

Vortrag Erdmessung III

Satellitenmissionen / SRTM

Matthias Noack 198896
Dandy Bahr 197294

16.06.2004

Inhaltsverzeichnis:

Einleitung.....	3
Die Mission	4
Das Messprinzip	6
<i>Radar</i>	6
<i>Antennenkonfiguration</i>	11
<i>Prinzip der Radarinterferometrie</i>	11
Verarbeitung der SRTM Daten.....	13
Erstellung der 3D Karte aus Interferometrie.....	16
Stand der Verarbeitung	17
Anwendungen	19
Neue Anwendungsbereiche	21
Glossar.....	23
Quellen	24

1 Einleitung

Im Jahre 1994 führten die National Aeronautics and Space Administration (NASA) und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit italienischer Beteiligung zwei gemeinsame Space Shuttle Missionen durch. Mit SIR-C/X-SAR befanden sich in der Cargobay des Shuttles drei in den USA, Deutschland und Italien entwickelten, bildgebende Radarsysteme zur großflächigen Abbildung der Erdoberfläche. Die Entwicklung und der erfolgreiche Einsatz dieser Systeme schufen die Voraussetzungen für die **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)** des Jahres 2000.

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Missionen des Jahres 1994 sowie auf der langen Erfahrung mit der Verarbeitung von Radardaten der europäischen Erdbeobachtungssatelliten ERS-1 und ERS-2 wurden Techniken entwickelt, um aus welt- raumgestützten Radardaten digitale Höhenmodelle oder korrekt digitale Oberflächenmodelle abzuleiten. Das verwendete Verfahren bezeichnet man als Radar- Interferometrie. Ein Fernerkundungs-Radarsystem sendet Mikrowellenimpulse zur Erdoberfläche, welche dort in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit mehr oder weniger stark reflektiert werden. Aus den Laufzeiten sowie aus der Verschiebung der Phasenlagen der empfangenen Wellenpakete lassen sich Informationen über die Entfernung des Messpunktes am Boden ableiten und schließlich ein zwei- dimensionales Bild der Radarreflektivität des abgebildeten Gebietes berechnen. Um aus den Radardaten zusätzlich Informationen über die Höhe jedes Geländepunk- tes zu gewinnen, müssen aber mindestens zwei Aufnahmen desselben Gebietes vorliegen, welche aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen wurden – ähn- lich einer optischen Stereoaufnahme. Bisher erlaubten nur flugzeuggestützte Radar- instrumente die zeitgleiche Aufnahme von zwei Bildern und vermieden damit diese Fehler. SRTM verwendete die Technik der gleichzeitigen Aufnahme erstmalig und bisher einmalig im Weltraum.

Durch die Installation einer zweiten Empfangsantenne für das Radarsignal wurde dies realisiert. Um den für eine Stereoauswertung notwendigen Abstand zwischen den Antennen zu erreichen, wurde die zweite Antenne an einem 60 Meter langen Mast außerhalb der Cargobay des Shuttles ausgefahren – ein Unterfangen, das nur in der Schwerelosigkeit funktionieren kann. Während des Starts und der Landung war der ausfahrbare Mast in einem Container in der Ladebucht des Shuttles verstaut. Durch diese Technik war es erstmals möglich, die Topographie großer Teile der Landoberfläche mit hoher Abdeckung und Genauigkeit zu erfassen. Die resultieren- den digitalen Höhenmodelle sind nicht nur für die geowissenschaftliche Forschung, wie die Hydrologie, unerlässlich. Sie sind eine der zentralen Informationsebenen für geographische Informationssysteme (GIS), für Pilotenassistenzsysteme, bei der Pla- nung von Mobilfunknetzen oder bei der Entwicklung von baulichen Großprojekten, wie Staudämmen, Flughäfen, Hochspannungstrassen oder Verkehrswegen. In Mit- teleuropa oder in den USA liegen diese Informationen in guter Genauigkeit für große Bereiche vor, global sind diese Daten aber nur in sehr geringer räumlicher Auflösung verfügbar. Mit einem Messpunktabstand von ca. einem Kilometer und einer vertikalen Genauigkeit von ca. 150 Metern sind globale Höhenmodelle wie GLOBE oder GTOPO-30 für die meisten Fragestellungen aber zu ungenau. Hinzu kommt, dass vorhandene Höhenmodelle stark inhomogen sind. Sie entstammen unterschiedlich- sten und teilweise unbekanntem Quellen, sind mit verschiedensten Techniken erhoben worden und beziehen sich in einigen Ländern auf unbekannte geografische Refe- renzsysteme. Mit der Auswertung der durch SRTM erhobenen Daten steht erstmals ein Datensatz mit einer horizontalen Auflösung von ca. 30 Metern und einer vertika- len Genauigkeit von sechs Metern für weite Teile der Landoberfläche zur Verfügung.

Das SRTM Höhenmodell ist grenzübergreifend aus dem Weltraum gewonnen und damit von homogener und kontrollierter Qualität sowie in einem einheitlichen Referenzsystem.

2 Die Mission

Die Shuttle Radar Topography Mission stellt eine der wichtigsten „Missionen zum Planeten Erde“ dar. Elf Tage lang umkreiste die amerikanische Raumfähre Endeavour mit Radarsensoren (X-SAR) unseren Planeten und erfasste dabei nahezu die gesamte Erdoberfläche kartographisch. Das Ergebnis dieser SRTM-Mission ist neues topographisches Datenmaterial - unverzichtbare Grundlage für Infrastrukturmaßnahmen in vielen, bis heute schlecht kartierten Ländern dieser Welt und zugleich Datenbasis für zahlreiche irdische Anwendungen von der Umweltforschung bis zur Geologie, von der Gletscherkunde bis zur Landwirtschaft. Das Besondere an dieser neuen Weltkarte, für die dieser Flug Daten sammelte, ist nicht nur, dass sie hochgenau, sondern erstmalig auch digital und dreidimensional erscheint. Aus den Informationen entsteht somit auch ein einheitlicher dreidimensionaler Datensatz, gewissermaßen die „Landkarte des 21. Jahrhunderts“, für die mehr als 113 Millionen Quadratkilometer der Erde hochpräzise vermessen wurde. Während der elftägigen Mission umrundete die Raumfähre die Erde 176-mal, 159 dieser Umläufe wurden für die Vermessung dieser genutzt. Während der Mission konnten dabei Daten für die Landmassen zwischen 60° Nord und 57° Süd aufgenommen werden. In diesem Bereich befindet sich rund 80 Prozent der festen Erdoberfläche.

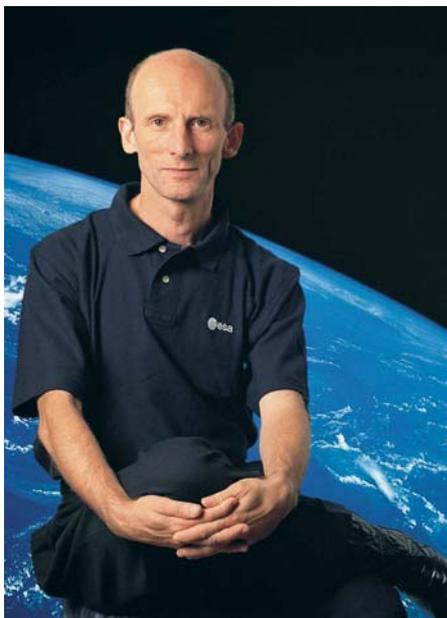


Abb.1: Dr. Gerhard Thiele

Zur Besatzung des Shuttles gehörte auch der deutsche ESA-Astronaut Dr. Gerhard Thiele¹ (siehe Abb.1). Fünf weitere Astronauten, darunter vier Amerikaner und ein Japaner, zählten zum Team. Die SRTM-Mission ist ein Gemeinschaftsprojekt der NASA, der amerikanischen National Imagery and Mapping Agency (NIMA), des DLR und der Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Das DLR ist für den Betrieb des deutsch-italienischen X-SAR-Radarsystems verantwortlich und zudem an der Missionsplanung und an der Datenauswertung beteiligt. Das NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) hat die Aufgabe der Entwicklung des SIR-C- Interferometers, Dornier Satellitensysteme GmbH (DSS) ist industrieller Hauptauftragnehmer für die Entwicklung des X-SAR-Interferometers.

Bei der SRTM-Mission wird die Erde erstmalig aus zwei unterschiedlichen Perspektiven mit Radar „ins Visier“ genommen und damit ein Stereoblick, Grundlage für den dreidimensionalen Charakter der Karte, generiert. Das Space Shuttle wendet bei den Messungen seinen „Rücken“ der Erde zu (siehe Abb.2). Die geöffnete Ladebucht gibt dem zwölf Meter langen Haupt-Radargerät den Blick auf den Globus frei. Eine zwei-

¹ Ausbildung zum Astronauten im DLR, Fortsetzung bei der NASA, heute Mitglied des europäischen Astronauten Teams der ESA

te, etwas kleinere Außenantenne wird an einem 60 Meter langen Mast ausgefahren. Dadurch kann die Erde mit zwei „Radaraugen“ gleichzeitig betrachtet werden.



An Bord waren zwei interferometrische Radarsysteme, die verschiedene Wellenlängenbereiche nutzten: Das amerikanische C-Band Radar arbeitete im Wellenlängenbereich von 5,6 Zentimeter. Das deutsch-italienische X-Band System (X-SAR) zeichnete Daten im Bereich von 3,1 Zentimeter Wellenlänge auf. Bedingt durch seine geringere Streifenbreite konnte mit dem X-Band-Radar keine vollständige Abdeckung erreicht werden. Die vertikale Genauigkeit der Höhenmodelle ist dafür bei den X-Band-Daten annähernd

Abb.2: Space Shuttle Endeavour im Orbit mit Auslegemast

doppelt so hoch wie im C-Band.

Mit an Bord war ein ganzes Arsenal moderner Orbit- und Lagemessgeräte, die zu jedem Zeitpunkt der Mission den Ort und die Ausrichtung des Shuttles und seines Mastes aufzeichneten. Speziell die Lagemessungen mussten auf wenige Bogensekunden genau sein, um die spätere Datenverarbeitung weitestgehend automatisch durchführen zu können. Sieben Stunden nach dem Start wurde der Auslegerarm ohne Probleme ausgefahren, und bereits 90 Minuten später konnten die ersten Radardaten empfangen und zu Testzwecken zum Boden übertragen werden. Nach einer eingehenden Datenanalyse wurde einige Stunden später das erste unkalibrierte X-SAR Höhenmodell von den DLR-Wissenschaftlern veröffentlicht. Es zeigt die Gegend um White Sands in New Mexico. Nach elf Tagen im Orbit wurde am 22. Febr. der Mast erfolgreich wieder in den dafür vorgesehenen Container eingefahren, und der Shuttle kehrte nach erfüllter Mission zur Erde zurück. Im Gepäck hatten die Astronauten 330 Magnetbänder mit insgesamt ca. zwölf Terrabyte hochauflösender Radardaten.

Da seit Febr. 1997 erstmals wieder ein Deutscher ins All startete, bestand per Internet die Möglichkeit, täglich Live-Video-Übertragungen anzusehen. Außerdem führte Dr. Gerhard Thiele Bordtagebuch, in dem er seine persönlichen Eindrücke schilderte. Desweiteren bestand die Möglichkeit, die Endeavour zwischen dem 12. und 16. Febr. 2000 über Deutschland zu sehen (siehe Tab.1).

Datum/Wochentag	Norddeutschland (Hamburg)	Ostdeutschland (Berlin)	Westdeutschland und Mitte (Köln/Frankfurt)	Süddeutschland (München)
12.2.	18.51	18.51	18.51	18.52
13.2.	18.38	18.38.30	18.38	18.39
14.2.	18.25	18.25.30	18.25 und 19.57	18.26
15.2	18.12	18.12.30	19.45	18.13
16.2	-	17.59	19.32	-

Tab.1: Endeavourflug über Deutschland

Dabei hat der Shuttle eine Leuchtkraft eines hellen Sterns, der sich innerhalb von vier Minuten von Horizont zu Horizont bewegt. Die kurze Beobachtungszeit ergibt sich aus der hohen Geschwindigkeit der Raumfähre von etwa 28000 Stundenkilometern und ihrer niedrigen Flughöhe von rund 233 Kilometern.

Hier die Übersicht einiger Missionsparameter:

Start:	11. Febr. 2000, 18.43 Uhr MEZ
Landung:	23. Febr. 2000, 00.22 Uhr MEZ
Dauer:	11. Tage
Space Shuttle:	Endeavour (STS-99)
Orbithöhe:	233 km
Gesamtgewicht:	13,6 t
Anzahl der Data Takes:	ca. 1000 (80% der Landmassen)
Datenrate:	C-Band: 180 Mbits/sec X-Band: 90 Mbits/sec
Datenbänder:	ca. 300-330
Datenmenge:	ca. 10-12 Terrabyte (15.000 CD's)

Obwohl täglich Daten übermittelt wurden, aus denen neue Bilder und Höhenmodelle verschiedenster Regionen der Erde entstanden, speicherte man den größten Teil der Informationen zunächst an Bord und bereitete sie erst nach der Landung auf. Dieses sollte über einen Zeitraum von etwa zwei Jahren passieren.

3 Das Messprinzip

3.1 *Radar*

Mit Radar sehen lernen

Von ihren ersten Anfängen bis heute haben sich die Radarsysteme zu äußerst leistungsfähigen Fernerkundungsinstrumenten entwickelt.

Der Physiker Heinrich Hertz wies 1886 erstmals die Reflexion von Radiowellen nach. Damit war ein Grundprinzip entdeckt. 1904 - achtzehn Jahre später - ließ sich der Hochfrequenztechniker Christian Hülsmeier sein „Telemobiloskop“ patentieren: das erste Gerät zur Ortung mit Radiowellen.

In den dreißiger Jahren waren es dann vor allem Militärs, die die neu entwickelte Radartechnik zum Aufspüren und Verfolgen von Flugzeugen und Schiffen nutzten. Da Radarsysteme weit reichen und auch bei Nacht und Bewölkung arbeiten, sind sie optischen Verfahren überlegen. Zuerst betrieb man Radar vom Boden aus, doch bereits 1934 stellte das amerikanische Marineforschungslabor das erste flugzeuggetragene Pulsradarsystem vor. Die weitere Erforschung von Funkortungsverfahren unterlag in Deutschland, den USA, Großbritannien und Frankreich der militärischen Geheimhaltung. Die anfangs verwendeten Ultrakurzwellen (mit einer Frequenz von 30 bis 300 Megahertz, VHF-Band) wurden von hochfrequenten Dezimeterwellen (mit 300 Megahertz bis 3 Gigahertz, UHF-Band) abgelöst.

Nach dem Krieg wurde die Radartechnik in steigendem Maße auch für zivile Zwecke in Luft- und Seeverkehr, im Vermessungswesen und in der Forschung eingesetzt.

Anfang der sechziger Jahre begann die Wissenschaft mit hochauflösenden, flugzeuggetragenen Radarsystemen zu experimentieren. Ihr Nutzen für Kartierungen, Ozeanographie und Landnutzungsstudien wurde schnell erkannt und verstärkte das Interesse der verschiedensten Wissenschaftszweige.

Erste Blicke aus dem All

Will man größere Gebiete überblicken, muss man sich noch höher hinauf begeben als dies mit Flugzeugen möglich ist. Es war also nur eine Frage der Zeit, bis man den Weltraum für Radarbeobachtungen nutzte. 1962 unternahm amerikanische Forscher vom Jet Propulsion Laboratory der NASA die ersten Tests, bei denen ein Radarsystem mit einer Rakete ins All gebracht wurde. Die weiterentwickelte Version dieses Radarsystems flog im Dezember 1972 an Bord von Apollo 17 zum Mond. Mit verschiedenen Radarfrequenzen wurden die Oberfläche unseres Trabanten und geologische Strukturen unter der Mondoberfläche in „Augenschein“ genommen. Die Erfolge dieses Lunar Sounder Experiments, sowie die guten Beobachtungsergebnisse eines flugzeuggetragenen L-Band Radars über dem Golf von Kalifornien veranlassten die NASA, auf dem geplanten SEASAT-Satelliten auch ein SAR-System (Synthetic Aperture Radar) mitzuführen.

Im Juni 1978 startete SEASAT zur Beobachtung der Ozeane. Das Radarsystem des Satelliten arbeitete im L-Band (bei einer Frequenz von 1,25 Gigahertz und einer Wellenlänge von 23,5 cm) und lieferte sensationelle Bilder von der Erde. Nach 100 Tagen legte jedoch ein Kurzschluss die Energieversorgung des Satelliten lahm. Trotz dieser kurzen Lebensdauer sammelte SEASAT mehr Informationen über die Topographie der Ozeane als dies zuvor in 100 Jahren Forschung per Schiff möglich war. Die Idee, Radarsysteme auf Raumfähren einzusetzen, nahm in den achtziger Jahren Gestalt an. In der Zeit von 1981 bis 1984 befanden sich bei Shuttle-Flügen mehrmals Radarsysteme zur Erprobung mit im wissenschaftlichen Gepäck. Die Testphase begann im November 1981 mit dem amerikanischen Shuttle Imaging Radar (SIR-A). SIR-A erkundete vom Nutzlastraum des Space Shuttles Columbia aus die Erde und arbeitete ebenfalls im L-Band, das sich als gut geeignet für die Erderkundung erwies. Die Aufzeichnung der Ergebnisse erfolgte damals noch mit einem analogen Recorder. Die Radarbilder brachten neue Erkenntnisse über die Abbildung geologischer Strukturen.

Bei der ersten Spacelab-Mission im Jahr 1983 wurde ein Microwave Remote Sensing Experiment mitgeführt, das Wissenschaftler des DLR entwickelt hatten. Im Oktober 1984 startete der Space Shuttle Challenger mit der Antenne SIR-B, einer verbesserten Version der Antenne SIR-A. SIR-B war das erste mechanisch schwenkbare Synthetic Aperture Radar, das Radarabbildungen unter verschiedenen Einfallswinkeln ermöglichte. Die Aufzeichnung der Daten erfolgte nun vollständig digital. Die Kalibrationstechnik wurde verfeinert; geologische und ozeanographische Untersuchungen ergänzten das Wissen.

1987 startete die damalige Sowjetunion ebenfalls einen SAR-Satelliten, der den Namen Cosmos-1870 trug und zwei Jahre in einer Umlaufbahnhöhe von 270 Kilometern arbeitete. Ihm folgte 1991 der Satellit ALMAZ-1.

Immer mehr „Radaraugen“ blicken auf die Erde

Die Erfolge der ersten Radarbeobachtungen aus dem All ermutigten auch die Europäische Weltraumagentur ESA, einen eigenen Radarsatelliten in Auftrag zu geben. ERS-1 (European Remote Sensing Satellite) startete im Juli 1991 in den Erdorbit. Der Satellit war für eine Lebenszeit von fünf Jahren ausgelegt. Zur Freude der Wissenschaftler arbeitete ERS-1 jedoch über sein Soll hinaus. Im April 1995 folgte ihm sein fast baugleicher Nachfolger ERS-2. ERS-1 wird seit 1996 als Back-up-Satellit für seinen Nachfolger eingesetzt und wurde zum Beispiel zur Beobachtung des Ausbruchs des isländischen Vulkans Vatnajökull im Jahr 1997 reaktiviert. ERS-1 und ERS-2 arbeiteten einige Zeit sogar im Tandem-Betrieb. Die beiden ERS-Satelliten umkreisen die Erde in 785 Kilometer Höhe auf polaren Orbits und benutzen für ihre

Messungen das C-Band (bei einer Wellenlänge von 6 cm und einer Frequenz von 5,3 Gigahertz). Die ERS-Satelliten können zwischen verschiedenen Blickweisen wechseln: Dem Image-Modus, mit dem sie die Erdoberfläche abtasten, und dem Wind- oder Wellenmodus, der hauptsächlich zur Erkundung der Ozeane dient. Die Radar-daten von ERS-1 und ERS-2 finden mittlerweile in vielen Bereichen des Umweltmoni-toring Verwendung. Auf den Ozeanen werden Seegang und Wellenfronten, Ölteppi-che und Sedimenteintrag von Flüssen sowie Eisbedeckungsgrad und Eisbewegun-gen beobachtet. Zu Lande liefern ERS-Aufnahmen wertvolle Informationen über Landnutzung und Abholzung, über geologische Strukturen und Erdbebengebiete. 1992 startete auch die Japanische Raumfahrtagentur einen eigenen Satelliten mit einem Synthetic Aperture Radar an Bord. JERS-1 (Japanese Earth Resources Satel-lite) hatte die Aufgabe, Daten über die Landmasse der Erde zu sammeln und vor al-lem Bodenschätze aufzufinden. Daneben sammelte JERS-1 auch Daten für Umweltschutz, Land- und Forstwirtschaft, Landnutzung, Fischerei, Küstenbeobachtung und Katastrophenschutz.

In den neunziger Jahren wurden mit amerikanischen Raumfähren reine Radarmissi-onen geflogen. Im Jahr 1994 startete der Space Shuttle Endeavour, ausgerüstet mit den Radarsystemen SIR-C und X-SAR, zweimal in den Orbit. Das SIR-C-Radar (Shuttle Imaging Radar C) wurde vom Jet Propulsion Laboratory der NASA entwi-ckelt, das X-SAR-Radar (X-Band Synthetic Aperture Radar) wurde vom DLR sowie der italienischen Raumfahrtagentur ASI entwickelt. Das Institut für Hochfrequenz-technik des DLR in Oberpfaffenhofen hat das X-SAR-Radar konzipiert. Die beiden Radarsysteme - SIR-C (12 m x 3,8 m) und X-SAR (12 m x 0,4 m) - füllten den Nutz-lastraum des Shuttles völlig aus. Die erste Mission wurde im Frühjahr durchgeführt, eine zweite im Herbst, um jahreszeitliche Unterschiede auf den Radarbildern festzu-stellen. Das amerikanische SIR-C und das deutsch-italienische X-SAR-Radar arbei-teten in drei verschiedenen Bändern: dem bewährten L-Band (1,25 Gigahertz, 23,5 cm), dem C-Band (5,3 Gigahertz, 6 cm) und dem X-Band (9,6 Gigahertz, 3 cm). Durch die multi-frequente Arbeitsweise erhielt man noch vielfältigere Informationen über die Erdoberfläche. Eine Reihe spektakulärer Bilder zeigte den Nutzen der Ra-dartechnik für verschiedene Wissenschaftszweige, wie z.B. für die Archäologie. So wurden bei der Shuttle Mission 1994 die ganzen Ausmaße der vom Urwald überwucherten Tempelanlage von Angkor in Kambodscha sichtbar. Und neben der heutigen chinesischen Mauer entdeckte man auf den Radarbildern Überreste einer noch älte-ren Maueranlage, die völlig abgetragen und vom Boden aus nicht mehr erkennbar ist.

RADARSAT, der kanadische Radarsatellit, umkreist seit 1995 die Erde und dient un-ter anderem der täglichen Routineüberwachung der Arktis. Die Informationen zur Eisbedeckung und Kartierung nutzen vor allem der Schifffahrt. Aber auch natürliche Ressourcen wie Grundwasservorkommen, Mineral-, Öl-, und Gaslagerstätten werden von RADARSAT erkundet.

Know-how des DLR für die „Radaraugen“

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ist mit vier seiner Einrichtun-gen an den Radarprojekten zur Fernerkundung beteiligt:

Die Projektdirektion des DLR in Bonn-Oberkassel ist im Auftrag des Bundesministe-riums für Bildung und Forschung mit der Planung, Leitung und Überwachung des deutschen Raumfahrtprojekts betraut.

Das Institut für Hochfrequenztechnik des DLR in Oberpfaffenhofen kann aus seiner langjährigen Erfahrung mit abbildenden Synthetic Aperture Radar Systemen schöp-fen. Es stellt Projektwissenschaftler, Projektingenieure, Systemingenieure für die

Überwachung der Instrumentenentwicklung und die Kernmannschaft für den Missionsbetrieb, die während der SIR-C/X-SAR-Mission im NASA-Kontrollzentrum in Houston arbeitet. Die Hochfrequenztechniker sind auch für die Korrekturen und die Eichung des Systems verantwortlich.

Das Deutsche Raumfahrt-Kontrollzentrum des DLR betreut seit 1969 erfolgreich bemannte und unbemannte Missionen. Für die Mission SRTM wird das X-SAR-Bodensegment aufgebaut und die Missionsplaner erstellten schon Jahre im Voraus Pläne für alle Einzelheiten des X-SAR-Einsatzes. Der genaue Zeitplan für den X-SAR-Einsatz sowie das Daten- und Bandmanagement sind die zentralen Aufgaben der Missionsplanung.

Das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des DLR verarbeitet die Daten, die bei der Radarmission anfallen. Bereits zu Beginn der achtziger Jahre befasste sich die damalige Abteilung „Angewandte Datentechnik“ mit der Verarbeitung der SEASAT-Daten und der SIR-B-Shuttle-Mission. Auch die Daten der europäischen ERS-Satelliten wurden und werden in Oberpfaffenhofen zu digitalen Karten verarbeitet. Mit zunehmender Spezialisierung auf die Fernerkundung entwickelte sich aus der Abteilung „Angewandte Datentechnik“ das DFD in seiner heutigen Form. Die Entwicklung der Verarbeitungsanlagen, die Datenverarbeitung, die Archivierung und die Verteilung der SIR-C/X-SAR-Ergebnisse bilden weitere Schwerpunkte in der Arbeit des DFD. Das DFD investiert viel Entwicklungsarbeit in die Auswertung der Radardaten und erstellt vor allem digitales Kartenmaterial, das an Wissenschaftler, Behörden und in steigendem Maß auch an kommerzielle Nutzer in aller Welt weitergeleitet wird.

Neue „Radaraugen“ schauen auch in „stereo“

Die Mission SRTM, bei der mit Hilfe der Radarsysteme ein digitales dreidimensionales Höhenmodell für die gesamte Landmasse der Erde zwischen dem 60. Grad nördlicher und 57. Grad südlicher Breite erstellt wird, ist eine weitere technische Herausforderung. Diesmal werden die beiden Radarsysteme SIR-C und X-SAR gleich in doppelter Ausführung mitgenommen. Das Hauptradar, das Radarsignale sendet und empfängt, ist in der Ladebucht des Shuttles untergebracht. Die zweite Antenne, die nur Signale empfängt, wird an einem 60 Meter langen Mast innerhalb von 40 Minuten ausgefahren. Diese Konfiguration ermöglicht es, die Erde mit zwei „Radaraugen“ gleichzeitig zu betrachten - sozusagen im „Stereo-Blick“. Die früheren Missionen mussten für diesen „Stereo-Blick“ ein Gebiet zweimal überfliegen und die Daten dann zu einem Bild zusammensetzen. Dabei gab es zwei kritische Punkte: Die Flugbahnen mussten zum einen sehr präzise eingehalten werden; sie durften höchstens 100 bis 500 Meter auseinander liegen. Zum anderen verstrichen zwischen zwei Überflügen immer einige Tage, bei denen sich die Reflektionseigenschaften der Erdoberfläche (z.B. Bodenfeuchte oder Orientierung der Blätter an Bäumen), aber auch die Ausbreitungsbedingungen in der Atmosphäre zwischen den Aufnahmen veränderten. Durch diese Abweichungen konnten die beiden Radarbilder desselben Gebietes so unterschiedlich aussehen, dass eine Überlagerung sinnlos wurde oder es zu Fehlern im Höhenmodell kam.

Die Anforderungen an Stabilität und Temperaturbeständigkeit des Mastes sind ausgesprochen hoch. Der Abstand der beiden Antennensysteme von 60 Metern darf nur minimal schwanken. Kleinste Abweichungen müssen millimetergenau vermessen, aufgezeichnet und später verrechnet werden. Der Mast ist aus Karbonfaser-Segmenten aufgebaut und wird mit Titan-Seilen verspannt. Sollte sich der Mast am Ende der Mission nicht mehr einfahren lassen, kann er - ohne Schaden für den Shuttle - abgesprengt werden.

Radar nutzt für die Abbildung der Erdoberfläche den Bereich des elektromagnetischen Spektrums zwischen 3 und 25 Zentimetern. Als „Beleuchtungsquelle“ dient, anders als sonst in der Fernerkundung üblich, nicht die Sonne, sondern ein aktiv vom Radar zur Erde gesandtes Mikrowellensignal. Durch diese aktive „Beleuchtung“ funktioniert das Verfahren auch bei Dunkelheit, wenn sich der Shuttle auf der der Sonne abgewandten Seite der Erde befand. Die eingesetzten Wellenlängenbereiche haben zusätzlich den Vorteil, dass die Signale ungehindert Atmosphäre und Wolken durchdringen. Ohne diese Eigenschaften wäre die erreichte, vollständige Abdeckung des zu vermessenden Bereiches in so kurzer Zeit nicht möglich gewesen. In Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Oberfläche, auf die die ausgesandte Welle auftrifft, wird diese reflektiert und von den beiden Empfängern im Shuttle und am Mastausleger aufgezeichnet. Neben der Helligkeit oder Intensität des reflektierten Signals werden bei Radarsystemen auch die Laufzeit des Signals sowie der zugehörige Phasenwert der empfangenen Radarwelle gespeichert – und zwar für jeden Empfangskanal getrennt.

Der durch den 60 Meter langen Mast erreichte unterschiedliche Blickwinkel bildet die Grundvoraussetzung für die Bestimmung einer dreidimensionalen Bodenkoordinate. Dazu werden die Unterschiede in der Laufzeit und Phase der beiden empfangenen Signale gemessen und in einem so genannten Interferogramm dargestellt. Dieses ist ein Bild der Phasendifferenzen und damit der Stereo-Parallaxen zwischen den beiden Datensätzen. Im Interferogramm zeigt sich die Geländeform bereits in den Linien gleicher Phasendifferenz – den so genannten Fringes. Diese erinnern stark an Höhenlinien, wie sie aus topographischen Karten bekannt sind. In einem weiteren Schritt wird aus der exakten Kenntnis der Shuttle-Position dessen Lage im Raum und dem Interferogramm für jeden Messpunkt der Höhenwert in Metern über Normalnull berechnet. Zur Eichung der Daten dienen dabei die Meeresoberfläche sowie die Höhenlage bekannter Objekte, wie von Flughäfen. Die Radargeräte wurden immer ca. 200 bis 300 Kilometer vor Erreichen eines Kontinents über dem Ozean eingeschaltet und auch noch einige Zeit nach Verlassen des Kontinents weiter betrieben. So erhielt jeder Aufnahmestreifen an seinem Beginn und seinem Ende je eine Referenzmessung. Aus Altimeterdaten des Ozeans, dem aktuellen Luftdruck und Tidenmodellen wurde die exakte Meereshöhe zum Aufnahmezeitpunkt vom Geoforschungszentrum in Potsdam berechnet und das jeweilige SRTM Höhenmodell darauf geeicht.

Das Ergebnis der Verarbeitung ist ein digitaler Datensatz, in welchem für jeden Bildpunkt ein Höhenmesswert vorliegt. Um die Inhalte der Daten besser darstellen zu können, werden diese in der Regel, ähnlich der Farbgebung in einem Atlas, eingefärbt und schattiert.

Radarsysteme	SIR-C	X-SAR
Inboard-Antennenfläche	12m x 80cm	12m x 40cm
Outboard-Antennenfläche	8m x 80cm	6m x 40cm
Wellenlänge	5,6cm	3,1cm
Frequenz	5,3GHz	9,6GHz
Hor. Auflösung	30m	30m
Relative Höhengeng.	10m	6m
Breite d. Aufnahmestreifen	225km	50km
Kartierte Landfläche	100%	40%

Tab.2: Daten zu den verwendeten Radarsystemen

3.2 Antennenkonfiguration

Die Konfiguration des SRTM-Interferometers wird durch die (bereits auf den ersten beiden SRL Missionen bestehende) Antennenstruktur in der Ladebucht des Shuttles, einem ausfahrbaren Gittermast und einer weiteren Antenne am Ende des Mastes gebildet.

Zu den 9800 kg der bisherigen Masse sind nun noch etwa weitere 3000 kg für Mast und die mit dem Primärsystem verkabelten Sekundärentennen hinzugekommen. Die Antennenstruktur wird ausgeklappt und mit Stellmotoren exakt parallel zu den Hauptantennen ausgerichtet.

Diese Konfiguration sollte für präzise interferometrische Messungen absolut steif und in seiner Ausrichtung stabil sein. Instrumente im All sind aber extremen Umweltbedingungen (thermischen Änderungen sowie Lageunstabilität) ausgesetzt. Daher müssen alle Bewegungen und Lageänderungen registriert oder kompensiert werden. Um den Mast steif und thermisch stabil zu halten wird er aus Karbonfaserrohrsegmenten und Titanspannseilen gefertigt. Dies reduziert die Verwindung über dem gesamten Temperaturbereich auf nur 0,14 Grad. Trotz der extremen Steifigkeit schwankt die Sekundärentenne an der Mastspitze um bis zu 0,03 Grad dynamisch gegenüber der Primärentenne. Dies könnte zu irreparablen Fehlern führen und wird daher in Echtzeit vermessen und durch elektronische Nachführung des X-SAR Sekundärentennenstrahls kompensiert. Auch der Abstand zwischen den Phasenzentren der Antennen ist äußerst kritisch und muss auf den Millimeter genau ständig gemessen werden, um die Veränderungen der Konfiguration bei der Verarbeitung der Daten zu berücksichtigen. Der Abstand wird mit Infrarot-Laser Entfernungsmessern, die Ausrichtung mit einem sogenannten Sternensensor vermessen. Die Lage des gesamten interferometrischen Systems wird weiter ständig mit GPS-Empfängern (Position und Geschwindigkeit), einem Lage-Kreiselpaket und einem weiteren Sternensensor bestimmt.

Die 40 Mikrosekunden langen Radarpulse werden mit einer Spitzenleistung von 3 KW nur über die Primärentenne abgestrahlt. Das Rückstreusignal vom Boden wird über die Primär- und die Sekundärentenne an die beiden Empfänger weitergeleitet. Mehr als 80 Stunden Radarrohdaten mit einer Rate von 270 Millionen Bit pro Sekunde werden von den beiden Radarsystemen zusammen erzeugt und auf zwei Hochleistungs-Kassettenrekordern aufgezeichnet.

3.3 Prinzip der Radarinterferometrie

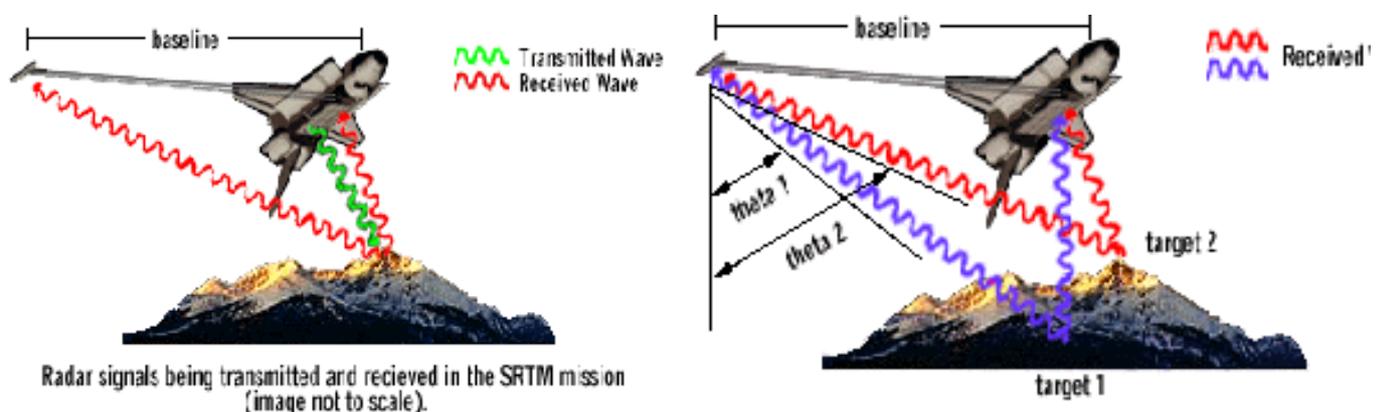


Abb.3: Die Messung beim interferometrischen SAR (rechts)

Bei einem **konventionellen** Synthetisch Apertur Radar (SAR) wird die Erdoberfläche mit kurzen, von einer Radarantenne abgestrahlten Pulsen, "beleuchtet". Der Radarpuls wird von der Erdoberfläche reflektiert und das sogenannte Radarecho, wiederum von der Antenne empfangen und aufgezeichnet. Um eine hohe räumliche Auflösung zu erzielen, werden zwei unterschiedliche Methoden angewendet: Zum einen bewegt sich das SAR-Instrument mit hoher Geschwindigkeit über die Erdoberfläche, z.B. bei der SRTM Mission im Space Shuttle mit etwa 27000 Kilometern pro Stunde. Während das Shuttle einen Punkt der Erdoberfläche überfliegt werden die Echos vieler abgestrahlter Radarpulse aufsummiert. Dieses kommt fiktiv einer sehr großen Radarantenne gleich (synthetische Apertur), in Abhängigkeit von der Größe der in dieser Zeit zurückgelegten Entfernung. Mit diesem Verfahren wird die räumliche Auflösung in Flugrichtung erhöht, da diese von der Antennengröße abhängt. Zur Steigerung der Auflösung quer zur Flugrichtung wird ein anderes Verfahren angewendet: Die Radarimpulse werden nicht senkrecht nach unten, sondern schräg zur Erdoberfläche abgestrahlt. Dadurch können (bei flacher Erdoberfläche) weiter vom Radar entfernt liegende Punkte durch Laufzeitmessungen von nahen Punkten unterschieden werden. Das Radarsignal benötigt auf seinem Weg von der Antenne zum Zielpunkt und zurück für die größere Entfernung mehr Zeit. Dies führt aber auch zu dem Problem, das bei großen Höhenunterschieden im Gebirge zwei Zielpunkte mit gleicher Entfernung zum Sensor, aber mit unterschiedlichem Ort und Höhe, nicht getrennt werden können, da die Echos die Antenne gleichzeitig erreichen.

Beim **interferometrischen** SAR wird eine zweite, räumlich von der ersten getrennte Antenne benutzt, um diese Mehrdeutigkeit aufzulösen und eine dreidimensionale Erfassung der abgebildeten Oberflächen zu erreichen. Die Aufnahmegeometrie ist



Abb.4: Kohärenzkarte

damit ähnlich derjenigen bekannten stereometrischen Verfahren und hat zur Folge, dass nunmehr Punkte, die mit nur einer Antenne nicht getrennt werden konnten, da sie unterschiedliche Höhe aber gleiche Entfernung zur Antenne aufweisen, jetzt durch Verwendung einer zweiten Antenne aus einer anderen Perspektive unterschieden werden können. Die Übereinstimmung der beiden Aufnahmen wird in Form der sogenannten Kohärenz aus den Radardaten ermittelt.

Sie spiegelt auch die zu erwartende Qualität des digitalen Höhenmodells wieder. In der Kohärenzkarte wird für jeden Punkt die Ähnlichkeit der beiden Aufnahmen als Grauwert wiedergegeben.

Kohärente Flächen werden hell dargestellt, Flächen mit geringer Kohärenz, wie z. B. Gewässer, erscheinen dunkel. Bei inkohärenten Flächen ist eine Ableitung der Geländehöhe nicht mehr möglich. Kohärenzkarten werden erfolgreich zur Bewuchsklassifizierung eingesetzt.

Im Gegensatz zu optischen, stereoskopischen Verfahren, wo versucht wird, die Parallaxe durch direkte Messung der Weglängen zu bestimmen, wird beim interferometrischen SAR die in den elektromagnetischen Wellen der Radarstrahlung enthaltene Information der Phasenlage ausgewertet.

Die Arbeitsschritte zur Erstellung des Interferogramms beinhalten die exakte Anpassung der beiden Bilder aufeinander sowie Filterungen zur Bildverbesserung. Jeder Farbwert repräsentiert einen Phasenwert zwischen 0 und 2π , wobei sich die Farben ständig wiederholen und Streifen (Fringes) bilden.

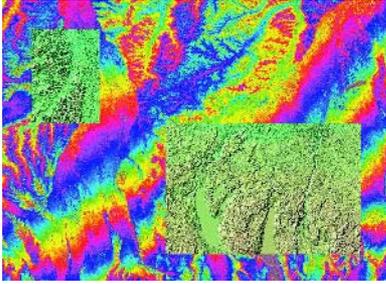


Abb.5 Interferogramm

Wie man in dem Interferogramm erkennen kann, ist die Topographie des Geländes bereits in diesem sichtbar. In der unteren Abbildung wurde zur Verdeutlichung das entsprechende digitale Höhenmodell im Interferogramm eingeblendet. Dazu wurde eine nach Höhenschichten eingefärbte, beleuchtete Reliefdarstellung verwendet.

Die Phasendifferenzen werden unter Berücksichtigung der Flugbahnen (Wegunterschied) der beiden Antennen in Höhenwerte umgerechnet. Abschließend werden diese in eine Kartenprojektion (UTM) oder geographische Koordinaten transformiert.

4 Verarbeitung der SRTM Daten

Der Shuttle startete vom Kennedy Space Center in Florida und kreiste dann in 230 Kilometer Höhe um die Erde. Die Bahnneigung der Umlaufbahn gegenüber dem Äquator betrug 57 Grad. Mit dieser Bahnneigung konnte der Shuttle alle Gebiete zwischen Südschweden und Feuerland überfliegen: Die Polargebiete und Nordskandinavien erreichte er nicht. Während der Shuttle in seiner Umlaufbahn kreiste, drehte sich die Erde weiter. Bei jeder Umrundung überflog die Raumfähre daher ein anderes Gebiet. So wurden nach und nach alle Kontinente überflogen.

Das amerikanische SIR-C-Radar tastete den Erdboden in 250 Kilometer breiten Streifen ab und erfasste somit die gesamte überflogene Landfläche. Das deutsche X-SAR-Radar nahm 50 Kilometer breite Streifen der Erdoberfläche auf und kartierte damit 45 Prozent der überflogenen Landfläche, aber mit einer deutlich besseren Auflösung.

Die rückgestreuten Pulse wurden von den Radarsystemen empfangen, verstärkt, in digitale Signale umgewandelt und an Bord des Shuttles auf Magnetbandkassetten aufgezeichnet. Die ungeheure Datenflut von 225 Millionen Bit pro Sekunde wurde nur teilweise vom Shuttle zur Bodenstation White Sands, in der Wüste von Nevada, übertragen. Der komplette Datensatz stand erst nach der Landung zur Verfügung. Die Daten, die sofort zum Erdboden übertragen wurden, konnten innerhalb weniger Minuten in sogenannten Quick-Look-Rechnern zu Bildern verarbeitet werden. Diese Echtzeit-Auswertungen wurden für die Qualitätskontrolle der Aufnahmen benötigt. Nach der Rückkehr des Shuttles bekam das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum des DLR in Oberpfaffenhofen von der NASA Kopien der Magnetbandkassetten. Sie wurden archiviert und zügig verarbeitet.

Nach der Rückkehr zur Erde wurden die aufgezeichneten Daten einer eingehenden Analyse unterzogen. Hierbei stellte sich heraus, dass ein kleines technisches Problem während der Mission größere Auswirkungen auf die Verarbeitung der Daten hatte als zunächst angenommen.

Eine Konstruktion wie das Space Shuttle mit dem Mast hat im Gravitationsfeld das Bestreben, sich senkrecht zur Erde auszurichten. Um dieser Bewegung entgegenzuwirken, war am Ende des Mastes eine kleine Düse angebracht, aus welcher während der Mission permanent Stickstoff ausgeblasen werden sollte. Durch eine technische Störung hat diese Düse während der Mission nicht funktioniert. Um trotzdem die Lage der Raumfähre im Orbit stabil zu halten, mussten, entgegen der ursprünglichen Planung, die Steurdüsen des Shuttles für die Lagekorrektur eingesetzt werden. Diese Form der Lageregelung ist relativ grob und gab starke Impulse auch an den Mast

weiter. Hierdurch kam es zu häufigeren und stärkeren Schwingungen des Mastes als vorgesehen. Die Auslenkung und Häufigkeit der Mastschwingungen lagen in der Folge außerhalb der vor der Mission definierten Spezifikation. Diese Abweichungen führten in den ersten Interferogrammen und Höhenmodellen wie erwartet zu starken Höhenfehlern. Insbesondere auf ebenen Wasserflächen sind die Mastschwankungen als periodisches Muster im Interferogramm zu erkennen, welches eine wellenartige Abfolge von Bergen und Tälern im Abstand von ca. 50 Kilometer vortäuscht. Erst durch eine Anpassung der Auswertesoftware der Lagedaten auf die veränderten Bedingungen bezüglich Stärke und Häufigkeit dieser Schwingungen konnten diese bis auf einen winzigen Restfehler (weniger als 0,5 Millimeter Auslenkung an der Mastspitze) aus den Interferogrammen und damit aus den Höhenmodellen eliminiert werden. Diese Probleme führten in der Summe zu einer Verzögerung bei der Bearbeitung der Daten bei den Partnern JPL und DLR. Seit Herbst 2001 läuft jedoch die operationelle Verarbeitung der gesamten Datenmenge im Institut für Methodik der Fernerkundung und im Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum.

Die Verarbeitung der Daten erfolgt kontinentweise. Nach Afrika und Europa folgten im Winter/Frühjahr 2003 Süd- und Nordamerika. Bis zum Frühjahr 2004 wird mit dem Abschluss der Datenverarbeitung für das globale digitale Höhenmodell gerechnet. Die Bearbeitung der Informationen ist ein aufwendiger und komplizierter Prozess. Man kann ihn ganz grob in zwei Hauptschritte untergliedern: die Signalverarbeitung und die geometrische Verarbeitung.

Bei der Signalverarbeitung werden die sogenannten Rohdaten, wie sie von den beiden Radarsystemen und den Positionsmessungen im Shuttle kommen, registriert und gefiltert. Aus den beiden Datenprodukten wird nun durch Überlagerung ein Bild hergestellt - das sogenannte Interferogramm. Im Anschluss daran wird aus den Phasenunterschieden der Radarsignale die Höhe der Bildpunkte auf der Erde errechnet - ein sehr kompliziertes Verfahren, das aber mit Flugzeug- und Satellitendaten schon erfolgreich demonstriert wurde. Bekannte Referenzpunkte auf der Erdoberfläche - sogenannte „ground control points“ - dienen als Anhaltspunkte. So kann die absolute Höhe eines Punktes auf der Erdoberfläche bestimmt werden.

Im zweiten Schritt, der geometrischen Verarbeitung, werden die vorbehandelten Daten mit einem erdbezogenen Koordinatensystem in Beziehung gesetzt. Man spricht von „geocoding“, d.h. jeder Bildpunkt, den die Radarsysteme vermessen haben, wird auf der Erdoberfläche lokalisiert. Aus den ausgewerteten Streifen werden dann größere Gebiete zu einem Mosaik zusammengesetzt.

Das neue Höhenmodell hat gegenüber früheren Verfahren wesentliche Vorteile: Es ist homogen (mit einem einzigen Gerät aufgenommen), es ist konsistent (durch bekannte geometrische Beziehungen auf Eindeutigkeit überprüft) und es liegt in digitaler Form zur weiteren Nutzung im Rechner vor.

Da man bisher kein einheitliches Höhenmodell der ganzen Erde zur Verfügung hat, ist man gezwungen, Karten zusammensetzen, die durch unterschiedliche Aufnahmeverfahren oder durch unterschiedliche Bearbeiter erzeugt wurden. Bei solchen zusammengesetzten Karten zeigen sich störende Übergänge, und Gebiete, die eigentlich einheitlich aussehen müssten, weisen unterschiedliche Strukturen auf. Diese Mängel treten bei den Bildern der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) nicht mehr auf, da die Aufnahmen mit demselben Verfahren und im Abstand von nur wenigen Tagen aufgenommen werden. Die SRTM-Mission liefert global für jedes Gebiet von 30 x 30 Metern einen bis auf 6 Meter genauen Höhenpunkt für die digitale Höhenkarte. Der bisher beste vollständige Datensatz der Erde liefert nur alle 1.000 Quadratmeter einen auf 100 Höhenmeter genauen Punkt.

Die Kosten für den Endnutzer der neuen digitalen SRTM-Höhenmodelle werden sich im Rahmen der bislang verfügbaren Produkte (z.B. aus Digitalisierung) bewegen. Die SRTM-Höhenmodelle zeichnen sich jedoch durch eine wesentlich bessere Qualität aus.

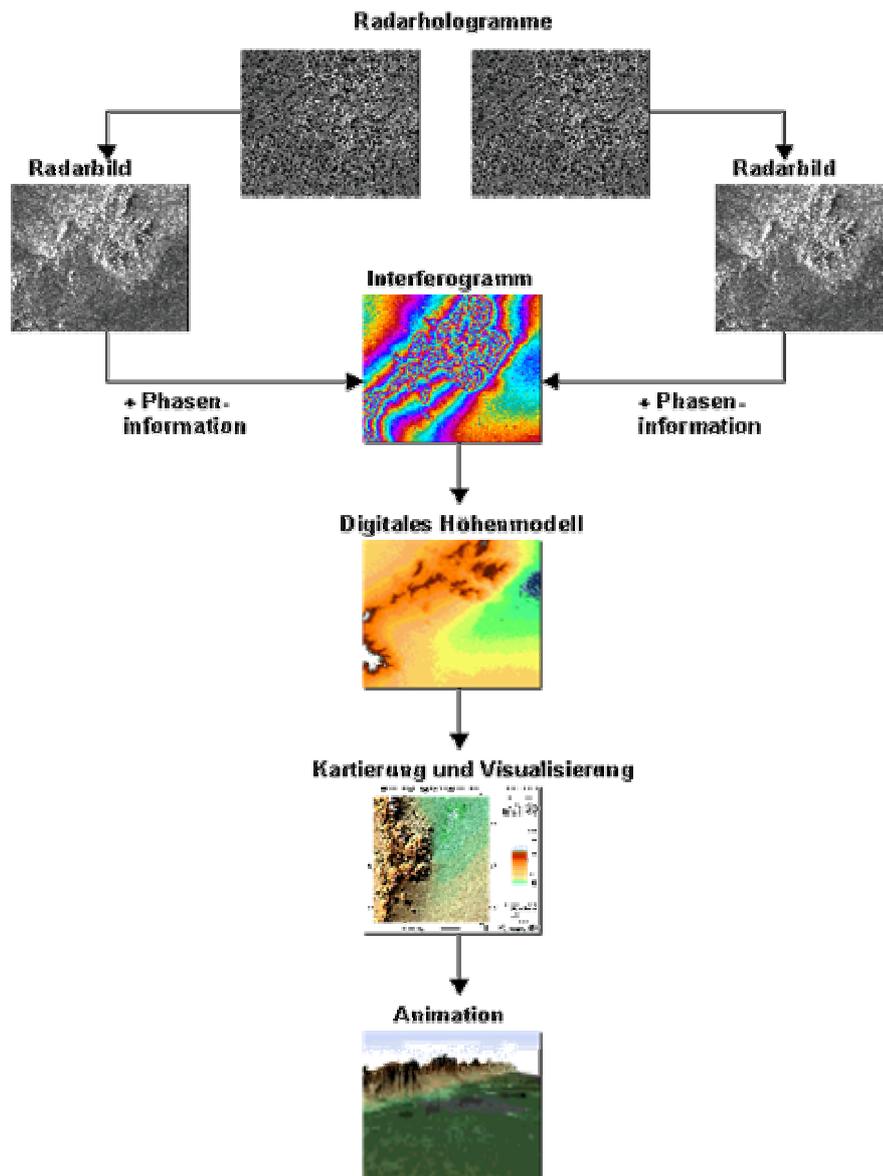
Die Daten der Shuttle Radar Topography Mission sind grundsätzlich für jedermann frei zugänglich. Die Bestellung kann über das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum DFD (auch per Internet) erfolgen. Interessenten wählen ein Gebiet aus, geben die Koordinaten und weitere Auswahlkriterien für ihre Bestellung an. Wenn die Region bereits ausgewertet ist, brauchen die Daten nur noch kopiert zu werden. Ist die Region noch nicht bearbeitet, dauert es, je nach Auslastung und Priorität, ungefähr zwei Wochen, bis der Nutzer die Daten zur Verfügung hat (z.B. wieder übers Internet).

Die Nutzer des digitalen Höhenmodells kommen aus den verschiedensten Disziplinen. Hydrologen stellen die genauen Überschwemmungsgebiete von Flüssen fest, Geologen beobachten kleinste Veränderungen an Erdbebengebieten und Vulkanen, Ökologen erhalten genaue Karten über Ausbreitung und Zustand der Vegetation und Klimatologen können ihre Vorhersagemodelle verbessern. Aber auch Branchen wie Telekommunikation, Landwirtschaft und Schifffahrt nutzen die Informationen aus dem digitalen Höhenmodell.

Das digitale Höhenmodell ist ein wesentlicher Baustein für Geographische Informationssysteme (GIS). Mit GIS werden Informationen über Siedlungsverhalten, Überschwemmungsgebiete, Abholzung, Straßenführung, Landnutzung und anderes mehr schneller dargestellt, besser verknüpft und leichter vergleichbar als bisher.

Ein weiterer wichtiger Einsatzbereich von digitalen Geländemodellen sind verbesserte Bodenwarnsysteme bei Flugzeugen. Die genaue Kenntnis der Topographie durch digitale Höhenkarten und die exakte Positionsbestimmung durch GPS (Global Positioning System) können die Flugsicherheit weiter verbessern.

4.1 Erstellung der 3D Karte aus Interferometrie



So wie die beiden ersten Abbildungen sehen die beiden Radarantennen an Bord des Space Shuttles die Welt. Die Radarechos bilden dabei Hologramme der Erdoberfläche ab.

Aus den Hologrammen werden dann mit aufwendigen Computerberechnungen zwei Radarbilder erstellt. Hier sind dann schon viele Einzelheiten der Erdoberfläche zu erkennen. Die Aufnahmen sehen zwar schon plastisch aus, sind aber noch zweidimensional. Beide Radarbilder wurden aus leicht verschiedenen Perspektiven aufgenommen, eine von der Antenne der Ladebuchse und das andere von der Außenantenne am Ende des Mastes. Mit bloßem Auge sind für den Beobachter jedoch keine Unterschiede in beiden Bildern zu erkennen.

Ein höchst genauer Computervergleich der beiden Radaraufnahmen macht die feinen Unterschiede zwischen beiden Bildern sichtbar. Das Relief der Erde kann bereits an den farbigen Ringen des Interferogramms erahnt werden. Sie erinnern schon an Höhenlinien aus topographischen Karten.

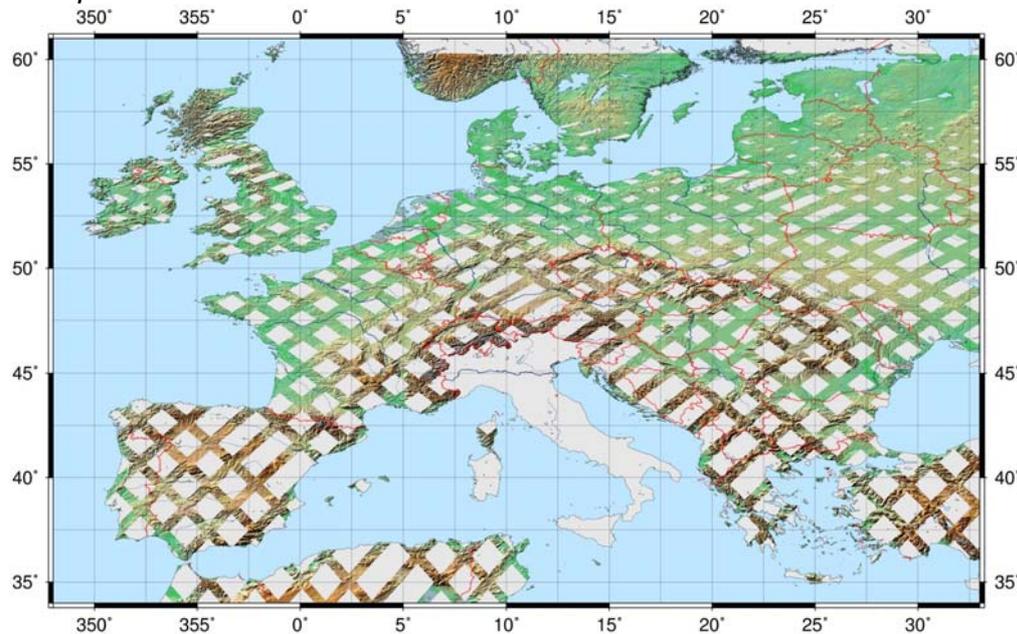
Aus dem Interferogramm und der genauen Position des Space Shuttles im Orbit wird schließlich für jeden Bildpunkt die exakte Höhe über der Erdoberfläche bestimmt und in eine digitale Weltkarte übertragen. Dieser Datensatz ist dann die Basis für eine Vielzahl von Anwendungen im wissenschaftlichen, industriellen und öffentlichen Bereich.

Mit Techniken der digitalen Bildverarbeitung können beliebige perspektivische Ansichten für verschiedenste Nutzenanwendungen erzeugt werden und durch eine Aneinanderreihung der perspektivischen Ansichten kann dann ein Überflug über die Landschaft simuliert werden.

4.2 Stand der Verarbeitung

Hier ein Überblick des Bearbeitungsstandes von SRTM / X-SAR Daten zu Höhenmodellen vom 15. Juni 2004.

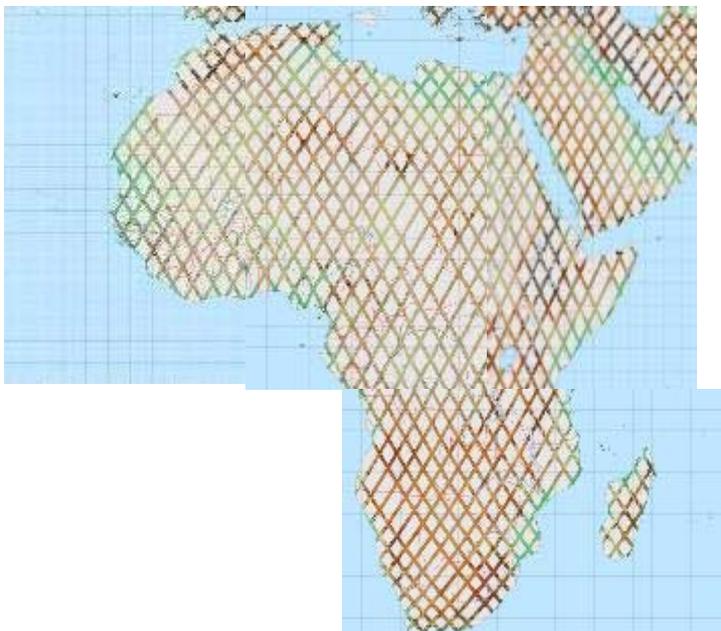
Europa:



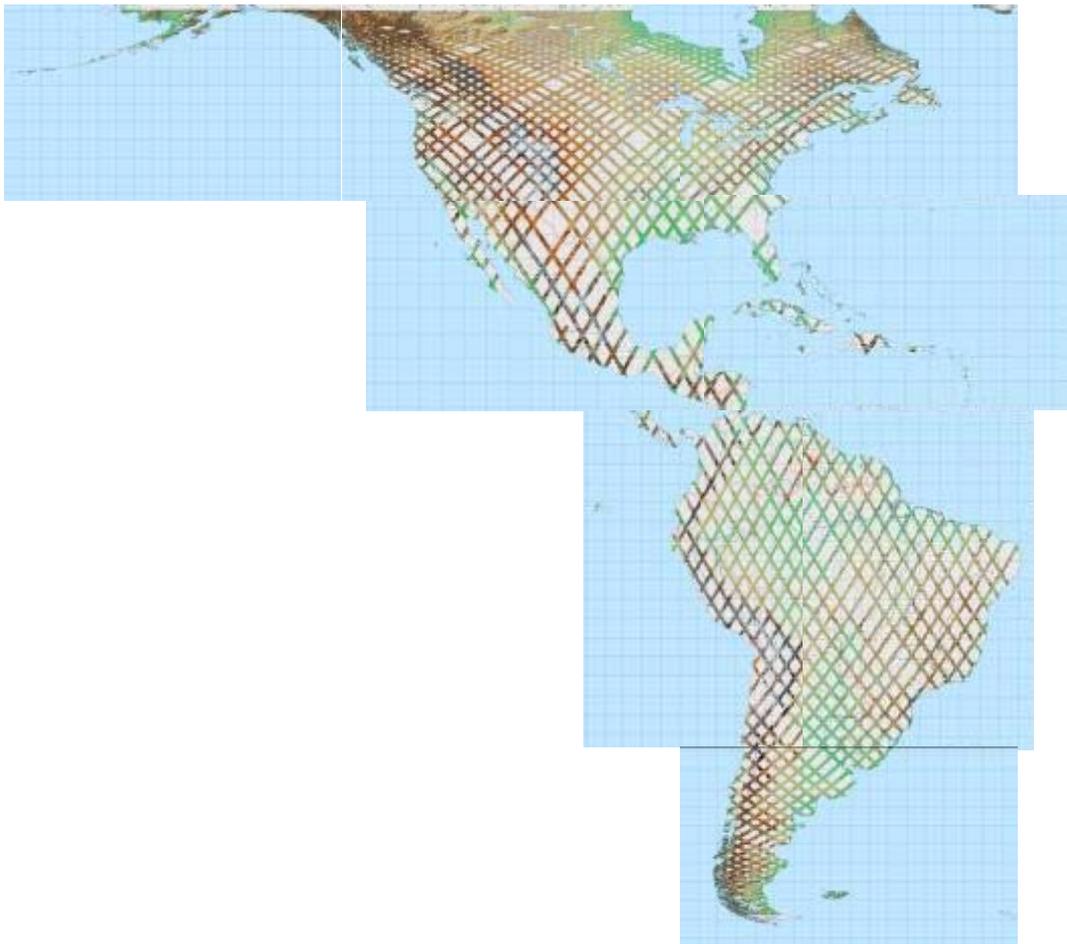
Die SRTM/X-SAR Daten über italienischem Hoheitsgebiet werden nicht im DFD prozessiert.

Stand der Prozessierung: fertig gestellt

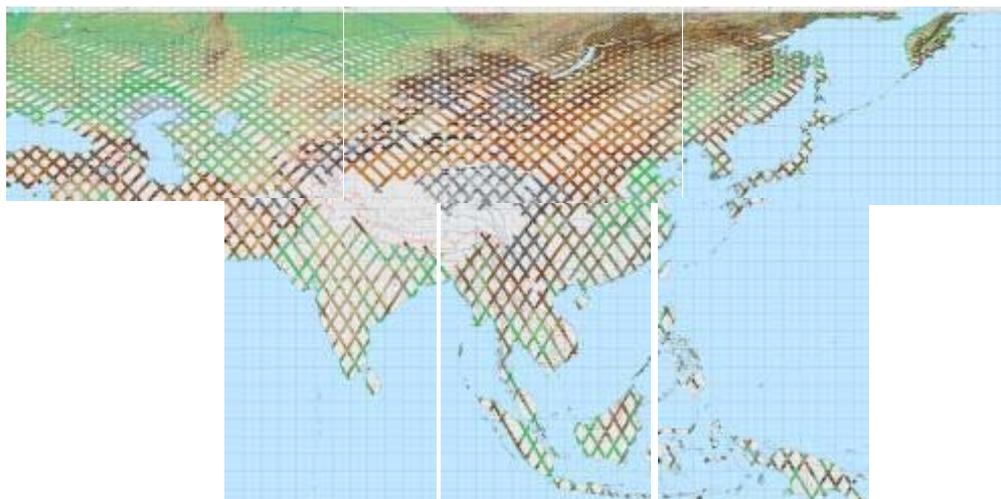
Afrika:



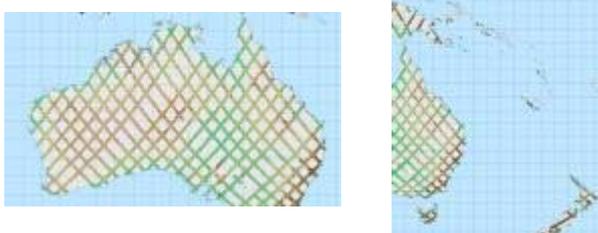
Amerika:



Asien:



Australien:



5 Anwendungen

Die Daten aus der SRTM-Mission erlauben vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Über die damals bereits vorliegenden Projekte hinaus gingen nach dem Start mehr als 400 weitere Anfragen für konkrete Nutzungen der Informationen bei der DLR ein. Hier nun eine Auflistung zahlreicher Anwendungsgebiete:

Fernerkundung (Geometrische/radiometrische Entzerrung):

Fernerkundungsdaten müssen entsprechend ihrer Abbildungsgeometrie auf die jeweiligen Geländehöhen entzerrt (Geokodierung) und radiometrisch korrigiert werden. Nicht oder nur ungenau verbesserte Fernerkundungsdaten führen zu fehlerhaften Ergebnissen bei der quantitativen Interpretation. Davon könnten insbesondere ERS- oder Envisatprodukte profitieren, wenn für die interessierenden Gebiete kein Zugriff auf andere DHM's (Digitale Höhenmodelle) besteht.

Funkwellenausbreitung (Mobilfunk):

Zur Analyse der optimalen Aufstellorte von Sendemasten für jegliche Form der terrestrischen Funkwellenausbreitung werden aktuelle DHM's benötigt. Die mit Hilfe von SAR-Daten aus der SRTM Mission zu berechnenden DHM's bieten zudem den Vorteil, dass sie die tatsächliche Situation (d.h. Bebauung und Bewaldung), die für Funkwellen Hindernisse darstellen, miterfassen.

Navigation (Verkopplung Topographie und GPS):

Die Zuverlässigkeit der GPS-Navigation für PKW und Flugzeuge, ist abhängig von der Aktualität und Präzision der Daten. Die topographischen Daten der SRTM Mission, die im gleichen globalen Koordinatensystem gewonnen werden wie das, welches durch das GPS-System definiert worden ist, lässt hier eindeutig Verbesserungen erwarten. Zudem macht die Genauigkeit des DHM's auch keine Unterschiede zwischen verschiedenen Staaten beim grenzüberschreitenden Verkehr, was bei terrestrisch erhobenen Daten keineswegs der Fall ist, da teilweise verschiedene Bezugssysteme verwendet werden.

Wasserwirtschaft (Küsten, Überschwemmungen, Landwirtschaft):

Zur hydrologischen Modellierung von Wassereinzugsgebieten werden hochgenaue und über alle Zuständigkeitsgrenzen hinaus homogene DHM's benötigt. Nur durch die Kombination von genauen topographischen Daten, Informationen über die Situation, den Niederschlag bzw. die Rückhaltung und Speicherung kann eine exakte Aussage über Zeitpunkte und Ausmaße von Überschwemmungen erfolgen. Neben diesem Extremereignissen ist aber eine ständige Analyse der hydrologischen Bedingungen für die Landwirtschaft z.B. hinsichtlich der Notwendigkeit von Bewässerungsmaßnahmen von Vorteil. In Küstengebieten ist neben Sturmfluten, wo die potentielle Gefährdung bestimmter Gebiete mit Hilfe von DHM's vorab abgeschätzt werden kann, auch die hoheitliche Aufgabe der Freihaltung der Schifffahrtswege als Nutznießer aktueller topographischer Daten zu nennen.

Katastrophen (Vorsorge, Einsatz, Bilanz)

Erfolgreiches Katastrophenmanagement scheitert oft an nicht vorhandenem, fehlerhaftem oder ungenauen Basisdatenmaterial über die Situation vor Ort. Zur Abschätzung einer eventuellen Gefährdung, zum Einsatz von Hilfspersonal und -material (z.B. wo sind sichere Stellen zum Abwurf von Hilfsgütern) sowie zur Analyse der entstandenen Schäden und Veränderungen werden aktuelle und präzise Daten benö-

tigt.

Verkehrs- bzw. Infrastrukturplanung (Strassen, Schifffahrt, Bahn, Luftfahrt)

Die Planung von Verkehrswegen wird durch aktuelles Basisdatenmaterial erheblich effizienter. Allein die Möglichkeit einer computergestützten Vorabberechnung von zu bewegendem Erdmassen und der Anzahl der zu bauenden Brücken, die größten Kostenfaktoren beim Verkehrswegebau würden die Planungen vereinfachen. Weiterhin wird die realistische Simulation von Einflugschneisen an Flughäfen durch aktuelle Daten ermöglicht.

Wettervorhersage, Klimamodellierung

Zur Modellierung der Austauschprozesse zwischen Boden und Atmosphäre sowie der Bewegungsprozesse in der niederen Atmosphäre sind einheitliche und globale DHM's notwendig.

Neben den mehr operationell angesiedelten Aufgaben der Erzeugung des globalen Höhenmodells und den Aspekten der Anwendung der erstellten DHM's, werden im Rahmen eines Announcement of Opportunity auch eine Reihe wissenschaftlicher Fragestellungen bearbeitet, die sich mit Themen der Fernerkundung beschäftigen.

Geodäsie

Das digitale Geländemodell der SRTM Mission stellt die erste räumlich hochaufgelöste, flächendeckende Höheninformation der Erde dar. Die Bestimmung des Geoids, relevant für Fragestellungen in unterschiedlichen Disziplinen wie Geologie, Geophysik und (Palaeo-)Klimatologie, wird mit diesem Datensatz einen bedeutenden Fortschritt erzielen. Beispielsweise dienen Karten der Schwerkraftfelder der Erde zur Gebietsauswahl für seismische Untersuchungen.

Globale Landoberflächenklassifizierung

Ein weiteres Ziel ist die Landoberflächenklassifizierung. Die präzise Kartierung und Klassifizierung der Landoberfläche auf globaler Ebene ist unabdingbare Voraussetzung für großräumiges Modellieren von Geoprozessen. In zahlreichen Studien konnte gezeigt werden, dass Radarbilder sich hervorragend zur Dokumentation und Klassifikation von natürlichem Bewuchs und kultivierten Landoberflächen einsetzen lassen. Sensitives Registrieren der unterschiedlichen Rückstreuungseigenschaften der Vegetation aufgrund von Vegetationshöhe, Bestanddichte und Wachstumsstruktur erlaubt eine differenzierte Unterscheidung verschiedener Vegetationsgemeinschaften. So können die mittlerweile dramatischen Auswirkungen der Wüstenausbreitung und Bodenerosion, Luftverschmutzung, Überflutungen, Wald- und Steppenbränden sowie Rodungen quantitativ erfasst und in ihrer globalen Auswirkung beobachtet werden. Durch den Einsatz der Satelliten ERS-1 und ERS-2, JERS-1, RADARSAT und die SIR-C/X-SAR Missionen entstanden zwischen den Jahren 1992 und 1996 eine große Menge an SAR-Bildern, die in ihrer Gesamtheit die Erde nahezu global abdecken. Dennoch konnte bisher nur für die Bundesrepublik Deutschland, als einziges Land der Welt, im Rahmen eines langjährigen Forschungsprojektes vom DLR eine flächendeckende Radarkarte erstellt werden. Es gibt eine Reihe von Gründen, die eine kontinuierliche und einheitliche Erfassung der Erde mittels Radarsatelliten und damit eine zufriedenstellende Dokumentation der Landoberfläche behindert haben. Zum einen handelt es sich bei der Gesamtheit der Radaraufnahmen um ein Mosaik unterschiedlicher Auflösungen, Frequenzen, Einfallswinkel, Rückstreuungen und Aufnahmezeiten. Das Aneinandersetzen der verschiedenen Produkte ist zeit- und kostenaufwendig (z.B. kostet eine ERS-1-Szene (100x100 km) etwa € 1000). Erfol-

gen Befliegungen von benachbarten Gebieten zu unterschiedlichen Jahreszeiten, kann der Informationsgehalt, d.h. das Rückstreuverhalten, unter gleichen Nutzungsverhältnissen stark voneinander abweichen, je nach erfasster Wachstumsperiode der Vegetation (z.B. reifes Getreide, abgeerntete Felder, Brache, Schneedecke). Allein diese Komplexität erschwert eine einheitliche, globale Klassifizierung erheblich. Mit der X-SAR/SRTM Mission wird es erstmals möglich sein, einen globalen, einheitlich erfassten Datensatz über einen Aufnahmezeitraum von nur 11-12 Tagen zu bearbeiten.

5.1 Neue Anwendungsbereiche

Eine eigentlich ungewollte technische Eigenheit des SRTM-Radars eröffnet neue Forschungs- und Anwendungsgebiete. Die beiden Antennensysteme waren aus konstruktiven Gründen nicht nur 60 Meter quer zur Flugrichtung versetzt, sondern hatten auch entlang des Flugpfades einen Abstand von sieben Metern. Dieser Versatz spielt bei der Erstellung der Höhenmodelle keine Rolle, kann aber für die Messung der Geschwindigkeit bewegter Objekte genutzt werden. Erstmals kann daher mit SRTM-Daten die so genannte „Along-Track-Interferometrie“ aus dem Weltraum in großem Stil demonstriert werden. Diese nutzt den sich aus dem Abstand der Antennen ergebenden Zeitversatz von ca. einer Millisekunde zur Bewegungserfassung und Geschwindigkeitsmessung aus.

Zur Verifizierung der Möglichkeiten dieser Technik wurde während der SRTM-Mission eine Referenzmessung durchgeführt. Hierfür wurde ein normaler PKW mit einem Radarreflektor auf dem Dach, mit einem Global Positioning System (GPS) und einem Datenrecorder ausgerüstet. Die Unterfahrung des Shuttle Überfluges wurde am 18. Feb. 2000 um 10:21:50 Uhr in der Nähe des DLR-Standortes Oberpfaffenhofen durchgeführt. Die Analyse der SRTM-Daten zeigte eine hervorragende Übereinstimmung der aus dem Shuttle gemessenen Geschwindigkeit mit der durch GPS und Tachoanzeige dokumentierten Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Theoretische Überlegungen zeigen, dass mit Hilfe der SRTM-Daten eine Richtungskomponente der Geschwindigkeit von genügend großen Objekten auf rund 1km/h genau bestimmt werden kann. Das Verfahren wurde in einem zweiten Schritt auf einen Autobahnabschnitt der A9 München/Nürnberg übertragen. Die gemessenen Geschwindigkeiten lagen alle in einem für Lastkraftwagen auf diesem dicht befahrenen Teilstück realistischen Bereich zwischen 65 und 100 km/h. Zur operativen Nutzung dieser Technik wären jedoch eine regelmäßige Erfassung bestimmter Gebiete und eine wesentlich höhere geometrische Auflösung notwendig.

Der künftige deutsche Radarsatellit TerraSAR-X wird daher mit einem Along-Track-Interferometer ausgestattet sein. Hiermit wird dann erstmals aus dem Weltraum eine regelmäßige Darstellung und Auswertung von Verkehrsströmen, die Sammlung statistischer Daten für die Verkehrsforschung und schließlich der Verkehrslenkung, basierend auf Satellitendaten, möglich. Dieses System wird im Rahmen des HGF Forschungsbereichs „Verkehr und Weltraum“ eindrücklich zeigen, wie Raumfahrttechnologie wesentlich zur Verkehrsforschung beitragen kann.

Mit dem Verfahren der Along-Track-Interferometrie ist aber auch die Abbildung und quantitative Erfassung von Meeresströmungen möglich. So wurden Untersuchungen der Gezeitenströmungen in der holländischen Waddenzee bei auflaufendem Wasser wenige Stunden vor Hochwasser durchgeführt. Die Messungen zeigen, wie das Wasser zwischen den Inseln hindurchströmt und die Waddenzee flutet. Auch ist zu erkennen, wie die Landseite der Inseln von der Waddenzee her geflutet wird. Ozeanographen der Universität von Honolu-

Iu/Hawaii und der Universität Hamburg haben mehrere SRTM-Strömungsdatensätze mit den besten von den zuständigen Behörden verfügbaren Modellen verglichen und eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt. Derzeit existiert kein anderes Messverfahren, mit dem Strömungen mit derart hoher geometrischer Auflösung vom Welt- raum aus abgebildet werden können. Es sind daher interessante zukünftige Missio- nen denkbar, die sich beispielsweise der Überwachung von Küsten widmen. Bei ge- nügend hoher geometrischer Auflösung lässt dieses Verfahren auch die Erfassung der Fließgeschwindigkeit von Flüssen zu.

Ein ideales Along-Track-Interferometer erfordert jedoch einen größeren Abstand zwischen den Antennen als bei TerraSAR-X. Durch die Installation eines Mastes mit einer Außenantenne, versetzt in Flugrichtung, ließe sich bei einer zukünftigen Mission die Empfindlichkeit des Messinstrumentes wesentlich steigern. Dies würde auch das Anwendungsspektrum deutlich erweitern. Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass für eine solche Konstruktion ein modifi- zierter Solar-Sail-Boom des DLR-Instituts für Strukturmechanik in Braunschweig her- vorragend geeignet wäre.

6 Glossar

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)

NASA (amerikanisch, National Aeronautics and Space Administration)

JPL (NASA, Jet Propulsion Laboratory)

NIMA (amerikanisch, National Imagery and Mapping Agency)

ASI (italienisch, Agenzia Spaziale Italiana)

SAR (Synthetic Aperture Radar)

SIR (Shuttle Imaging Radar)

GIS (Geographisches Informationssystem)

GLOBE (Global Land One-kilometer Base Elevation)

GTOPO30 (Global 30 Arc Second Elevation Data Set)

SEASAT (amerikanisch, Satellit zur Meeresbeobachtung)

ERS-1,2 (European Remote Sensing Satellite)

JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite)

RADARSAT (kanadisch, Satellit zur Arktisüberwachung)

GPS (Global Positioning System)

7 Quellen

<http://www.dlr.de/srtm>

<http://www.ixl-satinfo.com/german/profile.shtml>

<http://www.caf.dlr.de/SRTM/SRTM.html>

<http://www.caf.dlr.de/SRTM/neu/processing.htm>

<http://www.caf.dlr.de/SRTM/mission/mission.htm>

http://www.dlr.de/dlr/Presse/dlr-nachrichten104/104_02-21.pdf

<http://bilddb.rb.kp.dlr.de/deutsch/rubrik.asp?qryRubrik=2>