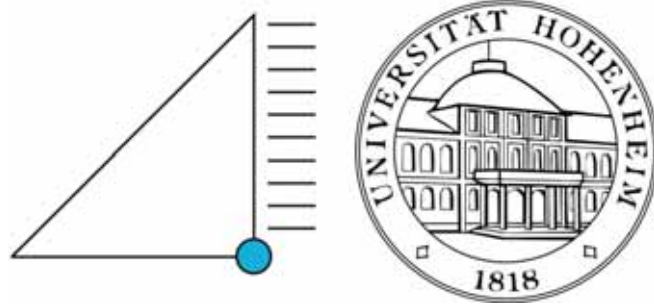


Universität Hohenheim
Institut für Betriebswirtschaftslehre
Fachgebiet Umweltmanagement



Envisat

Was können Umweltsatelliten leisten?

Seminar Angewandtes Umweltmanagement
Eingereicht am Fachgebiet Umweltmanagement
Prof. Dr. Werner F. Schulz

von:
stud. geogr. Tobias Schiller
Matrikelnr.: 2165626
Lange Gasse 56
72070 Tübingen
Tel.: 0 70 71 – 30 47 01
tobias.schiller@gmx.de
12. Fachsemester
Abgabetag: 10.06.2005

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
2 Grundlagen der Fernerkundung.....	1
2.1 Physikalische Grundlagen.....	1
2.2 Grundlagen der Aufnahmetechnik.....	3
3 Fernerkundung und Umweltmonitoring	6
3.1 Fernerkundung mit Satelliten	6
3.2 Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen	7
3.3 Fernerkundung für Umweltforschung und -politik.....	7
3.4 Global Monitoring for Environment and Security	8
4 Umweltsatellit Envisat.....	9
4.1 Vorgeschichte.....	9
4.2 Überblick über die Envisat-Mission	10
4.3 Ausgewählte Instrumente an Bord und ihr Nutzen	12
4.3.1 Atmosphäre	12
4.3.2 Ozeane	13
4.3.3 Landoberflächen	14
4.3.4 Eisforschung	14
5 Schlussbemerkungen, Fazit und Ausblick	15
Literaturverzeichnis	V
Anhang	VII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Elektromagnetisches Spektrum und Erfassungsbereiche verschiedener Sensoren	2
Abbildung 2: Umweltsatellit Envisat in einer schematischen Zeichnung.....	10

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über die Sensoren von Envisat und ihre Einsatzbereiche	VII
---	-----

Abkürzungsverzeichnis

AATSR:	Advanced Along Track Scanning Radiometer
ASAR:	Advanced Synthetic Aperture Radar
CCD:	Charge-Coupled Device
CNES:	Centre National d'Etudes spatiales
ENSO:	El Niño Southern Oscillation
ERS:	European Remote Sensing Satellite
ESA:	European Space Agency
ESOC:	European Space Operations Control Centre
GEOSS:	Global Earth Observation System of Systems
GMES:	Global Monitoring for Environment and Security
GOME:	Global Ozone Monitoring Experiment
GOMOS:	Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars
GSE:	Global Monitoring for Environment and Security Service Element
IRS:	Indian Remote Sensing Satellite
MERIS:	Medium Resolution Imaging Spectrometer
MIPAS:	Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding
MWR:	Microwave Radiometer
NASA:	National Aeronautics and Space Administration
RA:	Radar Altimeter
SAR:	Synthetic Aperture Radar
SCIAMACHY:	Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography
SLAR:	Sidelooking Airborne Radar
SPOT:	Système Pour l'Observation de la Terre
UNEP:	United Nations Environment Programme

1 Einleitung

Mit Envisat (Environmental Satellite) betreibt die Europäische Weltraumagentur ESA (European Space Agency) seit Anfang 2002 ein mächtiges Werkzeug zur Bereitstellung vielfältigster Umweltdaten. Der Hauptzweck der Mission ist die Datenerhebung zur Erforschung und Beobachtung der Landoberflächen, der Atmosphäre, der Ozeane sowie der polaren Eismassen. Dieses Wissen ist wichtig, um politische und gesellschaftliche Entscheidungsprozesse für eine nachhaltige Entwicklung zu unterstützen, die letztlich auch Auswirkungen auf das ökonomische Geschehen haben. So gesehen scheint eine Betrachtung über Umweltsatelliten im Fach Umweltmanagement gerechtfertigt.

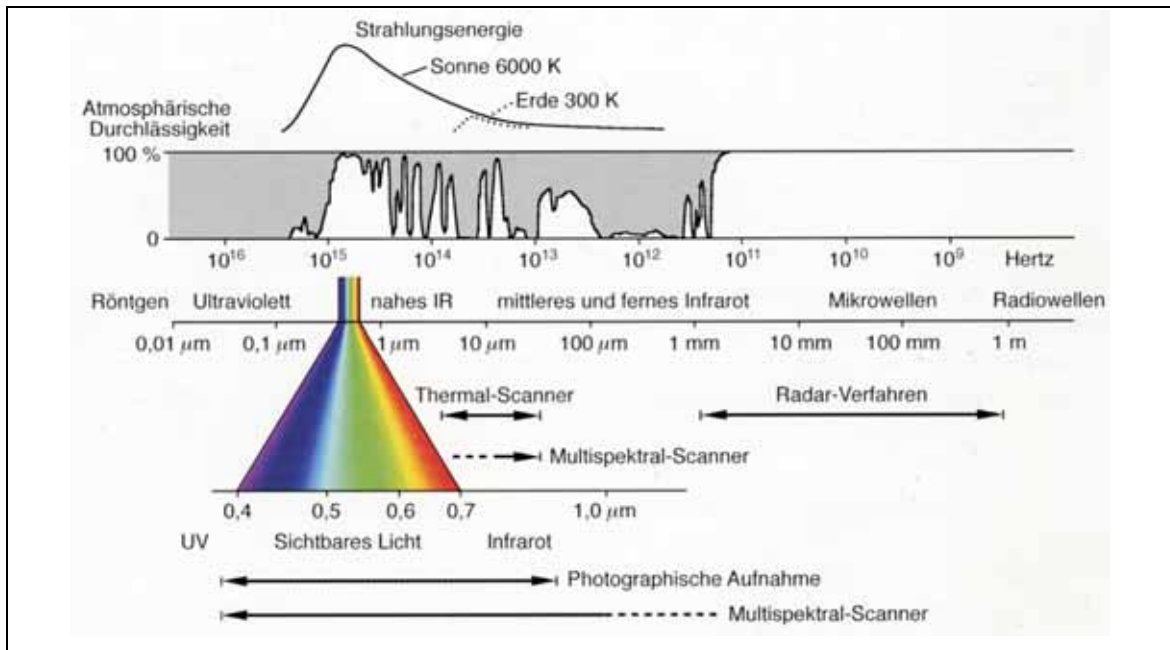
Diese Hausarbeit gibt einen Überblick über die Envisat-Mission und die Systeme des Umweltsatelliten, seine Möglichkeiten und die praktische Anwendung der gewonnenen Daten. Zunächst wird eine allgemeine Einführung in die Grundlagen der Fernerkundung einen Einstieg in die Thematik ermöglichen und das Verständnis der Envisat-Systeme und der Anwendungsbeispiele erleichtern. Ein weiteres Kapitel wird dann die Fragestellung nach den Möglichkeiten der Fernerkundung in Umweltforschung und -politik beleuchten. Einer kurzen Darstellung der GMES-Initiative (Global Monitoring for Environment and Security) als System zur Koordinierung der Erdbeobachtungsaktivitäten und ihrer Anwendung folgt schließlich die Beschreibung von Envisat selbst: Der Überblick über Vorgeschichte, Technik und Kosten der Mission wird durch die beispielhafte Darstellung einzelner Sensoren und ihrer Anwendung abgerundet.

2 Grundlagen der Fernerkundung

2.1 Physikalische Grundlagen

Alle Systeme zur Fernerkundung basieren auf der Erfassung elektromagnetischer Strahlung, einer Wellenstrahlung, die durch Frequenz und Wellenlänge charakterisiert ist. Das Spektrum aller Wellenlängen, wie in Abbildung 1 dargestellt, reicht von der Röntgenstrahlung mit den kürzesten Wellenlängen, über die ultraviolette Strahlung, das sichtbare Licht (etwa 400 bis 700 nm Wellenlänge), nahes, mittleres und fernes Infrarot (Thermalstrahlung), zu Mikrowellen und Radiowellen. Von Bedeutung für die Fernerkundung sind im Wesentlichen die Bereiche zwischen ultravioletter Strahlung und dem mittleren Infrarot, sowie Mikrowellen. Die einzelnen Systeme erfassen dabei immer nur einen bestimmten Bereich des Spektrums. Diese Spektralbereiche werden als Kanäle oder Bänder bezeichnet.

Abbildung 1: Elektromagnetisches Spektrum und Erfassungsbereiche verschiedener Sensoren



Quelle: ALBERTZ (2001), S. 11

Passive Fernerkundungssysteme nutzen die von der Erdoberfläche und der Atmosphäre reflektierte extraterrestrische Sonnenstrahlung sowie die Eigenstrahlung der beobachteten Objekte, die diese abhängig von ihrer Temperatur emittieren. Aktive Fernerkundungssysteme hingegen erfassen die reflektierte Strahlung einer künstlichen Strahlungsquelle an Bord.¹

Auf ihrem Weg von der Strahlungsquelle zum beobachteten Objekt und zurück zum Aufnahmesensor passiert die elektromagnetische Strahlung die Atmosphäre. Sie unterliegt dabei verschiedenen Prozessen, welche die Strahlung abschwächen. Wie in Abbildung 1 ersichtlich ist, ist die Durchlässigkeit der Atmosphäre in verschiedenen Wellenlängenbereichen sehr unterschiedlich. Dieser spektrale Transmissionsgrad ist abhängig von den spezifischen Absorptionseigenschaften der in der Atmosphäre vorkommenden Gase. Vor allem Wasserdampf, Kohlendioxid und Ozon zeichnen sich durch hohe Absorptionsgrade aus.² Die verbleibenden Wellenlängenbereiche, welche die Erdoberfläche erreichen, bezeichnet man als atmosphärische Fenster. Die wichtigsten dieser Fenster liegen im sichtbaren Licht, im nahen, mittleren und thermalen Infrarot. Für die Fernerkundung können nur die Bänder genutzt werden, die in diesen atmosphärischen Fenstern liegen.

¹ ALBERTZ (2001), S. 9ff.

² Gemeinhin bekannt sein dürfte beispielsweise, dass die Ozonschicht der oberen Atmosphäre die UV-Strahlung aus dem Sonnenlicht „filtert“ (also absorbiert).

Ein weiterer wichtiger Einfluss der Atmosphäre ist die Bewölkung. Aufnahmen in den kürzeren Wellenlängenbereichen setzen voraus, dass sich zwischen den beobachteten Objekten und dem Sensor keine Wolken befinden. Nur Radarsysteme können unabhängig vom Wetter eingesetzt werden. Aufgrund ihrer größeren Wellenlänge können die Mikrowellen, die hier verwendet werden, Wolken durchdringen.³

Die elektromagnetische Strahlung, welche letztlich die Erdoberfläche erreicht, unterliegt dort drei wesentlichen Prinzipien: Reflexion, Absorption und Transmission. Nur der Anteil der Strahlung, der weder absorbiert noch transmittiert wird, wird reflektiert und kann von den Sensoren erfasst werden. Die jeweiligen Anteile der Strahlung, die reflektiert werden, variieren für die verschiedenen Objekte der Erdoberfläche. Nur so können diese voneinander unterschieden werden. Das Reflexionsvermögen ist abhängig von verschiedenen Faktoren, etwa den Materialeigenschaften, der Feuchtigkeit des Objekts, der Oberflächenrauigkeit, den geometrischen Verhältnisse (sowohl der Einfallswinkel der Sonneneinstrahlung als auch der Beobachtungswinkel) oder der Wellenlänge der einfallenden Strahlung.⁴

Die spektralen Unterschiede im Reflexionsgrad von verschiedenen Oberflächen können wertvolle Hinweise über die Objekteigenschaften liefern. Die Untersuchung dieser elektromagnetischen Signaturen ist Gegenstand der Spektralanalyse. Grüne Pflanzen zum Beispiel absorbieren das gesamte sichtbare Licht bis auf den vom menschlichen Auge als grün wahrgenommenen Anteil. Bei einer Wellenlänge von etwa 700 nm (nahes Infrarot) zeigen sie aber einen charakteristischen Anstieg des Reflexionsgrades, der eng mit dem Wassergehalt der Blätter und anderen Vitalitätseigenschaften der Pflanzen korreliert⁵. Dank dieser spezifischen Reflexionseigenschaften können bei der Interpretation von Fernerkundungsdaten aus dem Infrarotbereich gute Aussagen über Art und Zustand von pflanzlichem Bewuchs gemacht werden.

2.2 Grundlagen der Aufnahmetechnik

Bei **fotografischen Systemen** wird eine lichtempfindliche Schicht eines Films durch die Einwirkung der elektromagnetischen Strahlung so verändert, dass ein dauerhaftes Bild entsteht. Aufgenommen werden können der sichtbare Spektralbereich und das nahe Infrarot (vgl. Abbildung 1). Heute kommen zwar immer mehr elektronische Systeme zum Einsatz. Dennoch bieten fotografische Systeme Vorteile, wie die Einheit aus Sensor (lichtempfindliche Schicht) und Speicher (Filmmaterial), die – im Gegensatz zu

³ ALBERTZ (2001), S.13ff.

⁴ LILLESAND, KIEFER, CHIPMAN (2004), S. 12f.

⁵ ALBERTZ (2001), S. 18f.

elektronischen Sensoren – eine kostengünstige Erfassung und Speicherung großer Datenmengen auf kleinem Raum ermöglicht. Die Nachteile liegen unter anderem darin, dass nur ein eingeschränkter Bereich des Strahlungsspektrums erfasst wird. Für die EDV-gestützte Weiterverarbeitung der gewonnenen Daten ist die fotografische Erfassung außerdem ein unnötiger und Ungenauigkeiten erzeugender Zwischenschritt.⁶ Fotografische Aufnahmesysteme kommen fast ausschließlich bei der Erstellung von Luftbildern aus Flugzeugen zum Einsatz. Für Satellitensysteme sind sie schlecht geeignet, da die mit ihnen erfassten Daten nur physisch und nicht elektronisch übermittelt werden können.

Scanner-Systeme zerlegen die aufgenommenen Objekte in einzelne, meist rechteckige Bildpunkte (Pixel), die erst zusammengenommen ein größeres Gebiet flächenhaft darstellen und ein mit dem menschlichen Auge interpretierbares Bild ergeben. Wie groß der in einem Pixel dargestellte Flächenausschnitt des Geländes ist, beschreibt die geometrische Auflösung eines Sensors. Es wird zwischen optisch-mechanischen und optoelektronischen Systemen unterschieden. Optisch-mechanische Systeme erfassen die vom Gelände reflektierte Strahlung mit einem schwenkbaren Spiegel, der die reflektierte Strahlung auf einen Detektor lenkt, Zeile für Zeile. Der Detektor wandelt die erfasste Strahlung in ein mess- und speicherbares elektrisches Signal um. Optisch-mechanische Systeme kamen etwa bei den frühen Landsat-Satelliten zum Einsatz.⁷

Heute eher gebräuchliche optoelektronische Scanner verfügen über eine Aufnahmeeinheit aus zeilenweise oder flächenhaft angeordneten Halbleiter-Bildsensoren (meist Charge-Coupled Devices, CCD). Sie ermöglichen es, mehrere Pixel und so eine größere Fläche auf einmal zu erfassen. Dieses Verfahren verwenden auch handelsübliche digitale Fotokameras. Zum Einsatz kommen optoelektronische Scanner bei einer Vielzahl von Fernerkundungssatelliten, so auch bei Envisat. Geometrische Auflösungen von bis unter einem Meter sind heute möglich.⁸

Ein Sonderfall der optoelektronischen Scanner sind **abbildende Spektrometer** (oder Multispektralscanner). Sie liefern Daten aus einem weiten, nahezu kontinuierlichen Bereich des elektromagnetischen Spektrums mit 50 bis 300 Messwerten pro Pixel. Unter anderem aufgrund der großen Datenmenge, die diese Sensoren erzeugen, verfügen sie meist über eine vergleichsweise geringe geometrische Auflösung. In diese Kategorie von Scannersystemen fällt an Bord von Envisat beispielsweise das Instru-

⁶ ALBERTZ (2001), S. 26f.

⁷ ALBERTZ (2001), S. 45ff.

⁸ ALBERTZ (2001), S. 51ff.

ment MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) mit einer maximalen Auflösung von 260 mal 300 Metern.⁹

Radarsysteme erzeugen die elektromagnetische Strahlung, die sie zur Aufnahme verwenden, selbst. Damit gehören sie zu den aktiven Fernerkundungssystemen. Die erzeugte Strahlung liegt im Bereich der Mikrowellenstrahlung mit einer Wellenlänge von 0,7 cm (Ka-Band) bis 3 m (P-Band). Sie sind unabhängig von der natürlichen Strahlung (Nachtaufnahmen sind möglich) sowie von den atmosphärischen Verhältnissen, etwa Wolkenbedeckung, Dunst oder auch Rauch.¹⁰ Bis zu einem gewissen Maß können die Mikrowellen auch in Materie eindringen, so dass zum Beispiel Daten über die Dicke von Schelfeis gewonnen werden können.¹¹

Radarsysteme verfügen über eine kombinierte Sende-Empfangseinheit, die schräg nach unten Mikrowellen aussendet. Ein Teil der ausgesendeten Mikrowellen wird vom Gelände reflektiert und in der Aufnahmeeinheit registriert.¹² Die erreichbare geometrische Auflösung ist bei konventionellen Radarsystemen (Sidelooking Airborne Radar, SLAR) eine Funktion aus der Baulänge der Radarantenne und der Entfernung zwischen Antenne und Gelände. Satelliten verwenden deshalb eine so genannte Synthetische Apertur (Synthetic Aperture Radar, SAR), die eine längere Antenne simuliert. Durch Korrelation der Werte von mehreren, sich überschneidenden Aufnahmen können damit trotz großer Flughöhe der Satelliten Auflösungen im Zehnermeterbereich erreicht werden.¹³

Ergänzend können solche Radarsysteme mittels einem Interferometrie genannten Prinzip und komplizierten mathematischen Prozessen sogar Objekt- und Geländehöhen im Zentimeterbereich erfassen. Damit wird die Erstellung von sehr präzisen digitalen Geländemodellen möglich.¹⁴ Das ASAR-System (Advanced Synthetic Aperture Radar) an Bord von Envisat arbeitet mit diesem Prinzip und kann Bodenhebungen und –senkungen von wenigen Zentimetern registrieren – bei einer Antennenlänge von zehn Metern.¹⁵

⁹ ALBERTZ (2001), S. 57 bzw. KRAMER (2002), S. 359

¹⁰ ALBERTZ (2001), S. 58

¹¹ KAPPAS (1994), S. 27

¹² ALBERTZ (2001), S. 58f.

¹³ ALBERTZ (2001), S. 59

¹⁴ ALBERTZ (2001), S. 66

¹⁵ ESA (2001a), S. 6

3 Fernerkundung und Umweltmonitoring

3.1 Fernerkundung mit Satelliten

Die Ära der Satellitenfernerkundung begann nach dem zweiten Weltkrieg, zunächst aus rein militärischen Erwägungen und unter strengster Geheimhaltung. Die zivile Satellitentechnik hingegen beschränkte sich lange Zeit auf die Nachrichtenübermittlung und die Meteorologie. Erst seit Anfang der 1970er-Jahre wurden satellitengestützte Fernerkundungstechnologien auch auf die zivile wissenschaftliche Forschung ausgerichtet, am Anfang vor allem im Bereich der Atmosphärenforschung und für kartografische Anwendungen.¹⁶ Die wichtigsten Satellitenprogramme mit einem Fokus auf Fernerkundung waren und sind das Landsat-Programm der NASA und das französische SPOT-Programm (Système Pour l'Observation de la Terre). Landsat-Satelliten umkreisen seit 1972 die Erde und erfassen vor allem die sichtbaren und infraroten Spektralbereiche. Derzeit ist mit Landsat-7 die siebte Generation dieses Programms im Orbit und liefert Bilder mit einer Auflösung von bis zu 15 Metern – seit 2003 allerdings aufgrund eines Instrumentenfehlers lückenhaft.¹⁷ Das SPOT-Programm des französischen Raumforschungszentrums CNES begann 1983 mit dem Start des Satelliten SPOT-1. SPOT-5 liefert seit 2002 Daten aus einem Bereich vom sichtbaren Spektrum bis zum mittleren Infrarot mit einer Auflösung von bis zu 2,5 Metern.¹⁸

Mit dem Ende des kalten Kriegs begannen auch die Betreiber bislang rein militärischer Systeme, ihre Daten der Öffentlichkeit zugänglich zu machen und einem breiten Kundenkreis anzubieten.¹⁹ Hinzu kamen in jüngster Zeit Angebote aus dem privaten Sektor: 1999 wurde mit IKONOS der erste privat finanzierte, kommerzielle Fernerkundungssatellit ins All befördert. Er liefert Daten aus fünf Spektralbereichen mit einer Auflösung von bis zu einem Meter. Weitere kommerzielle Missionen umfassen Satelliten wie QuickBird (seit 2001, Auflösung bis 61 cm) oder OrbView-3 (seit 2003, Auflösung bis 1 m).²⁰ So ist heute eine große Konkurrenz zwischen den großen Raumfahrtorganisationen und auch privaten Anbietern entstanden, neue Fernerkundungsprodukte und Dienstleistungen für einen immer breiteren Markt anzubieten.²¹

¹⁶ GADOW (1995), S. 13

¹⁷ LILLESAND, KIEFER, CHIPMAN (2004), S. 404ff.

¹⁸ LILLESAND, KIEFER, CHIPMAN (2004), S. 446

¹⁹ GADOW (1995), S. 13

²⁰ LILLESAND, KIEFER, CHIPMAN (2004), S. 458

²¹ VAUGHAN (2001), S. 81

3.2 Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen

Satellitenfernerkundung ermöglicht die Aufnahme großer Flächen aus der Vogelperspektive. So können Erscheinungsformen und räumliche Zusammenhänge auf der Erdoberfläche erfasst werden, die aus Augenhöhe nicht erkennbar sind. O.G.S. CRAWFORD, ein englischer Luftbildpionier, formulierte dazu einen treffenden Vergleich: Aus der Perspektive einer Katze sei ein Teppichmuster ein unverständliches Liniengewirr, erst aus dem Blickwinkel des Menschen erschließe sich ein sinnvolles Muster.²²

Welche Möglichkeiten die Satellitenfernerkundung zur Erforschung und zur Zustands- und Veränderungsbeobachtung (Monitoring) der Atmosphäre, der Erdoberfläche oder der Gewässer bietet, wird in Kapitel 4.3 ausführlich am Beispiel von Envisat dargestellt. Beachtet werden sollten aber stets auch die Grenzen der Fernerkundungstechnologien: Zu bedenken gilt es etwa, dass nur Phänomene erfasst werden können, die aufgrund ihrer elektromagnetischen Strahlungseigenschaften identifizierbar sind. Der Schwermetallgehalt eines Bodens etwa ist vom Satelliten aus direkt nicht messbar. Es können allenfalls Hinweise darauf registriert werden, etwa auf dem Umweg über den Zustand der Vegetation. Zudem ermöglichen nahezu alle Systeme nur eine Aufsicht auf die Oberflächen der beobachteten Objekte. Lediglich Radarsysteme vermögen abhängig von ihrer Wellenlänge bis zu einem gewissen Grad in Materie einzudringen. Auch die verfügbaren geometrischen Auflösungen setzen Grenzen, kleinräumige Phänomene und Prozesse können meist nur schwer erfasst werden.

ALBERTZ formuliert etwas genereller die Grenzen der Methode: Fernerkundung sei ein Mittel zur Feststellung von Sachverhalten und zur Beobachtung von Veränderungen. Sie liefere jedoch keine Maßstäbe zur Bewertung derselben: „Wir können also beispielsweise feststellen, ob, und in welchem Umfang ein Wald gerodet wird, wir können aber mit den Mitteln der Fernerkundung nicht entscheiden, ob die Rodung ökologisch vertretbar ist oder nicht.“²³ Hier sind andere wissenschaftliche Disziplinen und praktische Geländearbeit und –erfahrung etwa von Geographen, Geologen, Biologen oder Forstwissenschaftlern gefordert.

3.3 Fernerkundung für Umweltforschung und -politik

Heute steht eine große Menge von Fernerkundungsdaten zur Erdoberfläche und der Atmosphäre in verschiedenen räumlichen, zeitlichen und spektralen Auflösungen bereit. Doch inwiefern können diese Daten einen Beitrag zur Lösung von Umweltproble-

²² ALBERTZ (2001), S. 210

²³ ALBERTZ (2001), S. 226

men, etwa zum Schutz der Ökosysteme oder des Klimas leisten? Die grundsätzliche Bedeutung des Beitrags der Fernerkundung zur angewandten umweltwissenschaftlichen Forschung ist weitgehend unbestritten. So manifestieren etwa EISENBEISS, ÖTTL und EHLERS einen „breite[n] Konsens, dass weitere Grundlagenforschung in den Geowissenschaften auch der Informationsbereitstellung durch Fernerkundung bedarf“.²⁴ Die Autoren verdeutlichen aber auch den entscheidenden Zusammenhang zwischen Forschungsergebnissen und ihrem Nutzen: Die problemorientierte, angewandte Forschung sei von entscheidender Bedeutung, um den politischen Entscheidungsträgern „geeignete Abhilfemaßnahmen“ für viele Umweltprobleme vorschlagen zu können.²⁵ Von großer Bedeutung ist also der Weg von der Bereitstellung einer möglichst hochwertigen Datengrundlage über die wissenschaftliche Grundlagenforschung zur Konzeption und Durchführung umweltpolitischer Maßnahmen. BACKHAUS und GRUNWALD fordern, „die Fernerkundung nicht nur als Mittel der Informationsbeschaffung zu optimieren – etwa durch eine immer größere raumzeitliche und spektrale Auflösung der Sensoren –, sondern sie auch in den Kontext umweltpolitischer Maßnahmen und umweltstrategischer Ziele zu integrieren.“²⁶ Dazu wurden in den letzten Jahren einige Anstrengungen auf europäischer und internationaler Ebene geleistet, etwa mit GMES (Global Monitoring for Environment and Security).

3.4 Global Monitoring for Environment and Security

Global Monitoring for Environment and Security (GMES) ist eine gemeinsame Initiative der Europäischen Kommission und der ESA, die 1998 mit dem Ziel der Integration der umweltbezogenen Fernerkundungsaktivitäten in Europa gegründet wurde. Auf internationaler Ebene ist GMES der europäische Beitrag zu GEOSS (Global Earth Observation System of Systems), einem Anfang 2005 gegründeten Programm der Umweltorganisation der Vereinten Nationen (UNEP). Mit GMES soll bis zum Jahr 2008 ein System aufgebaut werden, das die Erfassung, Verarbeitung und die Verbreitung von Fernerkundungsdaten auf europäischer Ebene harmonisiert und koordiniert. Neben der Schaffung aller rechtlichen, finanziellen, organisatorischen und institutionellen Rahmenbedingungen für ein solches System soll ein dauerhafter Dialog zwischen allen Anspruchsgruppen (insbesondere zwischen Anbietern und Nutzern von Fernerkundungsdaten) etabliert werden. Für die koordinierte und zielgerichtete Entwicklung von Anwendungen und Dienstleistungen etwa zur Überwachung internationaler Abkommen

²⁴ EISENBEISS, ÖTTL, EHLERS (1995), S. 3

²⁵ EISENBEISS, ÖTTL, EHLERS (1995), S. 3.

²⁶ BACKHAUS, GRUNWALD (1995), S. 5

(wie dem Kyoto-Protokoll), zur Verwendung im Rahmen politischer Entscheidungsprozesse oder zur Unterstützung nationaler, regionaler und lokaler Institutionen beim Katastrophenschutz sollen vorrangig vorhandene Systeme und Daten europäischer Satelliten (Envisat, ERS, Meteosat, SPOT) und außer-europäischer Satelliten wie Landsat (USA) oder IRS (Indien) zum Einsatz kommen.²⁷

Im Rahmen ihres Beitrags, dem GMES Service Element (GSE), stellt die ESA einerseits Fernerkundungsdaten für verschiedene Arbeitsfelder bereit. Hierbei spielt Envisat eine zentrale Rolle. Über den Dialog mit den Datennutzern sollen andererseits auch deren Anforderungen in die Entwicklung kommender Satellitensysteme fließen.²⁸

GSE umfasst viele Themengebiete. Im Bereich Klima zum Beispiel werden unter anderem die Aufgaben zur Überwachung des Kyoto-Protokolls gebündelt – etwa mit der Bereitstellung von Daten und Methoden zur genauen Vermessung der Wälder als CO₂-Senken. Im Themenkomplex Marine Umwelt werden Anwendungen zur Überwachung der Einhaltung von Umweltvorschriften entwickelt (etwa dem Einleitungsverbot für Öl in die Meere) oder zum Monitoring von lokalen Algenblütenereignissen, die Einfluss auf die Fischereiwirtschaft und Aquakulturen haben können. Weitere zentrale Bereiche des GSE sind Risikomanagement, Wassermanagement, Biodiversität und Lebensräume, die Umwelt der Küsten oder die städtische Planung.²⁹

Eingebunden in GEOSS ist GMES sicherlich ein sinnvoller Ansatz, die Fülle der Daten, die aus der Vielzahl verfügbarer Systeme bereitstehen, zu koordinieren und harmonisieren, ihre praktische Verfügbarkeit zu verbessern und – im Sinne eines *Decision Support Systems* – die Umsetzung in konkrete Strategien zu fördern.

4 Umweltsatellit Envisat

4.1 Vorgeschichte

Vor genau 30 Jahren, am 31. Mai 1975, wurde die European Space Agency (ESA) als gemeinsame Weltraumorganisation von zehn europäischen Staaten (heute 15) gegründet. Neben der Weltraumforschung, der Entwicklung von Raumtransportsystemen (Ariane-Reihe), Telekommunikations-, Wetter- (Meteosat) und neuerdings auch Navi-

²⁷ ÖSTERREICHISCHES UMWELTBUNDESAMT (o.J.)

²⁸ ESA (2004a)

²⁹ vgl. ESA (2004a)

gationssatelliten (Galileo) stehen seit Beginn der 1990er auch die Fernerkundung und die Umweltforschung im Zentrum der Aktivitäten.³⁰

ERS-1 (European Remote Sensing Satellite), der erste Fernerkundungssatellit der ESA, wurde am 17. Juli 1991 gestartet. Seine sechs Instrumente (Radarsysteme, Thermalinfrarotsensor) lieferten über rund neun Jahre Daten etwa zu Oberflächentemperaturen von Land und Ozeanen, zu Hebungen und Senkungen der Erdoberfläche, zu Windrichtungen und –geschwindigkeiten oder Strömungsverhältnissen in den Ozeanen. Der Nachfolger, ERS-2, startete am 21. April 1995 und hatte zusätzlich zu den grundsätzlich mit ERS-1 vergleichbaren Systemen mit GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) einen Sensor zur Erfassung des Ozongehalts der oberen Atmosphäre an Bord.³¹ Die ESA selbst feiert ERS-2 als „weltbeste[n] Ozonwächter“.³² Envisat ist die Fortsetzung und Weiterentwicklung der beiden ERS-Missionen.

4.2 Überblick über die Envisat-Mission

Mit Envisat wurde am 1. März 2002 der größte und teuerste Satellit in der dreißigjährigen Geschichte der ESA³³ mit einer Trägerrakete des Typs Ariane 5 vom europäischen Weltraumbahnhof Kourou in Französisch Guyana ins All befördert. An Bord des Satelliten mit einer Größe von zehn mal vier mal vier Metern (ohne Solarmodul und ASAR-Antenne) sowie einem Gewicht von über acht Tonnen befinden sich zehn Instrumente, die eine Fülle von Daten zur Erdbeobachtung erfassen (vgl. Abbildung 2 sowie Tabelle 1 im Anhang). Ein 70 Quadratmeter großes Solarmodul versorgt die Systeme mit einer Leistung von bis zu acht Kilowatt. Envisat befindet sich in einer durchschnittlichen Höhe von 800 Kilometern über der Erdoberfläche auf einer sonnensynchronen, polaren Umlaufbahn, die sich alle 35 Tage wiederholt. Allerdings ermöglicht die Konfiguration der meisten Instrumente eine zeitliche Auflösung der Oberflächenabdeckung von nur drei Tagen.

Neben den Beobachtungsinstrumenten, den Steuerungs- und Kommunikationssystemen befinden sich an Bord des Satelliten Datenspeicher zur Zwischenspeicherung von 160 Gigabit. Die Datenübertragung erfolgt entweder direkt oder über den Relais-Satelliten Artemis zu vier Bodenstationen (Kiruna in Schweden, Frascati und Fucino in

³⁰ ESA (2005b)

³¹ LILLESAND, KIEFER, CHIPMAN (2004), S. 702f.

³² ESA (2005b)

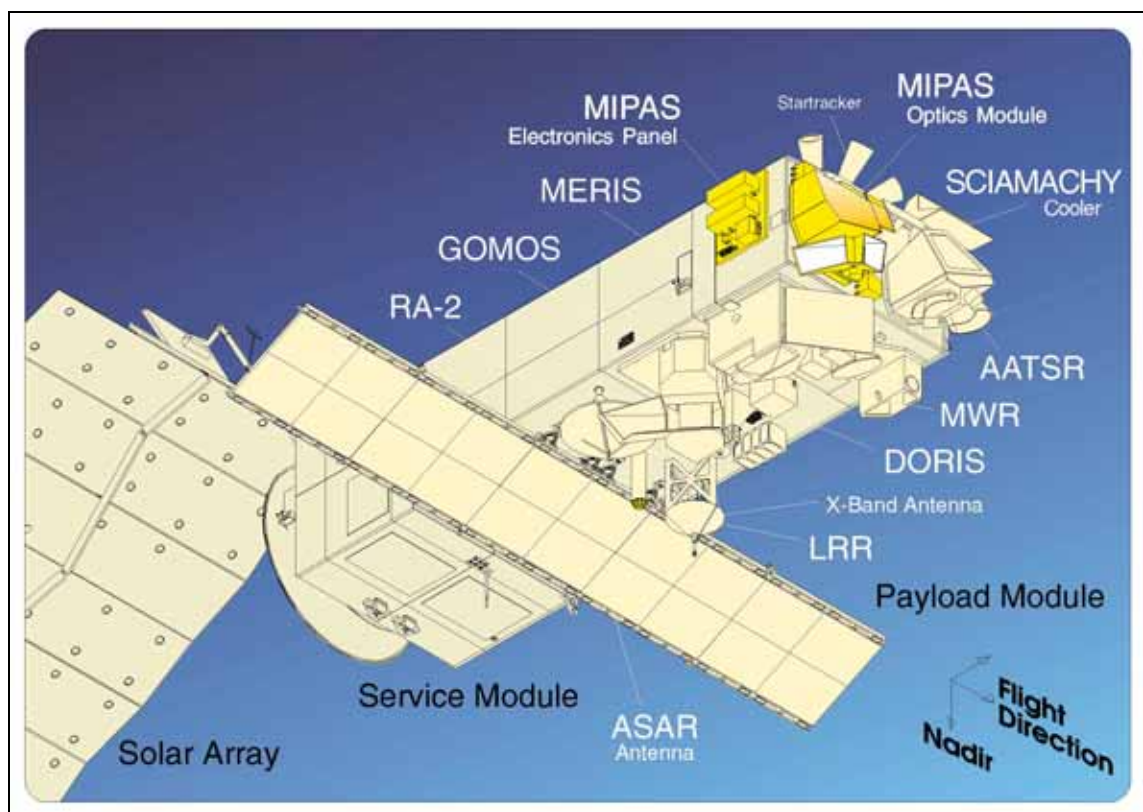
³³ ESA (2001c)

Italien sowie eine Station auf Spitzbergen). Kontrolliert und gesteuert wird Envisat vom European Space Operations Control Centre (ESOC) in Darmstadt.³⁴

Die Entwicklungskosten der gesamten Mission inklusive des Starts beliefen sich auf rund zwei Milliarden Euro. Davon wurden 1,45 Milliarden für die Entwicklung des Satelliten selbst verwendet, 140 Millionen für das Ariane-5-Transportsystem, 160 Millionen für die Bodenstationen und 250 Millionen für interne Kosten der ESA (inklusive Testeinrichtungen). Die laufenden Kosten sind mit 60 Millionen Euro pro Jahr veranschlagt – bei einer geplanten Laufzeit von fünf bis zehn Jahren.³⁵

Die Hauptaufgabe von Envisat ist es, Prozesse und Veränderungen in den Ökosystemen der Erde und der Atmosphäre zu erfassen. Die gewonnenen Daten können dazu beitragen, Zusammenhänge zu identifizieren und zu verstehen und sind damit auch für die Festlegung politischer Ziele relevant. Denn „erst eine wissenschaftlich fundierte Zustandsbeschreibung unseres Ökosystems macht es möglich, über sinnvolle Schritte zum Schutz des Ökosystems Erde zu diskutieren.“³⁶

Abbildung 2: Umweltsatellit Envisat in einer schematischen Zeichnung



Quelle: http://esamultimedia.esa.int/images/envisat_detail.jpg

³⁴ ESA (2001d)

³⁵ ESA (2001b)

³⁶ STEIN (2002)

Mit seiner schier unerschöpflichen Größe und seiner Fülle von Instrumenten und Möglichkeiten ist Envisat bislang einmalig und hat aufgrund der Vielzahl und Präzision der gewonnenen Daten entscheidende Bedeutung sowohl für die Umweltforschung als auch für andere Fragestellungen, zum Beispiel aus dem Bereich des Krisenmanagements. Die Möglichkeit, Veränderungen der gemessenen Parameter im Zeitablauf verfolgen zu können (Monitoring) ist von großem Wert – insbesondere in Kombination mit den Daten von ERS-1 und ERS-2.

4.3 Ausgewählte Instrumente an Bord und ihr Nutzen

4.3.1 Atmosphäre

An Bord von Envisat wurden zehn Instrumente installiert mit verschiedenen sich zum Teil überschneidenden Aufgabenstellungen (vgl. auch die Übersicht in Tabelle 1 im Anhang). Ein Instrument, das für viele Aufgabenbereiche eingesetzt wird, ist das schon eingangs erwähnte MERIS, ein Spektrometer, das die elektromagnetische Strahlung in 15 verschiedenen Kanälen vom sichtbaren Licht bis zum nahen Infrarot in einer Auflösung von bis zu 300 Metern abbildet. Neben MERIS sind für die Atmosphärenbeobachtung drei weitere Sensoren wesentlich: GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars), MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) und SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography). Mit ihrer Hilfe können dreidimensionale Abbildungen der Atmosphäre erzeugt werden, die Informationen über die chemische Zusammensetzung und den physikalischen Zustand von bodennahen Schichten bis in eine Höhe von 100 Kilometern enthalten. Die Sensoren liefern Daten über den Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre, über Wolkenbildung, Verteilung und Konzentration von klimarelevanten Spurengasen und Industrieabgasen oder den Umfang der von den Wolken reflektierten Sonneneinstrahlung. Mittels der Analyse des Lichtspektrums von Sternen am Horizont nach dem Durchgang durch die Atmosphäre können dreidimensionale Modelle der Ozonschicht generiert werden. Diese können schon wenige Stunden nach der Erfassung zu lokalen Vorhersagen der UV-Einstrahlung genutzt werden.

Durch die Interpretation der umfangreichen Daten, die Envisat für die Atmosphärenforschung liefert, können Austauschprozesse zwischen den Atmosphärenschichten besser erklärt werden. Sie sind für die Berechnung von Klimamodellen von großer Bedeutung. Eine wichtige Anwendung in diesem Bereich ist auch die Beobachtung von Luftverschmutzungen: Die Sensoren können ebenso Stickoxide erfassen, wie Schwefeldioxid, Ozon-schädigende Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe und Brommonoxid oder auch Aerosole. Die Schadstoffquellen und das Ausmaß der Verschmutzungen können

mit aus Envisat-Daten erzeugten Karten identifiziert und damit die Einhaltung internationaler Standards und Protokolle überwacht werden.³⁷

4.3.2 Ozeane

Im Bereich der Ozeanforschung kommen im Wesentlichen fünf Instrumente zum Einsatz: Neben MERIS sind dies AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer), MWR (Microwave Radiometer), RA-2 (Radar Altimeter) und ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar). Sie erfassen Wellenhöhen, Unterwasserwellen, Winde und die Farbe der Ozeane und messen die Temperatur der Wasseroberfläche auf 0,3°C genau.³⁸

In der Praxis geben diese Daten Auskunft etwa über die globale Erwärmung und ermöglichen Untersuchungen über die Wanderungen von Fischschwärmen und Plankton. Auch das Verhalten großer Meeresströmungen, wie zum Beispiel dem Golfstrom, wird mit Envisat beobachtet. Das Verständnis dieser Prozesse ist von elementarer Bedeutung für die Klimaforschung.³⁹ Auch für das Katastrophenmanagement auf See werden Daten von Envisat verwendet. So gaben im November 2002 beim Unfall des Öltankers „Prestige“ vor der spanischen Küste Envisat-Daten Auskunft über die Ausdehnung des Ölteppichs und halfen bei der Planung der Reinigungsarbeiten.⁴⁰

Eine weitere praktische Anwendung liegt in der Vorhersage der so genannten El Niño Southern Oscillation (ENSO). Dieses Phänomen sorgt in unregelmäßigen Abständen für katastrophale Witterungsanomalien in Asien und Amerika, etwa ungewöhnlich starke Regenfälle in Südamerika, Dürren und Waldbrände in Australien und Südostasien, Winterstürme in Kalifornien, Hitzewellen in Kanada oder ein verstärktes Auftreten von Hurrikans. In den Jahren 1997–98 verursachte die ENSO Schäden von über 30 Milliarden Euro.⁴¹ Durch Messung der Oberflächentemperaturen des Pazifiks, Beobachtung von Veränderungen im Wachstum von Phytoplankton sowie von Anomalien des Meeresspiegels können das Ausmaß und die Folgen eines solchen Events abgeschätzt werden. Diese Daten fließen letztlich in mittelfristige Wettervorhersagen ein. So können in den betroffenen Regionen geeignete Schutzmaßnahmen getroffen werden, die helfen können, die Schäden dieses Phänomens in Grenzen zu halten.

³⁷ ESA (2001a) bzw. ESA (2005d)

³⁸ ESA (2001a)

³⁹ ESA (2005d)

⁴⁰ ESA (2002)

⁴¹ ESA (2005d)

4.3.3 Landoberflächen

Für die Beobachtung der Erdoberfläche sind ebenfalls MERIS, ASAR, RA-2 und AATSR wichtige Instrumente. Bestimmt werden Landnutzungs- und Vegetationsformen, Wachstumsphasen von Pflanzen oder die Beschaffenheit der Erdoberfläche. Hebungen und Senkungen des Bodens können mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich bestimmt werden. Diese Daten sind für die Überwachung vulkanischer Aktivität von großer Bedeutung, oder auch für die Immobilienbranche sowie deren Versicherer, welche die Risiken von Baugrund einschätzen müssen. Über die präzise Messung der Oberflächentemperaturen mit MIPAS und SCIAMACHY können Waldbrände (etwa aus Brandrodung in den Regenwäldern) erkannt und ihr Ausmaß beobachtet werden.⁴²

Als Beispiel für die praktische Anwendung von Envisat-Daten sei hier der Hochwasserschutz angeführt. Hochwasserereignisse, wie etwa 2002 das Elbehochwasser, führen immer wieder zu Millionenschäden und kosten Menschenleben. Gemäß ESA betreffen rund 85% aller Zivilschutzmaßnahmen in Europa den Hochwasserschutz.⁴³ Zur effizienteren Nutzung dieser Ressourcen können Daten von Envisat die Planung von Schutzmaßnahmen unterstützen: Mit präzisen digitalen Geländemodellen, die mit Daten der Radarsensoren von Envisat anfertigt werden, werden Überflutungssimulationen erzeugt. Sie tragen dazu bei, überflutungsgefährdete Bereiche zu identifizieren um sie entsprechend zu schützen. Auch während eines aktuellen Hochwasserereignisses helfen genaue Satellitendaten, das Ausmaß der Überflutung einzuschätzen und das Katastrophenmanagement zu verbessern. Nach einem Hochwasser schließlich können mittels der Satellitenbilder die Schäden besser eingeschätzt werden, Informationen, die auch für die Versicherungswirtschaft von großer Bedeutung sind.⁴⁴

4.3.4 Eisforschung

Die Beobachtung der Kryosphäre, also der Eismassen der Polarregionen, der Gletscher der Hochgebirge und der saisonalen Schneeflächen der gemäßigten Klimate, erfolgt vor allem mit den Radarsystemen ASAR und RA-2 sowie mit MERIS. Sie erfassen die Ausdehnung des Eises, können verschiedene Eisarten unterscheiden und messen die Dicke des Eises der antarktischen Schelfe und des arktischen Meereises. Die Daten helfen auch beim Verständnis des Einflusses der Kryosphäre auf das globale Klimageschehen. Das hohe Reflexionsvermögen von Eis- und Schneeflächen und

⁴² ESA (2001a) bzw. ESA (2005d)

⁴³ ESA (2004b)

⁴⁴ ESA (2004b)

ihre isolierenden Eigenschaften für Ozeane und Land wirken einerseits mäßigend auf die Erwärmung des Klimas. Mit ihrem Einfluss auf die Temperatur und den Salzgehalt des Meerwassers agieren die polaren Eismassen andererseits als Antriebskräfte globaler Meeresströmungen. Das Eis reagiert jedoch sehr empfindlich auf kleinste Klimaänderungen, wie sich derzeit etwa an den Gletschern der Alpen oder auch den Eismassen der Antarktischen Halbinsel beobachten lässt. Das Monitoring der Kryosphäre ist auch insofern von Bedeutung, als das Abschmelzen der Inlandeismassen Grönlands und der Antarktis zum Anstieg des Meeresspiegels führt. Praktische Bedeutung erlangen die Daten von Envisat zudem für die Schifffahrt, etwa mit der Verfolgung großer Eisberge, die sich immer wieder von den Eisschelfen der Antarktis lösen und in die Schifffahrtsstraßen treiben.⁴⁵

5 Schlussbemerkungen, Fazit und Ausblick

Wie auf den vorangegangenen Seiten gezeigt wurde, leisten Fernerkundungssatelliten wie Envisat heute entscheidende Beiträge zur Erforschung der Erde und ihrer Umwelt. Die Beobachtung und das aus den Daten entwickelte Verständnis der Erscheinungsformen und Prozesse auf der Landoberfläche, in den Ozeanen und der Atmosphäre sind unverzichtbar, um politische und gesellschaftliche Prozesse für eine nachhaltige Entwicklung auf den Weg zu bringen. So können Satellitendaten auch entscheidende ökonomische Auswirkungen haben, zum Beispiel durch die Verringerung wirtschaftlicher Schäden von Naturkatastrophen aufgrund besserer Planungen oder erleichterter Überführung und Sanktionierung von Umweltsündern. Wichtig ist dafür jedoch die gute Integration von Datenerhebung und -interpretation und der Umsetzung in die Praxis.

In absehbarer Zukunft wird Envisat wohl der größte Umweltsatellit bleiben. Die Entwicklung der europäischen Satellitenfernerkundung geht heute eher in Richtung kleinerer, spezialisierter Satelliten, die jeweils nur über einen begrenzten Leistungsumfang verfügen. In einem globalen Netzwerk von Fernerkundungssatelliten sollen sie einen speziellen Beitrag leisten.⁴⁶ In der Testphase befindet sich derzeit zum Beispiel CryoSat, der mittels Radar kleinste Veränderungen in der Eisdicke der polaren Inlandeismassen und Eisschelfe messen kann. Diese Daten helfen bei der Einschätzung, ob und in welchem Umfang die Eismassen aufgrund der globalen Klimaerwärmung abschmelzen. Der Start ist für den 15. September 2005 geplant.⁴⁷

⁴⁵ ESA (2001a) bzw. ESA (2005d)

⁴⁶ GOODMAN (2002), S. 825

⁴⁷ ESA (2005c)

Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J. (2001): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 2. Aufl. Darmstadt.
- BACKHAUS, R.; GRUNDWALD, A. (1995): Umwelt und Fernerkundung – eine Einführung in das Buch. In: Umwelt und Fernerkundung. Was leisten integrierte Geo-Daten für die Entwicklung und Umsetzung von Umweltstrategien? Hrsg.: R. BACKHAUS; A. GRUNWALD. Heidelberg. S. 5-9.
- EISENBEISS, G.; ÖTTL, H.; EHLERS, E. (1995): Vorwort. In: Umwelt und Fernerkundung. Was leisten integrierte Geo-Daten für die Entwicklung und Umsetzung von Umweltstrategien? Hrsg.: R. BACKHAUS; A. GRUNWALD. Heidelberg. S. 3-4.
- ESA (2001a): Envisat. Europe's Environment Satellite. Online im Internet:
http://ravel.esrin.esa.it/docs/Envisat_Brochure_Eng.pdf
[Zugriff: 18.04.2005, 12:22 Uhr]
- ESA (2001b): Envisat Fact Sheet. Online im Internet:
http://envisat.esa.int/m-s/envisat_mission_2001/Present/Facts.pdf
[Zugriff: 18.04.2005, 12:27 Uhr]
- ESA (2001c): Envisat: Bodenkontakt im Datenstrom. Online im Internet:
http://www.esa.int/esaCP/Pr_13_2001_i_GE.html [Zugriff: 31.05.2005, 11:42 Uhr]
- ESA (2001d): Envisat Brochure. Online im Internet:
http://envisat.esa.int/m-s/envisat_mission_2001/brochure/is2_8_5.pdf
[Zugriff: 18.04.2005, 12:33 Uhr]
- ESA (2002): Envisat's ASAR reveals extent of massive oil spill off Spanish coast. Online im Internet: http://www.esa.int/esaCP/ESAGFD7708D_index_0.html
[Zugriff: 31.05.2005, 12:14 Uhr]
- ESA (2004a): Global Monitoring for Environment and Security. Online im Internet:
http://www.esa.int/esaEO/SEM343VQUUD_environment_0.html
[Zugriff: 31.05.2005, 12:22 Uhr]
- ESA (2004b): Civil protection assistance. Online im Internet:
http://www.esa.int/esaEO/SEM343VQUUD_environment_0.html
[Zugriff: 31.05.2005, 12:28 Uhr]
- ESA (2005a): 30th Anniversary 1975-2005. Online im Internet:
<http://www.esa.int/SPECIALS/30years/index.html> [Zugriff: 31.05.2005, 11:20 Uhr]
- ESA (2005b): Bilanz: 30 Jahre ESA. Online im Internet:
http://www.esa.int/esaCP/SEM343VQUUD_environment_0.html
[Zugriff: 30.05.2005, 18:44 Uhr]

- ESA (2005c): Ice-covered Baltic Sea proves ideal setting for final pre-launch CryoSat validation. Online im Internet:
http://www.esa.int/esaEO/SEMFDLW797E_planet_0.html
 [Zugriff: 31.05.2005, 12:03 Uhr]
- ESA (2005d): Space and Earth Monitoring – Understanding Our Planet.
 Online im Internet: http://www.esa.int/esaEO/SEMV9T2VQUUD_planet_0.html
 [Zugriff: 18.05.2005, 19:46 Uhr]
- GADOW, A. VON (1995): Fernerkundung für die Umweltpolitik. In: Umwelt und Fernerkundung. Was leisten integrierte Geo-Daten für die Entwicklung und Umsetzung von Umweltstrategien? Hrsg.: R. BACKHAUS, UND A. GRUNWALD. Heidelberg. S. 13-25.
- GOODMAN, S. (2002): Blast-off approaches for eagle-eyed orbiter. Nature, London, Bd. 415, Nr. 6874, S. 825.
- KAPPAS, M. (1994): Fernerkundung nah gebracht. Leitfaden für Geowissenschaftler. Bonn.
- KRAMER, H. J. (2002): Observation of the earth and its environment. Survey of missions and sensors. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milano, Paris, Tokyo.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. (2004): Remote sensing and image interpretation. Hoboken.
- ÖSTERREICHISCHES UMWELTBUNDESAMT (o.J.): GMES – Global Monitoring for Environment and Security. Online im Internet:
<http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/raumordnung/flaechenentwicklung/grundlagen/erdbeobachtung/gmes/> [Zugriff: 20.05.2005, 15:12 Uhr]
- STEIN, M. (2002) ENVISAT Sonderseite. Online im Internet:
<http://www.raumfahrer.net/raumfahrt/envisat/home.shtml>
 [Zugriff: 20.05.2005, 16:20 Uhr]
- VAUGHAN, R. A. (2001): Satellite climatology – current and future European systems. In: Remote Sensing and Climate Change. Role of Earth Observation. Hrsg.: A. P. CRACKNALL. Berlin, Heidelberg, New York. S. 81-96.

Anhang

Tabelle 1: Überblick über die Sensoren von Envisat und ihre Einsatzbereiche

Instruments		ASAR	GOMOS	RA-2	MERIS	MIPAS	MWR	LR	SCIAMACHY	DORIS	AATSR	
Atmosphere	Clouds				■				■		■	
	Humidity						■					
	Radiative Fluxes				■						■	
	Temperature					■			■			
	Trace Gases		■			■			■			
	Aerosols		■		■	■			■		■	
	Land	Surface Temperature										■
		Vegetation Characteristics	■			■						■
		Surface Elevation	■		■				■		■	
	Ocean	Ocean Colour				■						
Sea Surface Temperature											■	
Surface Topography				■				■				
Turbidity					■							
Wave Characteristics		■		■								
Marine Geoid				■								
Ice		Extent	■			■						■
	Snow Cover	■			■						■	
	Topography	■		■				■				
	Temperature										■	

Quelle: ESA (2001d)