahme, dass die eindringende Welle sich exponentiell mit der Tiefe abschwächt:

$$\delta_p = \frac{\sqrt[\lambda]{\varepsilon'}}{2\pi\varepsilon''} \qquad \text{(Gl. 3.13)}$$

Für die meisten natürlichen Medien wird angenommen, dass $\varepsilon'' << \varepsilon'$ ist. Die Eindringtiefe δ_p wird per Definition um 1/e-fache (e = Euler´sche Zahl ≈ 2,7183) ihres Ausgangswertes gedämpft (SCHANDA 1986). Die Eindringtiefe der Welle steigt mit größer werdender Wellenlänge bei konstanter Dielektrizitätskonstante. Bei einem gleichzeitig ansteigenden Wert der Dielektrizitätskonstante bleibt die Eindringtiefe ab einem gewissen Sättigungsgrad konstant.

Neben der Abhängigkeit der gemessenen Dielektrizitätskonstante von den gegebenen Radarsystemparametern wie Frequenz, Polarisation und Einfallswinkel ist andererseits die Abhängigkeit von den Oberflächen- bzw. Volumeneigenschaften der bestrahlten Flächen von Bedeutung (PRIETZSCH 1999). Die Beziehung zwischen der Bodentextur und der Dielektrizitätskonstante wird von HALLIKAINEN et al. (1985), DOBSON & ULABY (1986), ABOULLA et al. (1988) und ROBINSON et al. (1999) beschrieben.

Wasser besitzt eine außergewöhnlich hohe Dielektrizitätskonstante ε' von etwa 80. Dies führt dazu, dass Variationen der Bodenfeuchte und des Pflanzenwassergehaltes Auswirkungen auf die

dielektrischen Eigenschaften bzw. auf die Objektrückstreueigenschaften haben (ULABY 1984; HOCHSCHILD 1995). Die Dielektrizitätskonstante des Bodens ist neben der Bodenfeuchte auch von der Bodenart und der Frequenz der Radarstrahlung abhängig (ULABY et al. 1986; MATTIKALLI et al. 1997).

Die Eindringtiefe von Mikrowellen in ein Medium ist von dessen dielektrischen Eigenschaften abhängig. Sie verringert sich im Allgemeinen mit zunehmendem Feuchtegehalt. Radarstrahlung kann in trockenem Boden in Abhängigkeit von der verwendeten Wellenlänge bis zu mehreren Dezimetern eindringen (Abb. 3.13). Es kommt überwiegend zur Volumenstreuung. Ein feuchter Boden streut im Wesentlichen an der Oberfläche und in den ersten Zentimetern (BOISVERT et al. 1995; KLENKE 1999). Die logarithmische Darstellung in Abb. 3.13 zeigt deutlich das rasante Abnehmen der Eindringtiefe bei zunehmender Bodenfeuchte. Das Eindringen bzw. Durchdringen von Vegetation hängt von deren Eigenschaften (TACONET et al. 1996) und vom Einfallswinkel ab (LUCKMAN 1998).

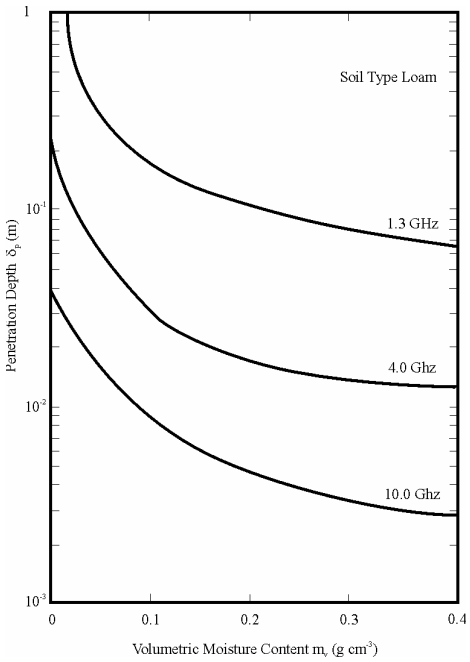


Abb. 3.13: Eindringtiefe von Mikrowellen als Funktion des Feuchtegehalts am Beispiel lehmiger Böden (nach DOBSON & ULABY 1998).

3.1.3.2.2 Oberflächenrauigkeit, Bodenfeuchte und Bodentextur

Eine elektromagnetische Welle tritt in Wechselwirkung mit dem Medium, auf das sie trifft und wird abhängig von den Materialeigenschaften des Mediums, zum Teil wieder zurück gestreut. Die gestreute elektromagnetische Welle an einer Oberfläche setzt sich aus einer kohärenten und einer inkohärenten Komponente zusammen. Durch die spiegelnde Reflexion wird die kohärente Komponente hervorgerufen, wohingegen unterschiedliche Streumechanismen, die eine diffuse Streuung hervorrufen, die inkohärente Komponente bestimmen. Beide Komponenten hängen

stark von der Fresnel´schen Reflektivität ab, die ihrerseits durch die dielektrischen Eigenschaften des Bodens bestimmt und durch die Oberflächengestaltung modifiziert wird.

Die Definition einer Oberfläche ist abhängig von der Wellenlänge der ausgestrahlten elektromagnetischen Welle und dem lokalen Einfallswinkel. Der Zustand einer Oberfläche kann durch mehrere Kriterien beschrieben werden.

Die Rauigkeit der Oberfläche bestimmt, wie stark die gestreute Welle in Abhängigkeit ihrer Wellenlänge spiegelnd bzw. diffus reflektiert wird. Unter identischen Rahmenbedingungen (Einfallswinkel u. Frequenz) gilt: Je rauer die Oberfläche, desto diffuser ist die Rückstreuung bzw. je glatter die Oberfläche, desto gerichteter die Reflexion (Abb. 3.14). Dabei kann eine Oberfläche, die bei kurzwelligem Radar (z.B. X-Band) rau erscheint, bei größeren Wellenlängen (z.B. P-Band) Eigenschaften einer glatten Fläche aufweisen (ULABY et al., 1981, 1982 und 1986).

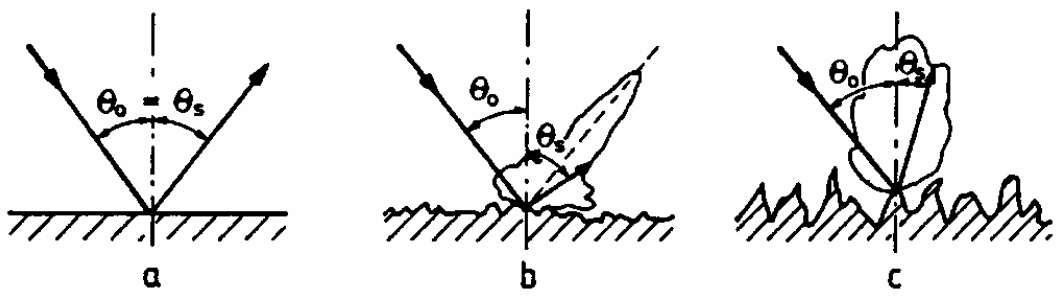


Abb. 3.14: Anteile kohärenter und diffuser Streuung für verschiedene Oberflächenrauigkeiten (nach SCHANDA 1986).

Die relative Rauigkeit einer reflektierenden Oberfläche wird durch das Rayleigh-Kriterium beschrieben. Ein Grenzwert für die mittlere Höhe h des Mikroreliefs gibt in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ und dem Einfallswinkel Θ an, ob eine Oberfläche noch als glatt bezeichnet werden kann:

$$h < \frac{\lambda}{8\cos\Theta} \qquad \text{(Gl. 3.14)}$$

Ein strengeres Kriterium kommt bei natürlichen Oberflächen, bei denen die Wellenlänge häufig eine ähnliche Dimension wie die Höhenunterschiede h aufweist, zur Anwendung. Das Frauenhofer-Kriterium beschreibt einen wesentlich niedrigeren und engeren Bereich:

$$h < \frac{\lambda}{32\cos\Theta} \qquad \text{(Gl. 3.15)}$$

Zur quantitativen Erfassung der relativen Rauigkeit einer natürlichen Oberfläche werden statistische Größen verwendet. Die Rauigkeit einer Oberfläche wird durch zwei statistische Parameter beschrieben, die RMS-Höhe h (**R**oot **M**ean **S**quare) und die Korrelationslänge l (NEUSCH 2000). Die RMS-Höhe h ist die Standardabweichung der Höhe des Bodens mit z_i der Höhe des betrachteten Punktes i, z der Durchschnittshöhe und n der Anzahl an betrachteten

Punkten. Mit zunehmender Rauigkeit einer Oberfläche kommt es zu einer gleichmäßigen Reflexion in alle Richtungen.

$$RMS_{Höhe} = h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(z_i - z)^2}{n-1}} \quad \text{[cm]} \qquad \text{(Gl. 3.16)}$$

Mit Hilfe der Autokorrelationslänge *p(x´)* wird die Entfernung bestimmt, ab welcher die Rauigkeitshöhen unabhängig voneinander sind:

$$p(x') = \frac{\sum_{i=1}^{N+1-j} z_i, z_{j+i-1}}{\sum_{i=1}^{N} z_i^2} \quad \text{(Gl. 3.17)}$$

mit z_i der Höhe des Rauigkeitselement am Punkt i, N der Anzahl der Elemente und z dem Mittelwert der Höhen, wobei z_{j+i-1} einem Punkt mit dem räumlichen Abstand $x'=(j-1)\Delta x$ von Punkt x_i entspricht. Sie beschreibt die horizontale Rauigkeit und ist definiert als die Entfernung, bei welcher die Korrelation einen Wert kleiner $1/e$ erreicht. Für eine glatte Oberfläche wird $e = \infty$.

RMS-Höhe und Autokorrelationslänge werden durch die Multiplikation mit der verwendeten Wellenlänge, die als Wellenzahl k beschrieben wird, normiert und anschließend als k_s und k_l bezeichnet.

Das Verhältnis der RMS-Höhe zur Autokorrelationslänge definiert die Neigung, die als weiteres Maß der Rauigkeit herangezogen wird. Die Neigung wird in der Regel durch die Gauß´sche Funktion (Gl. 3.18) oder durch die exponentielle Funktion (Gl. 3.19) beschrieben:

$$m = \sqrt{2}\,\frac{s}{l} \quad \text{Gauß´sche Funktion} \qquad \text{(Gl. 3.18)}$$

$$m = \frac{s}{l} \quad \text{Exponentielle Funktion} \qquad \text{(Gl. 3.19)}$$

Mit zunehmenden Einfallswinkel nimmt die Oberflächenstreuung ab, wobei diese Abnahme bei rauen Oberflächen geringer ausfällt als bei glatten Oberflächen. Die Rückstreuung der gleichpolarisierten Wellen ist jeweils stärker als die der kreuzpolarisierten Wellen.

Die Änderung der Dielektrizitätskonstante bei Änderung des Bodenwassergehaltes führt zu einer veränderten Rückstreuung. Dabei spielt der große Unterschied der Dielektrizitätskonstante von Wasser (80) und trockenem Boden (3-5) die entscheidende Rolle (LEWIS et al. 1998). Bei steigendem Bodenwassergehalt nimmt die Dielektrizitätskonstante zu (Abb. 3.15a). Die hohe Dielektrizitätskonstante von Wasser ist in der leichten Polarisierbarkeit der Wasserdipole begründet. Bei Änderung des angelegten elektrischen Feldes (Umpolung) richten sich die Dipole neu aus. Besonders die Verwendung von niedrigen Frequenzen (z.B. L- und P-Band – Abb. 3.15b) eignen sich, um Bodenfeuchteunterschiede zu lokalisieren, da die Wasserdipole genügend Zeit haben, sich neu zu orientieren. Die Ausrichtung der Dipole ist für die Höhe der

Dielektrizitätskonstante entscheidend.

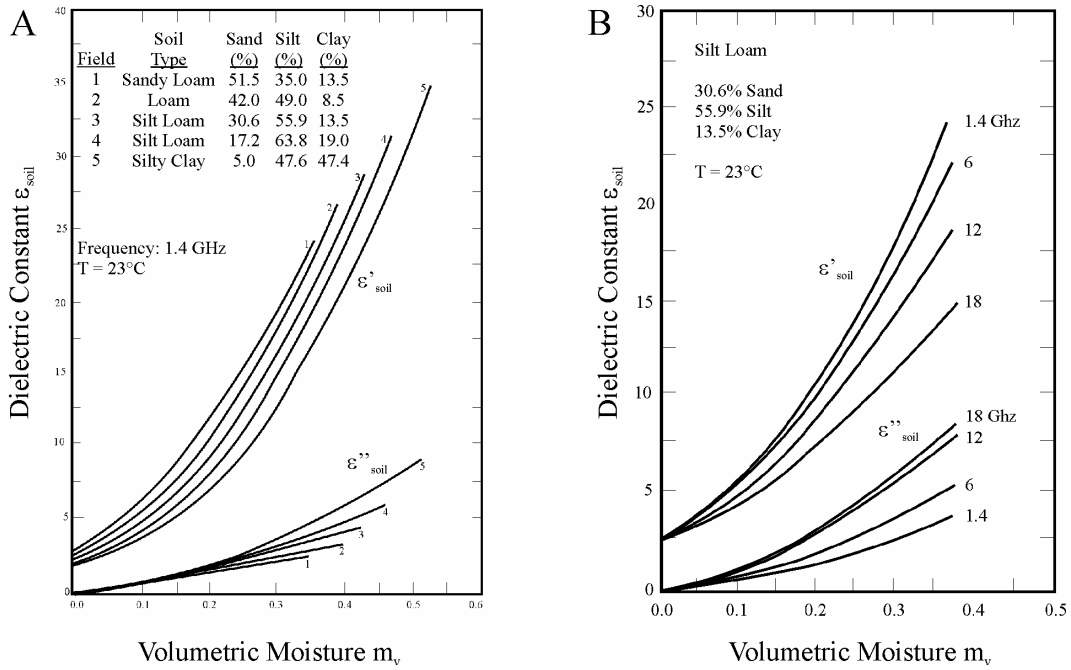


Abb. 3.15: Auswirkung des Bodenwassergehalts und Dielektrizitätskonstante auf das Radarsignal. A) Gemessene Dielektrizitätskonstante für fünf Bodenarten bei 1.4 GHz. B) Gemessene Dielektrizitätskonstante für lehmige Böden als Funktion des Bodenfeuchtegehaltes und der Frequenz (nach ULABY et al. 1986).

Die Bindung des freien Wassers ist von der Bodentextur und Lagerungsdichte abhängig. Die freien Wassermoleküle bewirken einen immer stärkeren Anstieg der Dielektrizitätskonstante. Tonige Böden mit großer spezifischer Oberfläche binden eine größere Menge Wasser fest an der Oberfläche als sandige Böden.

Die Messtiefe, aus der das Signal zurückgestreut wird, ist von der Dielektrizitätskonstante an der Grenzschicht Luft/Boden abhängig und beträgt 1/10 der Wellenlänge λ (WILHEIT 1978) bzw. 0,06 – 0,1λ (MO 1982).

3.1.3.2.3 Geometrische Effekte

Wie zuvor beschrieben, handelt es sich beim SAR um ein Seitensicht-Radar. Folglich erzeugt die Abbildungsgeometrie des SAR in einem Untersuchungsgebiet mit Topographie spezielle geländebedingte Verzerrungen wie **Foreshortening**, **Layover** und **Radarschatten**. Wird ein höher gelegener Punkt näher am Sensor abgebildet als tiefer gelegene in gleicher Ground-Range-Entfernung, dann spricht man vom Foreshortening-Effekt (Abb. 3.16). Layover beschreibt den Effekt (Abb. 3.17), dass bei großen Hangneigungen ($\alpha > \phi$) höher gelegene Punkte (z.B. die Gipfel steiler Berge) im Bild näher am Sensor abgebildet werden als alle tiefer gelegenen Punkte desselben Objektes (Punkte am Fuß des Berges). Der Radarschatten (Abb. 3.18) tritt auf der sensorabgewandten Seite von steilen Objekten auf, da die

sensorabgewandte Seite nicht beleuchtet wird und von daher auch nicht zurück streut. Layover- und Foreshortening-Effekt können mit Hilfe eines Digitalen Geländemodells (DGM) kompensiert werden (VAN ZYL et al. 1993).

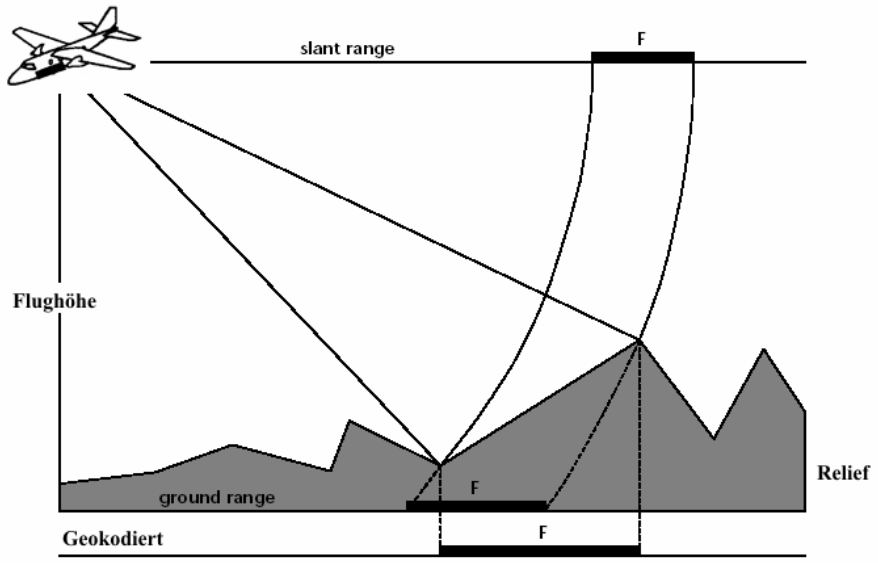


Abb. 3.16: **Foreshortening: Vom Foreshortening-Effekt (F) spricht man, wenn ein höher gelegener Punkt näher am Sensor abgebildet wird als tiefer gelegene in gleicher Ground-Range-Entfernung.**

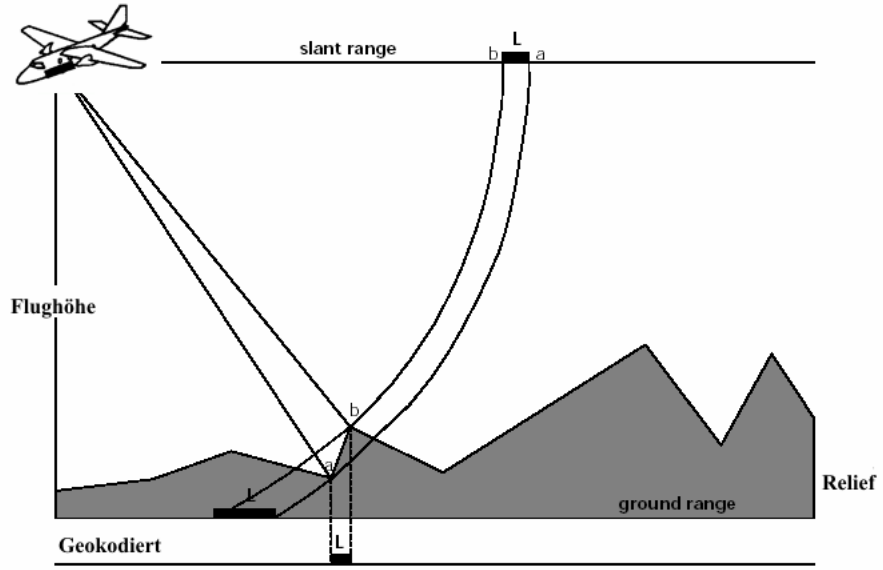


Abb. 3.17: **Layover: Layover (L) beschreibt den Effekt, dass bei großen Hangneigungen ($\alpha > \phi$) höher gelegene Punkte im Bild näher am Sensor abgebildet werden als alle tiefer gelegenen Punkte desselben Objektes.**

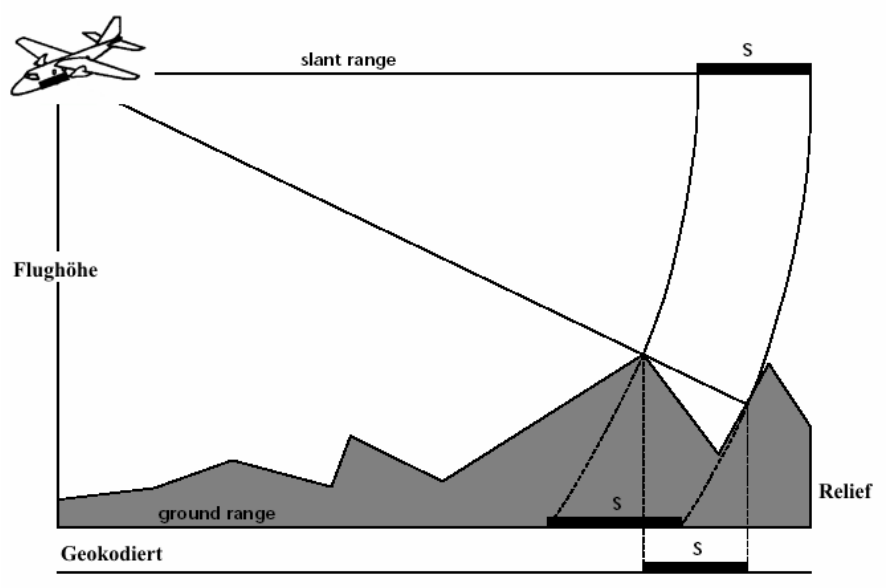


Abb. 3.18: **Radarschatten**: **Der Radarschatten (S) tritt auf der Rückseite von steilen Objekten auf, da deren Rückseite nicht beleuchtet wird und von daher auch nicht zurückstreut.**

Bei Flugzeug getragenen SAR-Systemen wie das E-SAR des DLR erzeugen die Plattformbewegungen sowie Variationen in der Flugbahn Änderungen in der Bildgeometrie. In MOREIRA (1993) werden Algorithmen zur Kompensation dieser Effekte diskutiert.

Weitere Faktoren, wie Wasserwellen, Treibgut und Fahrzeuge, die ebenfalls die Bildgeometrie beeinflussen, werden in HOLECZ et al. (1993) beschrieben.

3.1.4 Speckle-Reduktion

In der SAR-Bildverarbeitung wird Speckle im Allgemeinen als unerwünschtes Störsignal betrachtet. Es wird daher versucht, die Varianz des Speckle in Bezug auf den Mittelwert der Rückstreuung so weit wie möglich zu reduzieren. Die Reduzierung des Speckle-Effektes geht jedoch immer zu Lasten der räumlichen Auflösung des Radarbildes, so dass für jede Aufgabenstellung ein individueller Kompromiss zwischen notwendiger Auflösung und bestmöglicher Speckle-Filterung gefunden werden muss.

Neue Forschungen auf dem Gebiet des Speckle versuchen Informationen auszuwerten, die im Speckle steckt, frei nach dem Motto: „*A one man´s noise is another man´s signal*....“ (RANEY 1998).

Zur Reduktion des Speckle-Rauschens in SAR-Bildern kommen zwei unterschiedliche Methoden zur Anwendung: Zum einen die Multilook-Verarbeitung und zum anderen die Speckle-Filterung. Beide Methoden wurden angewandt und werden im Folgenden kurz erläutert.

3.1.4.1 Multilook-Verarbeitung

Die Multilook-Verarbeitung (Verarbeitung mehrfacher Sichten) besteht aus einer inkohärenten Addition von statistisch unabhängigen Bildern (Looks). Dabei kann die Erzeugung eines *N*-Look Bildes durch die Zerlegung der synthetischen Apertur in *N* Teile erfolgen, wobei die so entstandenen Datensätze alle separat prozessiert und anschließend gemittelt werden, oder indem *N* Pixel von Singlelook-Daten nach der Prozessierung gemittelt werden (Gl. 3.20). Beide Methoden lassen sich sowohl in Azimut- als auch in Range-Richtung anwenden, wobei in der Regel die Azimut-Richtung bevorzugt wird (KELLER 2000).

$$\left|u_0(x,r)\right|^2 = \frac{\sum_{i=1}^{L}\left|s_a(x,r) * h_{ai}(x,r)\right|^2}{L} \qquad \text{(Gl. 3.20)}$$

Zwischen der radiometrischen Auflösung und der geometrischen Auflösung besteht ein direkter Zusammenhang, wie in Gl. 3.21 und Gl. 3.22 dargestellt ist. Aus Gl. 3.7 geht hervor, dass sich die Azimutauflösung durch die Verkleinerung der Bandbreite verschlechtert:

$$\delta_{al} = \delta_a * L_0 = k_a * \frac{v * L_0}{B_a} \qquad \text{(Gl. 3.21)}$$

Mit wachsender Anzahl von unabhängigen, nicht überlappenden Looks (L_0) wird die Azimutauflösung (δ_{al}) bei der Multilook-Verarbeitung schlechter.

Die radiometrische Auflösung (γ_a) eines SAR-Bildes unter Berücksichtigung des Systemrauschens hängt von L_{eff} ab:

$$\gamma_a = 10 * \log_{10}\left[\frac{1+(S/N)^{-1}}{\sqrt{L_{eff}}}\right] \qquad \text{(Gl. 3.22)}$$

wobei S/N das Signal/Rausch-Verhältnis darstellt und L_{eff} der Anzahl von statistisch unabhängigen Looks entspricht. Die radiometrische Auflösung hängt bei einem Signal/Rauschverhältnis von > 5 dB lediglich von L_{eff} ab. Deshalb ist die Multilook-Verarbeitung für SAR-Systeme mit hoher Bildqualitätsanforderung unentbehrlich.

Die radiometrische Auflösung verbessert sich mit der Anzahl der Looks (Abb. 3.19), während sich die geometrische Auflösung um den Faktor *N* in der Richtung verschlechtert, in der die Mittelung stattfindet.

Die Abb. 3.19 zeigt eindrucksvoll die Reduktion des Speckle nach der Multilook-Verarbeitung im Vergleich zu einem Singlelook-Datensatz.

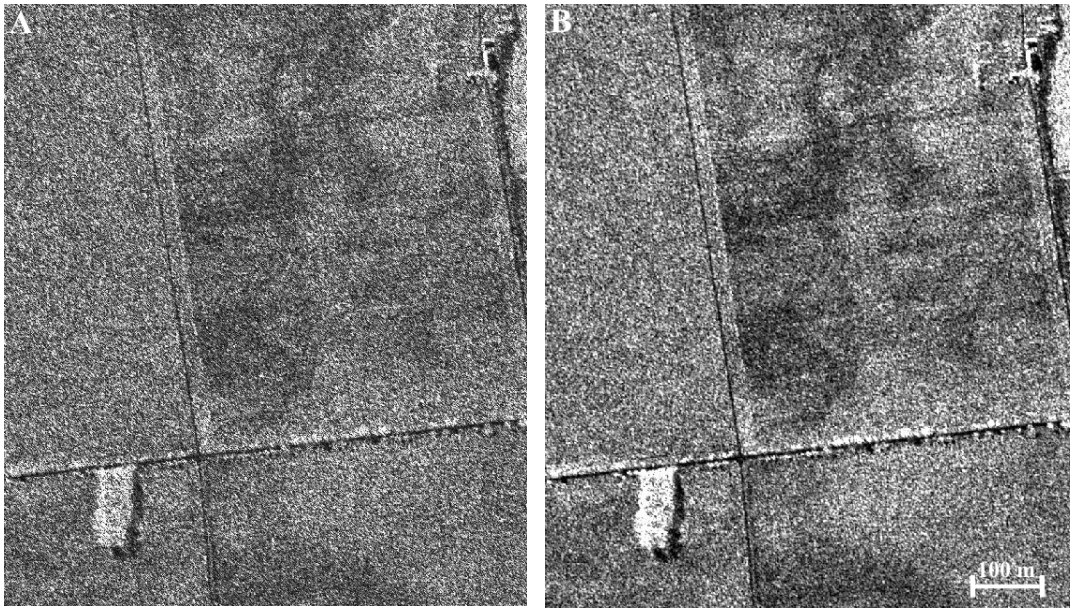


Abb. 3.19: X-Band E-SAR-Daten der Befliegungskampagne April 2002 für ein Testgebiet westlich des Fort Gorgast. A) Singlelook X_{HH}. B) Multilook X_{HH} (4 Looks).

3.1.4.2 Speckle-Filterung

Durch die zweidimensionale Filterung des prozessierten SAR-Bildes lassen sich ähnliche Ergebnisse erzielen wie bei der Multilook-Verarbeitung. Bei einigen Speckle-Filtern lässt sich der Verlust an Auflösung trotz starker Unterdrückung des Speckle reduzieren, jedoch nicht ganz vermeiden.

Speckle-Filter beziehen die Nachbarschaft um ein Zentralpixel in die Berechnung eines neuen Wertes für das Zentralpixel nach bestimmten, je nach Filter unterschiedlichen, statistischen Kriterien mit ein. Der Speckle wird so über homogenen Flächen deutlich reduziert. Die Wirkung verschiedener Filterfunktionen auf die Reduktion des Speckle-Rauschens wird in HAGG & STIES (1994) sowie in LI et al. (1983) beschrieben.

Die in der Bildverabeitungssofware zur Verfügung stehenden Speckle-Filter lassen sich allerdings nicht ohne Weiteres an polarimetrischen Daten einsetzen, da sie die Phasenbeziehung und die statistischen Eigenschaften verändern. Die meisten Filter sind zudem auf Singlelook Daten beschränkt. Für polarimetrische SAR-Daten ist die Verwendung von speziellen polarimetrischen Speckle-Filtern notwendig, wie z.B. in LEE et al. (1999) beschrieben.