

Stand: Januar 2010

Die wissenschaftliche Nutzung der CryoSat-2-Mission in Deutschland

Ein Konzeptpapier des CryoSat-2-Projektbüros
am Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven

Verfasser:

Dr. C. Haas, Prof. H. Miller, Prof. P. Lemke, Dr. V. Helm

Wissenschaftliches Projektbüro zur Nutzungsvorbereitung der
CryoSat-2-Mission in Deutschland



<http://www.cryosat.de>

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Die CryoSat-2-Mission	4
2.1 Wissenschaftliche Hintergründe und Ziele	4
2.2 SIRAL: Das CryoSat-2-Radaraltimeter	5
2.3 Weitere CryoSat-2-Instrumente	6
2.4 Raum- und Bodensegment	6
2.5 CryoSat-2 eine ESA-„Earth Opportunity Mission“	7
2.6 Eingliederung in internationale Wissenschafts- und Erdbeobachtungsprogramme	7
2.7 Datenprodukte	8
2.7.1 Level-0-Daten	9
2.7.2 Level-1-Daten	9
2.7.3 Level-1b-Daten	9
2.7.4 Level-2-Daten	10
2.7.5 Level-3- und -4-Daten	10
3. Die deutsche Kryosphären-Wissenschaftsgemeinde und ihre Aktivitäten	10
3.1 Förderung, logistische Ausstattung und Organisation deutscher Kryosphären-Forschung	14
4. CryoSat-2-Fragestellungen deutscher Institute	16
4.1 Deutsche AO Projekte	16
4.2 Kalibrierung/Validierung	19
4.2.1 Landeis	19
4.2.2 Meereis	20
4.2.3 Ozean	21
4.3 Prozessstudien	21
4.3.1 Landeis	21
4.3.2 Meereis	21
4.4 Land- und Meereismodellierung	22
4.4.1 Landeis	22
4.4.2 Meereis	22
4.5 Meeresspiegel und Geodäsie	23
4.6 Anforderungen der deutschen Nutzer an Datenprodukte und Missionsführung	23
5. Beiträge deutscher Gruppen zu den wesentlichen Fragen und notwendige Maßnahmen, um diese in Erscheinung treten zu lassen	24
6. Zeitplan	25

1. Einleitung

Die CryoSat-2-Mission der Europäischen Raumfahrtbehörde (ESA) wird ab 2010 arktis- und antarktische Daten der Dicke des Meereises und der Oberflächenhöhe der Eisschilde und Schelfeise liefern. Das vorliegende Nutzungskonzept soll eine Bestandsaufnahme der mit der CryoSat-2-Mission zusammenhängenden aktuellen und zukünftig erforderlichen Aktivitäten in Deutschland darstellen. Es soll den an der Mission interessierten Wissenschaftlern einen Überblick über geplante Aktivitäten verschaffen, um ihnen den Einstieg in eigene Arbeiten im Zusammenhang mit der Mission zu erleichtern und Anknüpfungspunkte zu anderen Gruppen zu ermöglichen. Dazu werden die Hintergründe der Mission, die darin gewonnenen Daten, und die mit CryoSat-2 zu beantwortenden Fragestellungen beschrieben. Im Anschluss daran wird die deutsche, mit CryoSat-2 befasste Wissenschaftsgemeinde und ihre Fragestellungen im Zusammenhang mit der Mission dargestellt.

Das Nutzungskonzept soll außerdem die der CryoSat-2-Mission zugrunde liegenden glaziologischen Fragestellungen präsentieren. Diese gliedern sich größtenteils in wichtige internationale Wissenschaftsprogramme ein. Außerdem dienen sie zur Bearbeitung wesentlicher Fragen, deren Beantwortung das Ziel verschiedener deutscher Förderprogramme ist. Daraus ergeben sich schlüssige wissenschaftlich und international abgestimmte Forschungsprojekte, die als Grundlage für die Schaffung notwendiger nationaler und internationaler Förderprogramme dienen können. Die Erfahrungen mit früheren Satellitenmissionen wie ERS oder ENVISAT haben gezeigt, dass dies dringend notwendig ist, um deutschen Wissenschaftlern eine bestmögliche und koordinierte Auswertung der Daten der Mission zu ermöglichen.

Die Kryosphäre im Sinne von CryoSat-2 beschränkt sich auf das Meereis und die glazialen Eisschilde und Schelfeise ("Landeis") Grönlands und der Antarktis. CryoSat-2 wird keine Forschungsarbeiten im unmittelbaren Zusammenhang mit Permafrost oder Eis in der Atmosphäre ermöglichen. Da die mit CryoSat-2 bearbeiteten Fragen jedoch im Wesentlichen aus dem Bereich der Klimaforschung kommen, werden langfristig auch Geologen, Ozeanographen und Meteorologen von der CryoSat-2-Mission profitieren. Durch die Beobachtung von Oberflächenform- und Masseänderungen bestehen außerdem unmittelbare enge Anknüpfungspunkte mit Geodäten, die an der Auswertung der neuen Schwerefeldmissionen CHAMP, GRACE und GOCE arbeiten.

Ein erster Start der CryoSat-Mission wurde im Oktober 2005 durchgeführt. Dieser schlug jedoch leider fehl, und der Satellit wurde verloren. Aufgrund der drängenden wissenschaftlichen Fragen entschied sich die ESA jedoch, die Mission als CryoSat-2-Mission zu verlängern. Ein Neustart des Satelliten ist für den 25.02.2010 geplant.

2. Die CryoSat-2-Mission

Hintergründe und Ziele der CryoSat-2-Mission sind auf den Internetseiten des deutschen CryoSat-Projektbüros <http://www.cryosat.de> zusammenfassend dargestellt. Detailliertere Darstellungen der CryoSat-2-Mission sind außerdem in folgenden ESA-Dokumenten zusammengefasst:

- CryoSat-2 Brochure
http://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/BR199_LR.pdf
- CryoSat-2 Science Report
http://esamultimedia.esa.int/docs/Cryosat/Science_Report.pdf
- CryoSat-2 Science and Mission Requirements:
http://esamultimedia.esa.int/docs/Cryosat/MRD_21Nov99.pdf
- CryoSat-2 Mission and Data Description:
http://esamultimedia.esa.int/docs/Cryosat/Mission_and_Data_Descrip.pdf
- CryoSat-2 Calibration and Validation Concept:
http://esamultimedia.esa.int/docs/Cryosat/CVC_14Nov01.pdf
- CryoSat-2 Data Processing Concept:
http://esamultimedia.esa.int/docs/Cryosat/Data_Proc_Concept.pdf
- ESA Bulletin (No. 122, Mai 2005) über CryoSat-2:
http://www.esa.int/SPECIALS/ESA_Publications/SEMLML6DIAE_0.html
- CryoSat-2 Ground Segment Instrument Processing Facility Level_1b
http://esamultimedia.esa.int/docs/Cryosat/cryosat_level-1b_spec.pdf
- CryoSat-2 Ground Segment Instrument Processing Facility Level_12
http://esamultimedia.esa.int/docs/Cryosat/cryosat_level-2_spec.pdf

Die Dokumente sind auf den Internetseiten der ESA frei verfügbar und können auch über die deutsche CryoSat-Webpage <http://www.cryosat.de> einfach erreicht werden. Die wesentlichen Aspekte der Mission werden im Folgenden zusammengefasst.

2.1 Wissenschaftliche Hintergründe und Ziele

Eine der größten Umweltveränderungen, die durch eine globale Klimaerwärmung verursacht würde, wäre der Anstieg des Meeresspiegels als Folge des Abschmelzens der Eiskappen Grönlands und der Antarktis, sowie das Verschwinden des Meereises in Arktis und Antarktis. Die Messungen von CryoSat-2 sollen dazu beitragen, solche Szenarien zu konkretisieren und ihre Vorhersagbarkeit zu verbessern. CryoSat-2 wird entsprechende Daten der Oberflächenhöhen der Eisschilde und der Dicke des Meereises liefern, die zur Verbesserung und Validierung von numerischen Eis(vorhersage)modellen dienen sollen. Über die Dauer der Mission und während nachfolgender Missionen werden außerdem längere Zeitreihen dieser Parameter gewonnen, die es ermöglichen, sowohl die natürliche Variabilität als auch eventuelle Trends in der Dicke der Eismassen zu beobachten.

Um derartige Veränderungen genauer vorhersagen zu können, ist eine genaue Kenntnis der Massenbilanz und der Prozesse der großen Eisschilde notwendig. Aufgrund der gewaltigen Größe der Eisschilde fehlen bislang zuverlässige Daten über die Massenbilanz der meisten Gebiete. Um mögliche Veränderungen verstehen und vorhersagen zu können, ist der Einsatz numerischer Modelle erforderlich. Die Erfüllung dieser Anforderungen wird durch CryoSat-2 wesentlich realisiert, da der Satellit sowohl Aussagen über die räumliche und zeitliche Variabilität (wenige Jahre) zulassen wird, als auch eine genaue Darstellung der Oberflächenhöhen der Eisschilde, die für eine realistische Modellierung erforderlich ist. In diesem Nutzungskonzept soll der Begriff „Landeis“ der Oberbegriff für Eisschilde und Schelfeis sein, um diese meteorischen Eismassen vom Meereis abzugrenzen.

Die Diskussion um die Interpretation neuer U-Boot-Dickenmessungen des arktischen Meereises, die eine drastische Abnahme des Eisvolumens in der Arktis suggerieren, zeigen, dass selbst ausgedehnte militärische U-Boot-Profile keine arktisweiten Aussagen zulassen. Meereis unterliegt so starken Schwankungen in den vorherrschenden atmosphärischen Zirkulations- und damit Driftsystemen, dass eine arktisweite Erfassung der Eisdicken notwendig ist, um die Massenbilanz und ihre Variabilität zu quantifizieren. Numerische Modelle können die Flächenausdehnung und Drift des Meereises weitestgehend berechnen, über die Genauigkeit der Eisdicke und damit des Gesamtvolumens ist mangels Daten jedoch nichts bekannt. Flächendeckende Eisdickendaten sind erforderlich, um diese Modelle zu validieren.

CryoSat-2 wird erstmalig Daten aus hohen Breiten bis 88°N/S liefern. Bisherige Missionen konnten bestenfalls Gebiete bis 82°N/S vermessen. Das einzige wissenschaftliche Messgerät an Bord des Satelliten ist ein spezielles Radaraltimeter (SIRAL: Synthetik-Apertur Interferometrisches Radaraltimeter), das für die Vermessung von Eis optimiert wurde. Konnten von Satelliten bislang nur Messungen der Flächenausdehnung der Eismassen der Erde durchgeführt werden, wird durch CryoSat-2 erstmalig auch eine Bestimmung ihres Volumens möglich.

2.2 SIRAL: Das CryoSat-2-Radaraltimeter

CryoSat-2 ist eine Radaraltimeter-Mission. Das einzige wissenschaftliche Messsystem ist das SIRAL (Synthetik-Apertur, Interferometrisches Radaraltimeter). Mit einem Radaraltimeter wird der Abstand zwischen Satellit und Erdoberfläche aus der Laufzeit von Radarsignalen bestimmt. Da die Höhe des Satelliten auf seiner Umlaufbahn sehr genau bekannt ist, lässt sich mit der Entfernungsmessung die Höhe der Erdoberfläche über dem Geoid bestimmen, einer Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes, die ungefähr mit dem Meeresspiegel übereinstimmt. Allerdings besitzt die Meeresoberfläche eine ausgeprägte Topographie (Meeresoberflächentopographie), die zu Abweichungen von bis zu 1.8 m vom Geoid führen kann. Aus zeitlichen Änderungen der Höhenmessung über Landeis lassen sich deshalb Eisdickenänderungen ableiten, da andere mögliche Höhenänderungen, beispielsweise durch tektonische Hebungen oder Senkungen, in den betrachteten Zeiträumen um Größenordnungen geringere Beträge aufweisen. Die eigentliche, absolute Dicke des Landeises muss mit anderen Verfahren bestimmt werden, beispielsweise mit Hilfe von Seismik oder Boden-/Flugzeugradar (GPR: Ground Penetrating Radar).

Bei Meereismessungen kann mit dem Radaraltimeter das Freibord, also die Höhe der Eisschollen über dem Meeresspiegel bestimmt werden. Die Eisdicke lässt sich nach dem Archimedischen Prinzip aus dem Freibord ableiten, weil sich Meereis im Schwimmgleichgewicht befindet. Allerdings müssen die Dicke des Schnees sowie die spezifischen Dichten von Eis und Schnee bekannt sein.

Wie die Radaraltimeter auf Geosat, Seasat, ERS und ENVISAT ist SIRAL ein Ku-Band-Altimeter, das mit einer Signalfrequenz von 13.5 GHz arbeitet.

SIRAL wurde insbesondere für die speziellen Anforderungen entwickelt, die Land- und Meereis an genaue Radaraltimetermessungen stellen. Mit herkömmlichen Radaralimetern, die für die Vermessungen der Meeresoberflächenhöhe entwickelt wurden, lassen sich die eisbedeckten Gebiete nicht vermessen. Beim Meereis führt die Koexistenz von Eisschollen und eisfreien Rinnen oder Waken zu spiegelnden Reflexionen, die eine herkömmliche Auswertung unmöglich machen. Mit der synthetischen Apertur des Radars wird dessen räumliche Auflösung in Flugrichtung erhöht, so dass sich Eis und Wasser besser unterscheiden lassen. Der Footprint des SIRAL, d.h. die Fläche, aus der nennenswerte Beiträge des rückgestreuten Signals kommen, hat entlang der Flugrichtung nur einen Durchmesser von 250 m. Die Probleme bei der Vermessung von Landeis entstehen insbesondere durch die Neigung der Eisoberfläche, wodurch das Signal nicht direkt aus dem

Nadir kommt, d.h. dem Punkt genau unter dem Satelliten. Mit Hilfe der Interferometrie lässt sich die Geländeneigung bestimmen. Dazu wird CryoSat-2 eine zweite Radarantenne besitzen, die eine Basislinie von 1.2 m bildet. Dadurch wird eine Winkelmessung von 0.01° bei einer lateralen Auflösung von 125 m möglich.

Große Messfehler entstehen normalerweise beim Verfolgen des Radarechos ("Tracking") über starken Höhenänderungen. SIRAL wird mit einem langen Empfangsfenster ausgestattet sein (512 Abtastwerte), um die Trackingprobleme zu minimieren. Simulationen über den Anden, die als besonders schwierig eingestuft werden, haben einen Trackingverlust von nur 0.32% ergeben. Technologisch steht damit beispielsweise auch einer Vermessung kleiner Eiskappen und Gletscher nichts im Wege. Allerdings wird es schwierig sein, diese Gebiete häufig genug zu vermessen, um statistische Messfehler zu beseitigen.

Über offenem Wasser wird SIRAL im konventionellen pulsbegrenzten Mode arbeiten und somit eine Ergänzung zu zeitgleichen Radaraltimeter-Messungen von ENVISAT, Jason, oder Topex-Poseidon darstellen.

2.3 Weitere CryoSat-2-Instrumente

Während das SIRAL das eigentliche wissenschaftliche Messgerät an Bord CryoSat-2 ist, trägt der Satellit eine Reihe weiterer Geräte, die im Wesentlichen einer genauen Bahn und Basislinienbestimmung dienen.

DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integration by Satellite) ist ein französisches Satelliten-Navigationssystem, das hochgenaue Bahnbestimmungen aus der Doppler-Verschiebung von Zweifrequenz-Signalen berechnet, die kontinuierlich von festen Bodenstationen ausgesendet werden. Dabei wird aus einer Frequenz die Radialgeschwindigkeit des Satelliten bestimmt, während aus der anderen die Fehler bereinigt werden, die sich aus Signal-Laufzeitverzögerungen in der Ionosphäre ergeben. Im Gegensatz zum amerikanischen Satelliten-Navigationssystem GPS (Global Positioning System) ist DORIS auf die Existenz und den Betrieb von zahlreichen Bodenstationen angewiesen.

Ein Startracker (Sternverfolger) führt Bahn- und Lagebestimmungen auf astronomische Weise durch, indem die Positionen charakteristischer Sterne mit einer im Startracker gespeicherten, hochgenauen Sternkarte verglichen werden. Die Lage der Sterne wird wie bei einer Digital- oder Videokamera mit einer CCD-Optik bestimmt. Dadurch kann die Ausrichtung der Basislinie sehr genau bestimmt werden, was für die interferometrische Auswertung von hoher Bedeutung ist.

Darüber hinaus besitzt CryoSat-2 zwei Laser-Reflektoren, die aus hochpräzisen optischen Prismen bestehen. Diese Reflektoren ermöglichen eine Entfernungsbestimmung mit Lasern vom Erdboden aus. Dazu gibt es spezielle PRARE-Bodenstationen (Precise Range and Range-rate Equipment), von denen aus die Bahn von Satelliten operationell vermessen wird.

CryoSat-2 besitzt keine (Mikrowellen-) Radiometer oder optische Sensoren, die eine Bestimmung des Atmosphären-Wassergehaltes oder des Ionosphärenzustandes ermöglichen würden. Deshalb sind die Messungen über den Ozeanen der gemäßigten Breiten weniger genau als die anderer Satelliten. Aber auch in den Polargebieten kann nicht immer trockene Luft erwartet werden. Die für Signal-Laufwegkorrekturen benötigten Informationen werden deshalb aus operationellen Modelldaten des ECMWF (European Center for Medium Range Weatherforecast) gewonnen. Eine Abschätzung der Genauigkeit solcher Modellberechnungen über den Polargebieten ist allerdings schwierig.

2.4 Raum- und Bodensegment

Der industrielle Hauptpartner der CryoSat-2-Mission ist die Astrium GmbH (Friedrichshafen am Bodensee). Astrium ist zuständig für das Raumsegment, d.h. den Bau des Satelliten als Trägerplattform und die Integration aller wissenschaftlichen und technischen Geräte, die zum Betrieb des Satelliten benötigt werden. Bei der Satellitenhardware wird weitestgehend auf

bereits bewährte Technologie zurückgegriffen, um die Kosten und die Bauzeit so gering wie möglich zu halten. Der CryoSat-2-Start ist nun offiziell für den 25. Februar 2010 geplant. Das Bodensegment, d.h. Empfang, Prozessierung und Verteilung der Daten soll in Kiruna (Schweden) eingerichtet werden. CryoSat-2-Daten sind kostenfrei zugänglich und werden direkt durch das „Helpdesk“ der ESA (EOHelp@esa.int) im Rahmen von Cat-1 Proposals verteilt.

2.5 CryoSat-2 eine ESA-„Earth Opportunity Mission“

Die CryoSat-Mission wurde von einer Gruppe europäischer Wissenschaftler unter der Leitung von Prof. D. Wingham als erste ESA-"Earth Opportunity"-Mission vorgeschlagen und aus einer Vielzahl anderer Missionsvorschläge ausgewählt. Nicht nur die technische Herausforderung und Realisierbarkeit war dabei ein Kriterium, sondern insbesondere die auch in der Öffentlichkeit diskutierten Fragestellungen, die sich auf Veränderungen des Erdklimas und insbesondere ihrer Auswirkungen auf die Kryosphäre beziehen.

Im Rahmen des "Earth Opportunity Missions"-Programmes werden Missionen zu sehr eng begrenzten geowissenschaftlichen Fragestellungen durchgeführt. Dabei sollen neue Sensortechnologien entwickelt werden, um konkrete Fragestellungen besser als mit herkömmlichen Sensoren beantworten zu können und die Kompetenzen der europäischen Industrie zu fördern. Andererseits sollen die Missionen innerhalb kurzer Zeit durchgeführt werden und auf bewährte Raumfahrttechnologie zurückgreifen, um möglichst kostengünstig zu sein.

Die "Earth Opportunity" Missionen sind Teil des "Earth Explorer"-Programmes, in dem unter anderem auch die GOCE-Mission ("Gravity and steady-state Ocean Circulation Explorer") und SMOS-Mission ("Soil Moisture and Ocean") mit starker deutscher Beteiligung durchgeführt wird. Die "Earth-Explorer" sind wiederum Teile des "Living Planet"-Programmes, in welchem die langfristige Erforschung und Beobachtung der Erde verankert ist. Das Earth-Watch-Programm bietet auch die Möglichkeit, die bei CryoSat-2 gemachten Erfahrungen insbesondere mit dem speziellen Radaraltimeter auf andere zukünftige Missionen anzuwenden, um so die Kontinuität der Messungen zu gewährleisten. In diesem Sinne ist CryoSat-2 selber ebenfalls nur eine neue Phase eines bereits länger währenden Beobachtungsprogrammes der ESA der Kryosphäre, das mit ERS-1&2 sowie ENVISAT seinen Anfang nahm.

2.6 Eingliederung in internationale Wissenschafts- und Erdbeobachtungsprogramme

Die wissenschaftliche Nutzung der CryoSat-2-Mission fügt sich in eine Vielzahl internationaler Wissenschaftsprogramme ein, die beispielsweise von der UNESCO oder vom WCRP (World Climate Research Programme) unterstützt werden. Die wichtigsten Programme sind SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research) und CliC (Climate and Cryosphere), das die Arbeit des 2003 beendeten ACSYS-Programmes (Arctic Climate System Study) weiterführt. Alle diese Programme haben rein beratende Funktion, um wissenschaftliche Aktivitäten zu lenken und relevante Fragestellungen zu definieren.

SCAR (<http://www.scar.org>) ist ein interdisziplinäres Programm mit der Aufgabe, wissenschaftliche Forschung jeglicher Art in der Antarktis zu initiieren, zu fördern und zu koordinieren. CryoSat-2 wird wichtige Beiträge zu den Unterprogrammen Geodäsie und Glaziologie sowie "Global Change and the Antarctic" (GLOCHANT, <http://www.up.ac.za/academic/acadorgs/SCARWGB/globchn1.html>) liefern.

CliC (<http://clic.npolar.no>) fördert die Untersuchung von Prozessen in der gesamten Kryosphäre mit dem Ziel, die Folgen früherer und zukünftiger Klimaschwankungen auf die Komponenten der Kryosphäre zu identifizieren und zu quantifizieren. Dazu gehört die Verbesserung des Verständnisses polarer Prozesse und ihrer Wechselwirkungen im

Klimasystem, sowie die Verbesserung der Repräsentation polarer Prozesse in Klimamodellen. Ausserdem werden systematische Beobachtungen bzw. ein Monitoring der Kryosphäre gefördert.

ACSYS (<http://acsys.npolar.no>) beschränkte sich auf die Untersuchung der Rolle der Arktis im globalen Klimasystem. Ebenso wie bei CliC standen dabei Fragen nach der Sensitivität der Arktis auf Klimaschwankungen im Vordergrund, und wie die Arktis ihrerseits das globale Klima aufgrund verschiedener Wechselwirkungen beeinflusst. ACSYS ist seit Anfang 2004 offiziell beendet, wird aber durch CliC unter anderem Namen und für Arktis und Antarktis weitergeführt.

Deutsche Wissenschaftler sind maßgeblich an der Implementierung dieser Programme und ihrer wissenschaftlichen Umsetzung beteiligt. Dies garantiert auch die Integration von CryoSat-2-bezogenen Projekten in diese Programme und ihre Abstimmung mit deren Zielen. IGOS (Integrated Global Observing Strategy; <http://ioc.unesco.org/igospartners>) bildet einen internationalen Rahmen für die koordinierte Schaffung eines boden- und raumgestützten Erdbeobachtungssystems. In Anerkennung der besonderen Rolle der Kryosphäre für das Klima der Erde befindet sich gerade ein Cryosphere-Thema zur Implementierung in Vorbereitung. Eisdickenmessungen und CryoSat-2 spielen dabei eine besonders wichtige Rolle.

2.7 Datenprodukte

Vor und nach dem Start von CryoSat-2 gibt es für die Nutzer verschiedene Möglichkeiten, Daten zu erhalten oder an der Verbesserung der geophysikalischen Produkte mitzuarbeiten. Die Möglichkeiten dazu werden von der ESA definiert und im Rahmen von AOs (Announcement of Opportunity) allgemein bekanntgegeben. Für die CryoSat-2-Mission sind bislang drei AOs durchgeführt wurden. Das erste AO bezog sich auf die Durchführung von Cal/Val-Aktivitäten und wurde bereits im April 2002 abgeschlossen. PIs (Principal Investigators) wird es dadurch ermöglicht, bereits direkt nach dem Start Daten zu bekommen, um diese mit Hilfe von Bodenmessungen (ground truthing) zu validieren. Aus Deutschland gehören Wissenschaftler der TU Dresden und des Alfred-Wegener-Institutes in Bremerhaven zum Cal/Val-Team (siehe Abschn. 4.2). Erst nach der Commissioning und Validation Phase, während der es mehr Kreuzungspunkte der Orbits geben wird, wird CryoSat-2 in einen quasi-operationellen Modus übergehen (Science Phase), und die eigentlichen geophysikalischen Daten liefern. Es sollen routinemäßig Level-2-Daten erzeugt werden, d.h. Eisdicken und Oberflächenhöhen entlang der Orbits. Zugriff auf diese Daten wird im Rahmen weiterer AOs für Data Exploitation und Exploitation/Experimentation sowie über ESA-Cat-1 proposals ermöglicht. Zum sogenannten ersten Daten AO konnten bis zum 31.3.2004 Projektvorschläge eingereicht werden. Aus Deutschland wurden neun Vorschläge eingereicht (siehe Abschn. 4, Tabelle 1). Es ist vorgesehen, sämtliche Level-2-Daten einmal zu reprozessieren, um die anfangs gemachten Erfahrungen mit den Daten und aus den Kalibrierungs- und Validierungsmessungen mit einzubeziehen und dadurch die Produkte zu verbessern.

Neu an der CryoSat-2-Mission ist, dass die ESA für die Erzeugung von Level-2-Daten selbst zuständig ist, d.h. die Nutzer brauchen die geophysikalischen Informationen nicht mehr selbst aus den primären Daten der Mission (Abstand zwischen Satellit und Erdoberfläche) berechnen.

Informationen über die verschiedenen Datenprodukte sowie deren Schaffung und Informationsgehalt (Abb. 1) werden in den ESA Dokumenten [CryoSat-2 Mission and Data Description](#), [CryoSat-2 Data Processing Concept](#) sowie [CryoSat-2 Ground Segment Instrument Processing Facility Level 1b](#) und [CryoSat-2 Ground Segment Instrument Processing Facility Level 12](#) ausführlich dargestellt. Die Dokumente sind auf den Internetseiten der ESA, oder einfacher auf der deutschen CryoSat-Seite <http://www.cryosat.de> frei verfügbar.

Für die Anwendungen der deutschen Nutzer (Kapitel 3 und 4) sind Level-1b- und Level-2-Daten am wichtigsten. Diese erfüllen voraussichtlich alle Nutzeranforderungen.

CryoSat Products

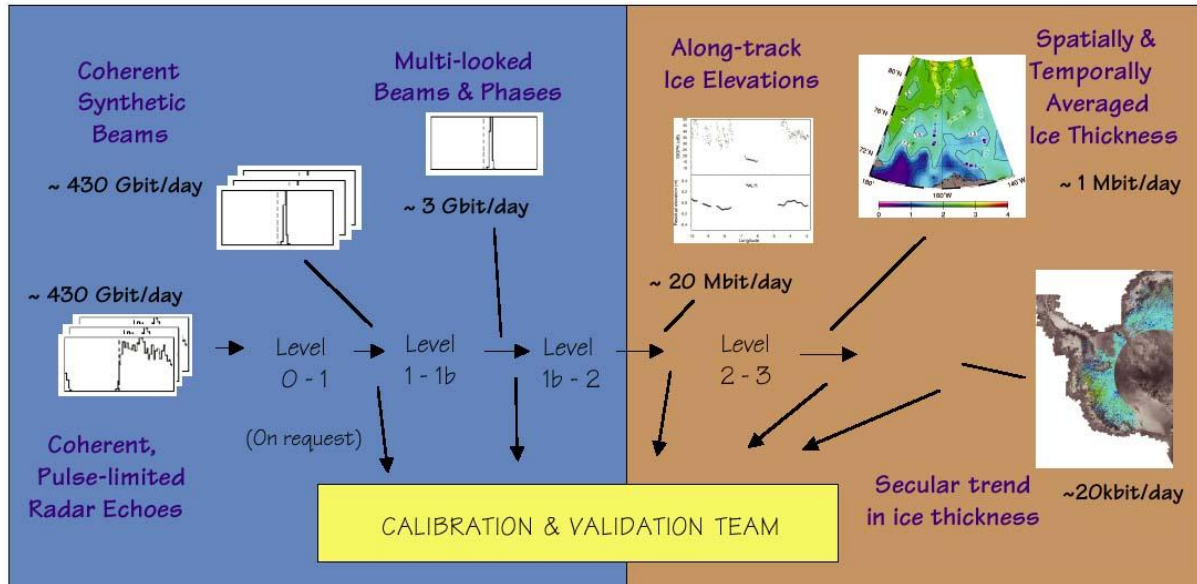


Abb. 1: Darstellung der verschiedenen CryoSat-2 Datenprodukte

2.7.1 Level-0-Daten

Die Level-0-Daten oder Full-Bit-Rate (FBR) Daten enthalten die Rohdaten des SIRAL und der anderen Instrumente (DORIS, Startracker), die hauptsächlich der Orbit- und Lagebestimmung dienen. Die Daten liegen in Ingenieurs-Einheiten vor, d.h. beispielsweise in Watt oder Sekunden. Ausserdem enthalten sie die operationellen Parameter der einzelnen Instrumente. Die Daten enthalten die gesamte Wellenforminformation der einzelnen, kohärenten Signale (siehe Level-1-Daten, Abschn. 2.7.2).

2.7.2 Level-1-Daten

In den Level-1-Daten sind Ionosphären- und Atmosphärenkorrekturen der Level-0-Daten vorgenommen. Dazu werden Standardverfahren der ESA genutzt, die bereits bei ERS und ENVISAT eingesetzt wurden. Allerdings liegen von CryoSat-2 keine koinzidenten Wassergehaltsmessungen der Satelliten vor, sondern die Korrekturen werden aus Modellberechnungen des ECMWF bezogen. Level-1-Daten enthalten insbesondere die individuellen Radar-Echos der kohärenten Signale, sortiert nach ihrer Position entlang der Satellitenspur, d.h. vor der Synthetik-Apertur-Prozessierung. Diese Signale ähneln den konventionellen puls-begrenzten Radaraltimetersignalen, und sind für Validierungsaktivitäten interessant. Aus ihnen lassen sich das Eindringverhalten des Signals im Schnee oder die Rauigkeit der bestrahlten Oberfläche ableiten. Die Daten können wertvolle Beiträge zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Mikrowellen und Schnee oder Eis liefern. Level-1-Daten liegen ebenfalls als FBR-Daten vor.

2.7.3 Level-1b-Daten

In diesen Daten ist der Schritt der Synthetik-Apertur- und interferometrischen Prozessierung vollzogen. Die Daten beinhalten hochaufgelöste Radar-Echos, und entsprechen einem Punkt auf der Erdoberfläche unter dem Satelliten, zeitlich entlang der Satellitenspur geordnet. Nach

diesem Schritt besitzen die Daten nicht mehr die typischen Radaraltimeter-Wellenformigenschaften wie ansteigende Flanke und langsam abfallendes Plateau, die nur bei herkömmlichen Wellenformgeometrien mit geringer räumlicher Auflösung definiert sind. Für konventionelle Radarmessungen über den offenen Ozeanen (kein SAR oder Interferometrie-Mode) entsprechen Level-1b-Daten den herkömmlichen Wellenformdaten anderer Radaraltimetermissionen.

Die Level-1b-Daten enthalten die hauptsächliche Information der Entfernungsmessung zwischen Satellit und Erdoberfläche, die für die Nutzer interessant sind. Der Datenumfang ist gegenüber den FBR-Daten deutlich reduziert.

Der Schritt von Level-1- zu Level-1b-Daten ist die wesentliche Herausforderung bei der CryoSat-2-Mission. Dieser Schritt unterscheidet sich aufgrund der neuen SAR/Interferometrie-Technologie wesentlich von bisherigen Prozessoren. Im Laufe der Mission wird es vermutlich zu neuen Erkenntnissen über Verbesserungsmöglichkeiten der SAR-Prozessierung kommen, so dass der bis dahin gewonnene Datensatz nochmals prozessiert werden wird.

2.7.4 Level-2-Daten

Level-2-Daten enthalten die geophysikalischen Informationen der Eis-Oberflächenhöhen und des Meereis-Freibords, in physikalischen Einheiten wie "Meter". Die Daten sind zeitlich entlang der Satellitenspur geordnet. Level-2-Daten über Meereis nördlich von 82°N können erst bei genauer Kenntnis der Meeresoberflächenhöhe in diesen Gebieten erzeugt werden. Diese muss jedoch erst durch CryoSat-2 selbst bestimmt werden, da bisherige Satellitenmissionen nicht in diese Breiten vorgestoßen sind. Deshalb werden Level-2-Daten aus diesen Gebieten u.U. erst nach einiger Zeit (1 Jahr) nach Beginn der Mission vorliegen.

Level-2-Daten enthalten als Flags unter anderem Informationen über den Zustand der vermessenen Oberfläche, d.h. Landeis, Meereis, oder Wasser in Rinnen und Polynjen.

Die ESA hat sich verpflichtet, operationell Level-2-Daten zu erzeugen. Damit haben CryoSat-2-Nutzer die einzigartige Möglichkeit, mit geophysikalischen Daten zu arbeiten, die bereits die interessierenden Variablen enthalten. Dies ermöglicht auch Wissenschaftlern, die wenig Expertise in der Auswertung von Radaraltimetermessungen besitzen, eine einfache Nutzung der CryoSat-2-Daten.

2.7.5 Level-3- und -4-Daten

Unter Level-3- und -4-Daten werden weiterentwickelte Produkte aus Level-2-Daten verstanden, beispielsweise Rasterkarten der Eisdicke oder Oberflächenhöhen, oder daraus abgeleitete Trends. Diese Produkte sind nicht mehr an einzelnen Orbits orientiert, sondern umfassen die Gesamtheit der Messungen während einer bestimmten Zeit oder innerhalb eines bestimmten Gebietes. Daraus lassen sich beispielsweise saisonale Zyklen der Meereisdicke oder Schmelzereignisse auf Grönland oder den Rändern der Antarktis ableiten. Level-4-Daten werden die Trends der Eisdickenzu- oder -abnahme beinhalten, die das eigentliche Ziel der CryoSat-2-Mission sind. Level-3 und -4-Daten sind rein wissenschaftliche Produkte, die nicht von der ESA zur Verfügung gestellt werden. Sie müssen von den einzelnen Wissenschaftlern aus Level-2-Daten selbst erzeugt werden.

3. Die deutsche Kryosphären-Wissenschaftsgemeinde und ihre Aktivitäten

In Deutschland wird an vielen Universitäten und Forschungsinstituten Polarforschung betrieben, was physikalische, biologische und geologische Fragestellungen einschließt. Allerdings arbeiten nur wenige dieser Gruppen an Fragen, die direkt mit CryoSat-2 in Zusammenhang stehen, d.h. für die die Massenbilanz der Kryosphäre von Bedeutung ist. Die

an einer Nutzung von CryoSat-2 interessierten Institute sind im Wesentlichen in den physikalischen Bereichen Glaziologie, Meteorologie, Ozeanographie und Geodäsie angesiedelt. Dabei liegen die Schwerpunkte der Arbeiten auf der Modellierung, bei Feldmessungen und in der Satelliten-Fernerkundung.

Im Folgenden werden die bislang an CryoSat-2 interessierten Institute und Gruppen kurz vorgestellt.

Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven

<http://www.awi-bremerhaven.de>

Das AWI ist das ausgewiesene deutsche Polarforschungsinstitut, und arbeitet dementsprechend auf vielen Bereichen, für die CryoSat-2 wertvolle Daten liefern wird. Aufgrund der hervorragenden logistischen Ausstattung werden umfangreiche Feldstudien auf Land- und Meereis durchgeführt, die die Massenbilanz/Eisdicke und die Erforschung physikalisch/chemischer Eis- und Schneeeigenschaften zum Ziel haben. Mitglieder des Instituts gehören zum CryoSat-2-Cal/Val-Team. Dafür stehen der Eisbrecher Polarstern mit Hubschraubern, einem Flugzeug, und ein umfangreicher schnee- und eisgängiger Fuhrpark zur Verfügung. Am AWI werden modernste dynamisch-thermodynamische Modelle des Meereises, der grönländischen und antarktischen Eisschilde, sowie von Schelfeisen betrieben. Erfahrung bei der Auswertung diverser Satellitendaten- und Bilder ist vorhanden. Am AWI befindet sich das wissenschaftliche Projektbüro zur Nutzungsvorbereitung der CryoSat-2-Mission in Deutschland, das für vorliegendes Nutzungskonzept verantwortlich zeichnet.

Die Logistik des AWI gehört zur Grundförderung durch das BMBF und steht grundsätzlich allen deutschen Polarforschern zur Verfügung (Abschn. 3.1).

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

<http://www.bgr.bund.de>

Die BGR führt seit vielen Jahren flächendeckende luftgestützte Radar-Eisdickenmessungen durch. Es liegen Daten aus der Umgebung der Schirmacher-Oase, aus Nord Viktorja Land, aus dem Bereich der Oates Küste und aus den Prince Charles Mountains vor. Die Daten sind allgemein zugänglich und unter anderem in das internationale BEDMAP-Projekt eingeflossen. Auch zukünftig werden im Rahmen weiterer BGR-Programme Eisdickendaten für Massenbilanzberechnungen gewonnen werden.

Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum, Oberpfaffenhofen

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

Das DLR/DFD ist im Bereich der SAR-Auswertung mit polaren Themen befasst. Dazu gehört die Ableitung von Meereiseigenschaften, sowie die Beobachtung der Wellendämpfung in der Eisrandzone in komplexen Daten. SAR interferometrische Studien wurden am Twaithes Gletscher in der Antarktis durchgeführt. Besonderes Interesse besteht an einer synergetischen Auswertung von CryoSat-2- und anderen Radardaten.

Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, München

<http://www.dgfi.badw.de>

Im Rahmen allgemeiner geodätischer Forschungsprojekte beschäftigt sich das DGFI mit der Erstellung konsistenter geozentrischer Referenzsysteme. Diese sollen zur Verbesserung der CryoSat-2-Bahnbestimmung genutzt werden. Außerdem sollen CryoSat-2-LBR-Daten über den Ozeanen mit Daten anderer satellitengestützter Radaraltimeterdaten (Envisat, Jason-1, GFO) kombiniert werden, um zu einer Verbesserung des marinen Geoids beizutragen und genauere Abschätzungen von Meeresspiegeländerungen zu ermöglichen.

Fachbereich Vermessung, Informatik und Mathematik, FH Stuttgart

http://www.hft-stuttgart.de/fbvim/index_html

Der FBV Stuttgart führt langjährige Vermessungen Teile der EGIG-Traversalen auf Grönland durch. Diese sollen im Rahmen von Validierungsarbeiten für CryoSat-2 genutzt werden.

GeoForschungsZentrum Potsdam

<http://www.gfz-potsdam.de>

Das GFZ hat umfangreiche Erfahrungen in der Schwerefeldbestimmung und ist führend an den Satellitenmissionen CHAMP, GRACE und GOCE beteiligt. Darüber hinaus hat das GFZ eine langjährige Expertise in der Untersuchung von Meeresspiegeländerungen und der Wellenformanalyse von Radaraltimetern über unterschiedlichen Oberflächen. So wurden verschiedene Retrackingalgorithmen zur Wellenformanalyse über Meer- und Landeis entwickelt und implementiert.

Das GFZ betreibt das Altimeterdaten- und -prozessierungssystem (ADS), das homogenisierte Daten verschiedener Radaraltimetermissionen zum Download anbietet. ADS bietet gleichzeitig den Nutzern die Möglichkeit, Radaraltimeterdaten nach unterschiedlichen Gesichtspunkten zu prozessieren (Level 3).

Institut für planetare Geodäsie, Dresden

<http://tpg.geo.tu-dresden.de/ipg>

Das IPG ist seit jeher mit Massenbilanzmessungen im Gebiet der Schirmacheroase (Dronning-Maud-Land, Antarktis) mit Fernerkundungs- und geodätischen Methoden beschäftigt. Darüber hinaus wurden SAR-interferometrische Beobachtungen an einer Reihe anderer antarktischer Gletscher bzw. Schelfeise durchgeführt. Das IPG ist ausserdem an einer Kalibrierung mehrerer Radaraltimeter-Missionen über der Ostsee beteiligt. Mitglieder des Instituts gehören zum CryoSat-2-Cal/Val-Team.

Institut für physische Geographie, Freiburg

<http://www.geographie.uni-freiburg.de/ipg>

Das IPG hat eine lange Tradition bei der Bearbeitung von glaziologischen Themen an der Antarktischen Halbinsel. Hierzu gehören insbesondere die Ableitung von Schneeeigenschaften und ihrer Veränderungen aus SAR- und Feldmessungen sowie die Bestimmung von Gletscher-Massenbilanzen mit Feld- und Fernerkundungsmethoden. Das IPG besitzt eine Reihe von digitalen Höhenmodellen für Gletscher an der Antarktischen Halbinsel.

Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, TU München

<http://www.iapg.bv.tum.de/iapg.html>

Das IAPG ist massgeblich an den Schwerefeld-Satellitenmissionen CHAMP, GRACE und GOCE beteiligt. Diese Missionen werden verbesserte Schwerefelddaten auch für die Polargebiete liefern, die eine unbedingte Voraussetzung für genaue Höhenmessungen darstellen. Mit Hilfe der geodätischen Missionen lassen sich außerdem Höhenänderungen durch glazial-isostatische Ausgleichsbewegungen mit solchen durch Eisdickenänderungen vergleichen. Das IAPG war führend an der Beantragung eines DFG-Schwerpunkts zum Thema Massentransporte und -anomalien beteiligt (siehe Abschn. 4.5).

Institut für Geophysik, Münster

<http://earth.uni-muenster.de>

Vor der Gründung des AWI war das Institut für Geophysik eines der wichtigsten deutschen Polarforschungsinstitute. In Münster werden Eisdickenmessungen mit Bodenradarverfahren durchgeführt. Darüber hinaus werden numerische Eis-Ozeanmodelle einiger Schelfeise der

Antarktis betrieben. Mit exakteren Höhenmodellen aus CryoSat-2-Daten können diese Modelle wesentlich besser konditioniert werden.

Institut für Meeresforschung, Hamburg

<http://www.ifm.uni-hamburg.de>

Am IfM werden ozeanographische Arbeiten insbesondere im Nordatlantik und in der Grönlandsee durchgeführt, um die Variabilität des Wassermassentransportes und damit verbundene Klimaschwankungen zu untersuchen. Der Süßwasserhaushalt in diesen Gebieten hängt maßgeblich von den Flüssen von Schmelzwasser des grönländischen Inlandeises und Ausflussgletschern sowie mit dem Meereistransport durch die Framstraße zusammen, die mit CryoSat-2-Daten untersucht werden sollen. Am IfM existiert ein hubschraubergestütztes Scatterometer, das unter anderem im Ku-Band arbeitet.

Institut für Umweltphysik, Bremen

<http://www.iup.physik.uni-bremen.de>

Das IUP beschäftigt sich unter Anderem mit der Satellitenfernerkundung der polaren Atmosphäre und des Meereises. Bei der Meereisfernerkundung werden Verfahren entwickelt, die qualitativ bessere und räumlich höher auflösende Beobachtungen der Meereisbedeckung aus Mikrowellendaten erlauben. Klassifizierung von SAR-Meereisbildern und die Bestimmung der Meereis-Kante gehören ebenfalls zu den bearbeiteten Themen.

Institut für Geographie, Abteilung Klimatologie & Geomathematik, Trier

<http://www.klima.uni-trier.de>

Der Fachbereich Geographie/Klimatologie der Universität Trier verfügt über lange Erfahrung bei der Erforschung von Wechselwirkungen im System Eis/Atmosphäre/Land-Hydrosphäre. Insbesondere werden Polynjen entlang der sibirischen Küste sowie Schmelzprozesse im Schnee auf dem Meereis mit Hilfe von Fernerkundungsverfahren untersucht. Letzteres ist insbesondere für die Abschätzung der Genauigkeit der CryoSat-2-Messungen sehr wichtig. Darüber hinaus werden Arbeiten zur flächenhaften Interpolation von Radaraltimeterdaten und der Interpretation von Gletscherfazies aus SAR-Bildern durchgeführt.

Kommission für Glaziologie, München

<http://www.glaziologie.de>

Die KfG erforscht den Zusammenhang zwischen Klima, Gletscherverhalten und Wasserhaushalt mit Hilfe glaziologischer Feldmessungen und Computermodellen. Dabei werden auch einige größere Gletscher, z.B. in Asien untersucht, deren Massenbilanz und Oberflächenform zukünftig mit CryoSat-2-Daten untersucht werden soll.

Zentrum für Fernerkundung der Landoberfläche, Bonn

<http://www.zfl.uni-bonn.de>

Am ZFL werden Fernerkundungsstudien zahlreicher Landoberflächen mit verschiedenen abbildenden Satellitensensoren durchgeführt. Dazu gehören auch Arbeiten über die Massenbilanz kleinerer Gletscher und Eiskappen an der Antarktischen Halbinsel, die in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für physische Geographie in Freiburg durchgeführt werden.

Institut für physikalische Geodäsie, Darmstadt

<http://www.ipg.tu-darmstadt.de>

Das IPGD beschäftigt sich in Forschung und Lehre mit der globalen Vermessung der Erde zur Festlegung von Referenzsystemen und der präzisen Positionierung, u. a. zur Erfassung von Deformationen, über alle Skalenbereiche. Satellitenverfahren werden zur Positionierung mit Globalen Satellitennavigationssystemen (GNSS), zur Erdschwerefeldbestimmung mit Laser

und Gradiometriesatelliten, sowie mit Altimetersatelliten zur Bestimmung von Ozeanspiegeländerungen und Höhenänderungen an Land angewendet und analysiert. Mit Hilfe von CryoSat-2 sollen Massenbilanzstudien des Juneau-Gletschers in Alaska erweitert werden. Weiterhin sollen CryoSat-2-Daten genutzt werden um regionale Modelle der Meerespiegelschwankungen in Küstenbereichen zu verbessern.

Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover

<http://www.ife.uni-hannover.de>

The Institute of Geodesy (Institut für Erdmessung, IfE) at LUH (Leibniz Universität Hannover) plays a leading role in terrestrial gravimetry and regional geoid determination and its combination with satellite data (e.g. from GRACE). IfE acts as one of only four Lunar Analysis Centres of the International Laser Ranging Service (ILRS) worldwide, with strong concentration on relativistic effects in the Earth-Moon system. Here, a close co-operation with the German Fundamental Station Wettzell exists, which runs almost all space geodetic techniques to contribute to the determination of global reference frames and variations in Earth rotation. IfE also chairs the interdisciplinary DFG research unit "Earth rotation and global dynamic processes". At the IfE, GPS related investigations have been carried out for more than 20 years, e.g. establishment of permanent reference station networks or calibration of GNSS (Global Navigation Satellite Systems) antennas, also for the satellite mission GOCE.

Mithilfe der Schwerefeldmissionen GOCE und GRACE in Kombination mit CryoSat-2 will das IfE auf verbesserte Änderungen im Massenhaushalt schließen. Weiterhin soll untersucht werden in wieweit das GOCE Geoid als Referenzmeerespiegel bei der Meereisdickenbestimmung verwendet werden kann.

Institut für Küstenforschung, GKSS

http://www.gkss.de/institute/coastal_research

Die Forschungsaktivitäten erstrecken sich sowohl auf naturwissenschaftliche als auch auf gesellschaftliche Aspekte im regionalen und globalen Kontext. Aus Untersuchungen des aktuellen Zustands des Lebensraums Küste sowie seiner Empfindlichkeit gegenüber natürlichen und menschlichen Einflüssen werden Szenarien künftiger Optionen abgeleitet. Im Rahmen von CryoSat-2 besteht eine Zusammenarbeit mit dem DLR.

3.1 Förderung, logistische Ausstattung und Organisation deutscher Kryosphären-Forschung

Die Arbeiten deutscher Institute und Gruppen wurden bislang wesentlich durch das BMBF und die DFG gefördert.

Beim BMBF gibt es verschiedene Förderprogramme, die Projekte im Zusammenhang mit CryoSat-2 fördern könnten (<http://www.fz-juelich.de/ptj>). Das wesentliche Programm ist das Programm "Meeres- und Polarforschung, Geowissenschaften". Der Bereich "Polarforschung" umfasst naturwissenschaftliche Untersuchungen in den Polarregionen im Allgemeinen, wobei die Forschungsthemen im Polarforschungsprogramm des BMBF festgeschrieben sind. Dabei bilden Arbeiten zur Massenbilanz der Eisschilde und des Meereises einen wichtigen Schwerpunkt.

Der Bereich "Meeresforschung" umfasst Arbeiten für ein verbessertes Verständnis der Rolle der Ozeane im globalen Klimageschehen der "Jetztzeit" und in zurückliegenden Erdzeitaltern. Schwerpunkte bilden experimentelle ozeanographische Untersuchungen und Modellierungsarbeiten zur Beschreibung des gekoppelten Systems Ozean/Atmosphäre. CryoSat-2 liefert wichtige Beiträge zur meeresbezogenen Klimaforschung, da das Meereis ein integraler Bestandteil des Systems Ozean-Atmosphäre ist.

Das Sonderprogramm "Geotechnologien" untersucht die ablaufenden geologischen, physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse sowie die Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen Geosphäre, Kryo- und Hydrosphäre sowie Atmosphäre und Biosphäre. Ziel ist ein verbessertes Verständnis der Prozesse und Wechselwirkungen zur Abschätzung des anthropogenen Einflusses auf natürliche Gleichgewichte und Kreisläufe. Obwohl CryoSat-2 Beiträge zu mehreren dieser Punkte liefern kann, ist das Sonderprogramm bisher stark geodätisch/geophysikalisch ausgerichtet.

Ein weiteres Förderprogramm des BMBF ist "Forschung zum globalen Wandel". Hier gibt es die Bereiche "Klimaforschung" und "Großgeräte und Instrumente". In der "Klimaforschung" wird die Erforschung der maßgeblich klimarelevanten Prozesse gefördert. Dies sind Projekte auf den Gebieten Klimamodellierung, Paläoklimatologie, Klimavariabilität und -vorhersage. Bei "Großgeräte und Instrumente" werden Beiträge zu deren Entwicklung, Bereitstellung und Nutzung gefördert. In diesem Bereich taucht explizit die Nutzung von ENVISAT auf, so dass zukünftig auch die Nutzung von CryoSat-2 durch dieses Programm gefördert werden könnte.

Das BMBF fördert maßgeblich deutsche Großforschungseinrichtungen, die in der Hermann-von-Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren (HGF) zusammengefasst sind (<http://www.helmholtz.de>). Der HGF gehören unter anderem das AWI, das DLR, und das GFZ an. Bislang war es der HGF möglich, bestimmte Themen als HGF-Strategiefond-Projekte zu fördern, beispielsweise Projekte zur Nutzung von ENVISAT-Daten (ENVOG: ENVISAT Oceanography) und zu Meeresspiegelschwankungen (SEAL: Sea Level). Seit 2003 hat die HGF ein Helmholtz-Forschungsnetzwerk „Integriertes Erdbeobachtungssystem“ eingerichtet. Dieses soll durch Doktorandenprogramme und den Impuls- und Vernetzungsfond der HGF implementiert werden. Der Impuls- und Vernetzungsfond bietet beispielsweise die Möglichkeit, im Rahmen „virtueller Institute“ größere Forschungsprojekte zusammen mit Universitäten durchzuführen.

Die DFG (<http://www.dfg.de>) fördert grundsätzlich jedes Forschungsprojekt über das sogenannte "Normalverfahren". Darüberhinaus gibt es gesonderte Forschungsprogramme zu bestimmten Themen. Zur Förderung von Projekten mit Beteiligung verschiedener deutscher Institute eignen sich insbesondere sogenannte DFG-Schwerpunktprogramme. Seit Ende 2002 existiert das Schwerpunktprogramm "Antarktisforschung und vergleichende Studien in der Arktis", an dessen Schaffung das CryoSat-2-Projektbüro maßgeblich beteiligt war. Obwohl der Schwerpunkt auch geologische und biologische Fragestellungen mit einschließt, nehmen Untersuchungen zur Massenbilanz von Land- und Meereis und zum besseren Verständnis von Eis-Mikrowelleneigenschaften breiten Raum ein. Da das Antarktisprogramm bereits seit 2003 Arbeiten unterstützt, ermöglicht es bereits heute vorbereitende Studien zu CryoSat-2.

Außerdem wurde im April 2005 der DFG-Schwerpunkt "Massentransporte und Massenverteilung im System Erde" (<http://www.massentransporte.de>) eingerichtet (siehe Abschn. 4.5). In diesem Schwerpunkt sollen Untersuchungen zu Massenveränderungen mit Hilfe der geodätischen Satelliten CHAMP, GRACE und GOCE sowie der Radaraltimetermissionen ENVISAT und CryoSat-2 gefördert werden. Die Koordinierung des Schwerpunktprogrammes wird von Prof. Dr. K.H. Ilk am Institut für theoretische Geodäsie (<mailto:ilk@geod.uni-bonn.de>) sowie von Dr. J. Flury am Institut für astronomische und physikalische Geodäsie in München durchgeführt (<mailto:flury@bv.tum.de>).

Neben der nationalen Förderung besteht in zunehmendem Maße die Möglichkeit, internationale Projekte bei der EU zu fördern. Die Schwerpunkte der weitgefassten Förderprogramme ändern sich regelmäßig, aber unter verschiedenen Aspekten wie der Untersuchung des Systems Ozean-Eis-Atmosphäre werden auch Projekte zur Eis-Massenbilanz gefördert.

Das Alfred-Wegener-Institut hat als Großforschungseinrichtung unter anderem die Aufgabe, Logistik in Form von Geräten und Expeditionsunterstützung für sämtliche deutsche

Einrichtungen zur Verfügung zu stellen. Zu dieser Logistik gehören insbesondere der Forschungseisbrecher Polarstern sowie die Neumayer Station in der Antarktis. Diese Plattformen bieten auch für Aktivitäten im Zusammenhang mit CryoSat-2-Forschung einmalige Möglichkeiten, die deutsche Wissenschaftler gegenüber denen aus anderen Ländern privilegieren. Der Betrieb von Polarstern und Neumayer stellt einen nicht zu unterschätzenden Eigenbeitrag des AWI zur CryoSat-2-Forschung dar, und erspart auch anderen deutschen Wissenschaftlern große finanzielle Belastungen.

Während viele Disziplinen in eigenen wissenschaftlichen Vereinigungen organisiert sind (z.B. Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, Deutsche Geodätische Gesellschaft), stellt die Deutsche Gesellschaft für Polarforschung (<http://www.dgp-ev.de>) eine übergeordnete, interdisziplinäre Institution dar, in der polare Fragen diskutiert und definiert werden. Hier ist insbesondere der Arbeitskreis Glaziologie hervorzuheben, in dem auch Fragen zur Eis-Massenbilanz diskutiert werden, und wo neue Perspektiven definiert werden. Die meisten der potenziellen deutschen CryoSat-2-Nutzer sind Mitglied in dieser Gesellschaft.

4. CryoSat-2-Fragestellungen deutscher Institute

Deutsche Wissenschaftler arbeiten maßgeblich an den Fragestellungen, die in den großen internationalen Programmen definiert werden (Abschn. 2.6). CryoSat-2 wird insbesondere zur Verbesserung des Verständnisses der Rolle der Kryosphäre im Klimasystem beitragen. Dabei stehen die Fragen im Vordergrund, ob das Eis auf der Erde zu- oder abnimmt, wie diese Veränderungen zeitlich ablaufen, und ob es regionale Unterschiede gibt. Bevor diese Fragen jedoch beantwortet werden können, muss die Genauigkeit der CryoSat-2-Messungen untersucht werden, die angesichts der neuartigen Technologie und Anwendung noch sehr unsicher ist. Deshalb wird ein wesentlicher Beitrag deutscher Nutzer in der Validierung der CryoSat-2-Messungen und Verbesserung ihres Verständnisses liegen.

4.1 Deutsche AO Projekte

Um an den im Folgenden dargestellten Fragestellungen arbeiten zu können, haben sich deutsche Wissenschaftler bereits sowohl beim Cal/Val-AO als auch bei den beiden ersten Daten AO engagiert und Projektvorschläge zur Nutzung der Daten eingereicht. AWI und TU Dresden sind deshalb Mitglieder und PIs im CryoSat-2 Cal-Val-Team (CVT) der ESA (Abschn. 4.2). Proposals zu den beiden ersten Daten-AO im März 2004 bzw. März 2009, die Prozessstudien und Modellentwicklungen unterstützen sollen, wurden von folgenden 20 Wissenschaftlern eingereicht (Tabelle 1). Alle diese Projekte wurden von der ESA für wichtig und durchführbar beurteilt, so dass den beteiligten Wissenschaftlern sämtliche erforderlichen CryoSat-2-Daten zur Verfügung gestellt werden.

Tabelle 1: CryoSat-2-Daten-AO Projekte aus Deutschland

Titel	Name	Beteiligte Institute
1 Combining CryoSat and Classical Altimeter Systems to Obtain a Consistent Geocentric Reference and to Improve the Southern Hemisphere Mean Sea Level and Marine Geoid	Bosch, W.	DGFI München
2 Elevation change and melt water production of Pamir glaciers, Central Asia	Braun, L C. Mayer M. Weber M. Siebers W. Hagg T. Ellenrieder	Kommission f. Glaziologie München
3 Using CryoSat sea-ice thickness data for validation of and assimilation into sea ice models	Haas, C. S. Danilov W. Dierking R. Gerdes M. Karcher F. Kauker P. Lemke J. Lieser J. Schroeter R. Timmermann	AWI
4 Dynamics and Mass Balance of Eastern Weddell Sea Ice Sheet/Ice Shelf Systems	Lange, M.A. C. Oelke E. Isaksson V. Pohjola	IfG Münster, Norsk Polar Institut Tromsø (Norwegen), Uni Uppsala (Schweden),
5 Variations of Ice Shelves and Sea Level Contributions of Glaciers at the East Coast of the Antarctic Peninsula	Rott, W. W. Rack H. Sandhaeger	IGM Innsbruck, AWI
6 Quantification of Sea Level Changes in High Latitudes with an Improved Sea Surface Height Determination Scheme	Schöne, T. S. Esselborn V. Seufer F. Flechtner	GFZ
7 TWAIN - Cryosa(t) (Wa)ve and W(i)nd Measureme(n)ts	Schulz-Stellenfleth, J. C. Leuschen J. Horstmann S. Lehner C. Gommenginger B. Chapron	DLR, J. Hopkins Univ./APL (USA), GKSS, Univ. Miami (USA), SOC Southhampton (UK), IFREMER (Frankreich),
8 Observing the Hydrological Cycle of the European North Sea using CryoSat	Stammer, D. S. Kern G. Heygster	IfM Hamburg, IUP Bremen
9 Evaluating CryoSat's potential contribution to the quantification of mass balance and mass balance variations on the Antarctic Peninsula	Vogt, S. H. Gossmann M. Braun M.A. Lange	IPG Freiburg, ZFL Bonn, IfG Münster
10 Sea ice thickness combined retrieval from CryoSat and SMOS	Kaleschke, L. Spreen, G. Kern, S.	IfM Hamburg
11 Coastal Sea Level Change	Luciana, F.M. Becker, M.	TU Darmstadt

Titel	Name	Beteiligte Institute
12 Ice mass distribution and ice mass change from CryoSat2, GRACE and GOCE observations	Flury, J. Soergel, U. Mueller, J.	Uni Hannover
13 Estimating the mass loss of the Filcher-Ronne Ice Shelf due to iceberg calving in the Weddell Sea	Wesche, C. Dierking, W. Hellmer, H.	AWI
14 Temporal variation of the Juneau Icefield from CryoSat-2 and terrestrial geodetic observations	Becker, M. Wunderlich, T. Stempfhuber, W. V. Heunecke, O.	TU Darmstadt Uni München ETH Zürich BW Uni München
15 Temporal and spatial change of the mass balance in the western boundary region of the greenland ice sheets.	Rawiel, P. Stober, M.	Uni Stuttgart
16 Elevation change and mass balance at the Greenland Ice Sheet margin	Mayer, C. Boegbild, C.E.	BADW, München GEUS, Dänemark
17 Multi-Mission Cross-Calibration of CryoSat and Contemporary Altimeter	Bosch, W.	DGFI, München
18 ISOCRYO - Ice Sheet Observation with CRYOsat - signal generation and interpretation	Heygster, G. Enomoto, H. Greve, R. Kern, S. Rinke, A. Rott, H.	Uni Bremen Kitami I. of T., Kitami (Japan) Hokkaido Univ., Sapporo (Japan) IfM Hamburg AWI Potsdam Inst. of Meteorology and Geophysics, Innsbruck (Österreich)
20 Using CryoSat sea-ice thickness data for validation of and assimilation into sea ice models	Haas, C. Danilov, S. Dierking, W. Gerdes, R. Karcher, M. Kauker, F. Lemke, P. Schröter, J. Timmermann, R.	Univ. Alberta, Edmonton, Kanada AWI
21 Validation of CryoSat sea ice thickness, freeboard, and sea surface height retrievals - Part 1	Haas, C. Dierking, W. Lemke, P. Schenke, H. W. Schröter, J. Dietrich, R. Shum, C. K.	Univ. Alberta, Edmonton, Kanada AWI TU-Dresden Ohio State Univ. (USA)
22 Validation of CryoSat derived land ice and ice shelf surface topography, snow pack properties, and their temporal and spatial variability.	Miller, H. Dietrich, R. Shum, C. K. Braun, M. Nixdorf, U. Rack, W. Schenke, W.	AWI TU-Dresden Ohio State Univ. (USA) Uni Bonn AWI

4.2 Kalibrierung/Validierung

Wissenschaftler vom AWI und der TU Dresden gehören zum CryoSat-2-Cal/Val-Team (Tabelle 1, Proposals 21 und 22) und haben dort nicht zuletzt aufgrund der hervorragenden logistischen Randbedingungen Schlüsselrollen inne. Dies betrifft sowohl Messungen über Landeis als auch über Meereis/Ozean. Mit der Aufnahme der PIs (Principal Investigators) in das ESA-Cal/Val-Team ist eine enge Einbindung dieser Wissenschaftler in die Mission sichergestellt.

Der ständig aktualisierte Cal/Val-Plan der ESA sieht die Fortsetzung der seit 2003 bis 2008/2009 durchgeführten CryoVEx Messkampagnen vor, die zu einer Verbesserung des Verständnisses der Radaraltimeterdaten über Eis beigetragen haben, und die eine Verbesserung der bislang eingesetzten Validierungsmessungen herbeiführen werden. Bei den seit 2003 durchgeführten Messungen kamen u. A. die Polarstern, AWI-Polarflugzeugen POLAR 4 und POLAR 5 sowie Hubschrauber zum Einsatz.

Die Mehrzahl der Cal/Val-Projekte wird im Wesentlichen auf Level-2-Daten zurückgreifen. Gerade zur Untersuchung des Eindringverhaltens der Radaraltimetersignale in den Schnee werden von einigen Nutzern, wie dem AWI, auch Level-1b-Daten benötigt.

Zur Validierung von CryoSat-2-Messungen spielen auch zusätzliche Satellitendaten von anderen Sensoren eine wichtige Rolle. Insbesondere mit Hilfe von SAR und Scatterometern lassen sich die geometrische Rauigkeit und Rückstreuungseigenschaften der Eisoberfläche und ihre zeitliche Veränderung, z.B. aufgrund sommerlichen Schmelzens beobachten. Diese abbildenden Satellitendaten können auch dazu dienen, die Ergebnisse der Feldmessungen auf größere Gebiete zu interpolieren. Radar- und Laseraltimetermessungen von ENVISAT und ICESat sollten zu gemeinsamen Vergleichen der bestimmten Oberflächenhöhen herangezogen werden.

Im Zeitraum vom 1.7.2005 bis 31.09.2009 führte das AWI und die TU Dresden ein vom DLR gefördertes Validierungsprojekt durch, das die Beteiligung an und die wissenschaftliche Auswertung der in der Vorbereitungsphase der Mission durchgeführten CryoVEx Validierungsmessungen zum Ziel hatte. Dieses Validierungsprojekt soll nun in einem Fortsetzungsprojekt fortgeführt werden, unter Hinzunahme von CryoSat-Missionsdaten.

4.2.1 Landeis

Bei der Validierung von Landeismessungen geht es im Wesentlichen um zwei verschiedene Fragestellungen: Einerseits bieten bereits vorhandene bzw. im Rahmen der Mission noch durchzuführende hochpräzise geodätische Messungen die Möglichkeit, CryoSat-2-Höhen- und Neigungsmessungen direkt mit der Realität zu vergleichen. Aus diesen Messungen können auch die Grenzen von CryoSat-2 bezüglich Geländeneigung und räumlichem Auflösungsvermögen bestimmt werden. Andererseits bestimmen verschiedene Schnee- und Eiseigenschaften wie Feuchte, Dichte, Korngröße, Schichtung oder Rauigkeit das Eindringverhalten der Radarwellen in die Oberfläche. Ein wichtiges Ziel von Validierungsmessungen ist deshalb auch, diese Unterschiede zu identifizieren und ihre Bedeutung für die Genauigkeit der Höhenmessung zu quantifizieren.

Die Schwerpunkte deutscher Aktivitäten werden sich auf verschiedene Eisregime mit klar unterschiedlichen Schneeeigenschaften und Morphologie konzentrieren:

Das Ekström-Schelfeis und das Amundsenisen sind zwei grundsätzlich unterschiedliche Eisregime, da ersteres ein Schelfeis mit teilweise oberflächenschmelzen repräsentiert, während das Amundsenisen ein Beispiel für ein kaltes Hochplateau darstellt. Das Gebiet der Schirmacheroase stellt einen typischen Eisrandfall dar, der als Beispiel für einen großen Teil des Eisrandes der Antarktis dienen kann. Im Hinterland der Oase gibt es unter anderem Blaeisfelder, die sich in ihrem Rückstreuverhalten von normalen Firngebietern deutlich unterscheiden. Eisdicken, Schelfeiszeiten und die Untergrundtopographie sind aus früheren

Messungen bereits gut bekannt. Bereits beobachtete Langzeittrends können mit CryoSat-2-Daten weiter beobachtet werden.

Aufgrund der Nähe zu Forschungsstationen werden die Gebiete auch während der CryoSat-2-Mission besucht und bieten hervorragende Möglichkeiten zur Validierung. Von den Stationen aus werden Bodenradar- und kinematische GPS-Messungen durchgeführt, und mit Flugzeugen werden Laser- und Eisradarmessungen der Eisoberfläche und -dicke vorgenommen. Mit Radar-Transpondern soll das Eindringverhalten der Radarwellen in den Firn untersucht werden. Außerdem wird das „Airborne Synthetic-Aperture Interferometric Radar System“ (ASIRAS) an einem der AWI-Polarflugzeuge montiert, welches von der ESA speziell zur Validierung und Vorerkundung des SIRAL in Auftrag gegeben wurde.

Alle Messungen sollen auch über dem grönländischen Eisschild bzw. bei Devon-Insel (Kanada) durchgeführt werden.

In den Jahren 2003 bis 2008/2009 wurden bereits sieben internationale Pre-Launch Messkampagnen über Spitzbergen, Devon Island, Grönland und in der Antarktis durchgeführt. Dabei untersuchten Gruppen am Boden die Schnee- und Eiseigenschaften und stellten Radar-Reflektoren auf, die dann von einem Polarflugzeug des AWI bzw. des Danish National Space Centers (DNSC) mit ASIRAS und einem Laseraltimeter überflogen wurden. Somit konnten wichtige Daten gesammelt werden, die bereits vor dem Start des Satelliten die Möglichkeit bieten, die erwarteten Signaleigenschaften zu untersuchen und Auswerteverfahren zu entwickeln, sowie die Genauigkeit der zukünftigen CryoSat-2-Messungen abzuschätzen.

4.2.2 Meereis

Wie beim Landeis müssen die erforderlichen Arbeiten sowohl eine Überprüfung der CryoSat-2-Dickenbestimmung beinhalten, als auch eine Untersuchung der verschiedenen Eiseigenschaften und ihrer Rolle für diese Dickenbestimmung. Nur so können die Fehler der CryoSat-2-Messungen abgeschätzt und verstanden werden.

Zur Validierung der CryoSat-2-Messungen stehen flugzeug- und hubschraubergetragene Laser- und Radarsysteme zur Verfügung, die entweder von Eisbrechern oder von Land aus (z.B. Spitzbergen oder Grönland) eingesetzt wurden und künftig eingesetzt werden sollen. Mit Hilfe von hochauflösenden hubschraubergestützten Eisdickenmessungen sollen die Beziehungen zwischen Eisfreibord bzw. Oberflächenrauigkeit/Presseisrückenstatistik und Eisdicke hergestellt werden. Die Messungen werden mit zeitgleichen Überflügen von CryoSat-2 und ASIRAS koordiniert. Bei Schiffsexpeditionen werden außerdem umfangreiche Untersuchungen der physikalischen Eiseigenschaften sowie der Schmelztümpelbedeckung und Schollengrößenverteilung vorgenommen. Das Gebiet nördlich von Grönland und Ellesmere Island (Kanada) wurde aus logistischen Gründen und aufgrund des dicken, mehrjährigen Eises als Zielregion für Validierungsmessungen identifiziert. In der Antarktis wird eine Polarstern-Winterexpedition ins Weddellmeer geplant, die aber aufgrund logistischer Beschränkungen frühestens 2010 stattfinden kann. Diese Expedition ist bislang international die einzige geplante Messkampagne für Meereismessungen in der Antarktis.

Bereits in den Jahren zwischen 2003 und 2008/2009 wurden mehrere Pre-Launch-Messkampagnen mit Polarstern in der Framstraße bzw. mit den Polarflugzeugen des AWI und DNSC nördlich von Ellesmere Island bzw. im Botnischen Meerbusen durchgeführt. Dabei wurden vom AWI hubschraubergestützte Eisdickenmessungen entlang der selben Profile durchgeführt, die auch durch flugzeuggestützte Laser-Eisfreibord- und ASIRAS-Messungen untersucht wurden. Dadurch ergab sich die Möglichkeit, das Konzept der zeit- und ortsgleichen Validierungsmessungen unter CryoSat-2 zu beurteilen und zu verbessern, sowie Zusammenhänge zwischen der Eisdicke und dem von CryoSat-2 gemessenen Freibord zu untersuchen. Mehr Informationen dazu befinden sich auf den Meereis-Internetseiten des AWI (<http://www.awi-bremerhaven.de/Modelling/SEAICE>). Den Kern der zukünftigen

Validierungsarbeiten werden kombinierte ASIRAS- und EM-Messungen des AWI nördlich von Ellesmere Island sein.

4.2.3 Ozean

Beim Betrieb des SIRAL über Landeis im interferometrischen Mode ist die genaue Kenntnis der Basislinien- Orientierung von größter Bedeutung. Diese kann nur über offenen Ozeanen überprüft werden, wenn die Höhe und Neigung der Oberfläche genau genug bekannt ist. Ein solches Gebiet, das auch zur Kalibrierung anderer Radaraltimeter-Satellitenmissionen dient, befindet sich in der südlichen Ostsee. Aufgrund der Verfügbarkeit mehrerer Pegelstationen und des Vergleichs mit anderen Satellitenmessungen (Topex-Poseidon, ENVISAT, Jason) bietet sich eine Kalibrierung des SIRAL gerade dort an und wird von der TU Dresden durchgeführt werden.

4.3 Prozessstudien

Mit Prozessstudien sind Arbeiten gemeint, die mit Hilfe validierter CryoSat-2-Daten mesoskalige geophysikalische Prozesse im Klimasystem und in der Kryosphäre untersuchen. Dies bedeutet, dass im Wesentlichen Level-2-Produkte benutzt werden.

Zu den Prozessstudien gehört auch die statistische Auswertung des gesamten Datensatzes der CryoSat-2-Ära, um die langzeitlichen Veränderungen der Eisdicken beobachten zu können. Dabei muss auch die zeitliche und regionale Variabilität bestimmt werden.

4.3.1 Landeis

Ein wesentlicher Prozess ist die Veränderung von Gletscherfließgeschwindigkeiten aufgrund von Änderungen im Eis-Massenhaushalt. Fließgeschwindigkeiten von Gletschern, Eisströmen und Schelfeisen lassen sich aus der SAR-Interferometrie ableiten. Durch zusätzliche Verwendung von CryoSat-2-Daten kann man das Freibord des Schelfeises bestimmen und daraus bessere Abschätzungen der Abschmelzraten an der Aufsetzlinie erhalten. Eine bestmögliche Bestimmung der Massenbilanz ergibt sich aus einer Kombination von Radaraltimetrie, interferometrischen SAR-Daten und flugzeuggetragenen Laseraltimetern.

Verschiedene Fließregime wirken sich in verschiedenen Radarsignaturen aus, die als Gletscherfazies bezeichnet werden. Diese Fazies bilden sich sowohl in SAR als auch in Radaraltimeterdaten unterschiedlich ab. Durch Laser-Rauigkeitsmessungen können Randbedingung für Streumodelle gewonnen werden, mit denen die Satellitendaten simuliert werden können. Somit wird es möglich, verschiedenen Gletscherfazies verschiedene quantitative Oberflächeneigenschaften zuzuweisen.

4.3.2 Meereis

Die Dynamik des Meereises, d.h. die Reaktion auf veränderliche Windrichtungen und -geschwindigkeiten, ist wesentlich von der Rheologie des Eises abhängig. Diese drückt sich in der Verteilung und Veränderung der Eisdickenverteilung aus. CryoSat-2 bietet die Möglichkeit, die saisonale Entwicklung der Eisdickenverteilung in bestimmten Regionen zu beobachten und mit den meteorologischen und ozeanischen Randbedingungen in Beziehung zu setzen. Dadurch lässt sich die Rheologie in numerischen Meereismodellen besser beschreiben.

Die Meereisoberfläche ist starken saisonalen Veränderungen unterworfen, die sich deutlich in den Mikrowelleneigenschaften widerspiegeln. Es soll untersucht werden, wie diese Veränderungen auch die Radaraltimetersignaturen beeinflussen. Daraus lassen sich dann beispielsweise Aussagen über den Beginn und das Ende der Schmelzsaison in sämtlichen meereisbedeckten Gebieten treffen, oder Gebiete einjährigen und mehrjährigen Eises unterscheiden.

4.4 Land- und Meereismodellierung

Modellierer gehören zu den Endnutzern von CryoSat-2-Daten, da sie die Daten als Eingangsbedingung für den Betrieb ihrer Modelle nutzen möchten, ohne sich über deren Entstehung Gedanken machen zu müssen. In sofern werden die Daten, insbesondere digitale Höhenmodelle, wie andere Antriebsdaten genutzt, beispielsweise wie solche der meteorologischen Bedingungen. Es ist zu beachten, dass Landeis- und Meereismodellierung auf grundsätzlich anderen Zeitskalen arbeiten. Für die Landeismodellierung sind Skalen von Jahrzehnten bis Jahrhunderten oder Jahrtausenden relevant, während die Meereismodellierung Zeitskalen von Tagen, Wochen oder Monaten betrachtet. Wenn man die Zeitskala der CryoSat-2-Mission von monatlichen globalen Messungen über drei Jahre damit vergleicht, wird deutlich, dass beide Bereiche unterschiedlich von der Mission profitieren können. Für die Meereismodellierung kommt sogar eine wöchentliche oder monatliche Assimilation der Eisdickenfelder in Frage.

Für die Modelle werden Level-2- und Level-3-Daten benötigt. Erstere liegen nur entlang der Satellitenspur vor und müssen deshalb zur Erzeugung von Eishöhen- oder Eisdickenkarten mit speziell angepassten geostatistischen Methoden auf ein Raster interpoliert werden. Diese Level-3-Datenerzeugung wird zum größten Teil bei den Modellierern selbst liegen, was je nach Gebiet sehr große Sorgfalt und Aufwand erfordert.

4.4.1 Landeis

Computermodelle der Eisschilde und Schelfeise sind auf genaue Höhenmodelle der Eisoberfläche (und des Felsbettes) angewiesen, um die Kräftebilanzen und Eisdynamik berechnen zu können. CryoSat-2 wird zu einer wesentlichen Verbesserung der räumlichen Auflösung digitaler Höhenmodelle führen. Dadurch wird insbesondere die Modellierung von Zonen verbessert, die kritisch für die Eisdynamik sind. Dazu gehören Eiskliffs, Eisströme, die Aufsetzlinie sowie Gebiete mit steiler Geländeneigung, im Wesentlichen die Randgebiete der Eisschilde. CryoSat-2 wird außerdem erstmalig großräumige Daten südlich von 81.5°S liefern, von wo es bislang keine Satellitendaten gibt. Über Schelfeisen lässt sich mit Hilfe von CryoSat-2 auch die Eisdicke bestimmen, wenn die Dichte des Eises sowie das Geoid bekannt ist. Die Aufsetzlinie lässt sich unter Umständen sehr genau aufgrund der Beobachtung gezeitenbedingter Veränderungen ableiten.

4.4.2 Meereis

Die Assimilation von Radaraltimeterdaten der Meeresoberflächentopographie in Ozeanmodelle wird seit einigen Jahren erfolgreich durchgeführt. CryoSat-2 wird erstmalig auch die Assimilation von Eisdicken ermöglichen. Dadurch wird es zu einer deutlichen Modellverbesserung und zu einem besseren Verständnis der Rheologie und Eisdynamik kommen. CryoSat-2-Daten sind außerdem für den Betrieb von Vorhersagemodellen und zur Abschätzung des Süßwasserhaushaltes nötig, beispielsweise in der Framstraße oder im Weddellmeer. Für die Assimilation ist die Angabe der Messwertgüte und der Oberflächeneigenschaften von großer Bedeutung, um die Daten entsprechend gewichten zu können. Die angebrachten Korrekturen (Tide, Feuchte der Atmosphäre) müssen gut dokumentiert sein. Für eine sinnvolle Assimilation sind Daten in mindestens monatlicher Auflösung erforderlich, sowie eine genaue Ortsangabe der einzelnen Messungen zur Vermeidung von räumlichem Aliasing. Es ist außerdem zu bedenken, dass durch eine Verbesserung der Datengenauigkeit, beispielsweise durch Tiefpassfilterung, die räumliche Auflösung reduziert wird.

4.5 Meeresspiegel und Geodäsie

Die Veränderungen des Meeresspiegels und die Interpretation von Höhenänderungen der Eisoberfläche hängen stark von der Kenntnis der Veränderungen des Felsuntergrundes ab, beispielsweise aufgrund postglazialer isostatischer Hebung, deren Größenordnung durchaus im Bereich der zu erwartenden Oberflächenhöhenänderungen liegen kann. Veränderungen des Felsuntergrundes lassen sich aufgrund der assoziierten Änderungen des Schwerefeldes mit modernen Schwerefeld-Satellitenmissionen (CHAMP, GRACE, GOCE) nachweisen. Diese Daten sowie Langzeitmessungen der Oberflächenhöhen an eisfreien Felsinseln müssen mit in die CryoSat-2-Dateninterpretation einfließen.

Die Bestimmung der Meeresoberflächentopographie in eisbedeckten Ozeangebieten stellt mit herkömmlichen Radaraltimetern aufgrund der schwierigen Unterscheidung zwischen Eis und Wasser ein großes Problem dar, so dass sie in großen Teilen der Arktis und Antarktis immer noch unbekannt ist. Dies gilt insbesondere für die kurzwelligen Anteile, die auch durch CHAMP, GRACE oder GOCE nicht auflösbar sind. Mit CryoSat-2 sollen wesentlich genauere Meeresoberflächenhöhen in eisbedeckten Ozeangebieten bestimmt werden.

Die Dicke des Meereises hängt von der Ozeanzirkulation ab. Insbesondere in der Arktis führen veränderte Zirkulationsregime zu Änderungen in der Meereshöhe, die zu Änderungen des Schwerefeldes führen. Durch Kombination von CryoSat-2 und GOCE bzw. GRACE ist deshalb der Zusammenhang zwischen Eisdickenänderungen und Schwerefeldänderungen zu klären.

In Erkenntnis des engen Zusammenhanges zwischen Eismassenbilanz und Erdschwerefeld wurde im April 2005 ein Schwerpunktprogramm „Massentransporte und Massenverteilung im System Erde“ von der DFG eingerichtet, das gemeinsam von den deutschen CryoSat-2- und GOCE-Projektbüros beantragt wurde (siehe 3.1). Im Vorfeld des Antrags gab es zahlreiche Treffen und Workshops unter Beteiligung beider Gruppen. Das Ergebnis der Vorbereitungen und Grundlage des Antrags bildet die Programmschrift „Mass Transport and Mass Distribution in the Earth System – Contribution of the New Generation of Satellite Gravity and Altimetry Missions to Geosciences“, die die zugrunde liegenden gemeinsamen CryoSat-2 und CHAMP/GRACE/GOCE Fragestellungen ausführlich darlegt. Dies kommt insbesondere im Kapitel „Ice mass balance and sea level“ zum Ausdruck. Die Programmschrift ist auf den Internetseiten des GOCE-Projektbüros erhältlich (<http://www.goce-projektbuero.de>), aber auch von der CryoSat Seite (<http://www.cryosat.de>) herunterladbar.

4.6 Anforderungen der deutschen Nutzer an Datenprodukte und Missionsführung

Die deutschen Nutzer werden durch die von der ESA geplante Missionsführung befriedigend bedient. Alle Arbeiten werden mit den geplanten Level-1b- und Level-2-Daten durchführbar sein. Für Cal/Val-Aktivitäten ist eine Anpassung der Orbits an die Messgebiete wünschenswert. Dies trifft insbesondere auf die örtlich begrenzten Gebiete an der Antarktischen Halbinsel zu, beispielsweise den Gletschern auf King George Island. Im Gebiet der Schirmacheroase sowie auf dem Ekströmschelfeis oder Amundsenisen können die Validierungsmessungen innerhalb gewisser Grenzen an die Orbitgeometrie angepasst werden. Eine besondere Anforderung stellen jedoch die Kalibrierungsmessungen der Interferometer-Basislinie dar (Abschn. 4.2.3), da es dazu unbedingt erforderlich ist, dass das SIRAL über dem Messgebiet der südlichen Ostsee im interferometrischen Mode betrieben wird. Da deutsche Wissenschaftler jedoch eine Schlüsselrolle bei der Durchführung von Validierungsmessungen spielen, ist es im Interesse der ESA, deren Anforderungen zu erfüllen. Es gibt deshalb keinen Grund zu befürchten, dass die deutschen Nutzeranforderungen nicht erfüllt werden.

5. Beiträge deutscher Gruppen zu den wesentlichen Fragen und notwendige Maßnahmen, um diese in Erscheinung treten zu lassen

Wesentliches Ziel der Glaziologie und Klimaforschung, wie es auch in den großen internationalen und nationalen Forschungsprogrammen definiert ist (Abschn. 2.6, 3.1), ist die Untersuchung der Massenbilanz des Landeises und Meereises, um die Rolle der Kryosphäre im Klimasystem besser verstehen zu können, und mögliche Veränderungen zu identifizieren. Insbesondere mit Hilfe numerischer (Klima-) Modelle, die die wesentlichen Kryosphärenprozesse repräsentieren, wird versucht, diese Ziele zu erreichen.

CryoSat-2 wird insbesondere dazu beitragen, die Datengrundlage zur Erreichung der oben genannten Ziele deutlich zu verbessern. Schließlich existieren bislang keine systematischen und flächendeckenden Eisdickendaten. Die wesentlichen Aufgaben der CryoSat-2-Mission sind die Beobachtung von Eisdickenänderungen und die Verbesserung ihres Verständnisses. Zur Erreichung dieses Ziels ist jedoch die Beurteilung der bislang unbekanntem Genauigkeit der Messungen dringlichste Aufgabe.

Deutsche Wissenschaftler können sowohl bei der Beurteilung der Datenqualität als auch bei der Nutzung der Daten in Modellen eine führende Rolle einnehmen. Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, werden deutsche Wissenschaftler wesentliche Aufgaben im Cal/Val-Team übernehmen. In Deutschland werden darüber hinaus führende Modelle der Eisschilde und Schelfeise sowie des Meereises betrieben. Die Randbedingungen zum Betrieb dieser Modelle sowie die Datengrundlage zur Beurteilung der Modellergebnisse werden sich mit CryoSat-2 wesentlich verbessern.

Die Nutzung der CryoSat-2-Mission in Deutschland sollte so effektiv wie möglich gestaltet werden. Außerdem sollen sich die Arbeiten einzelner Gruppen ergänzen und voneinander profitieren. Deshalb ist es unerlässlich, dass die Aktivitäten deutscher Gruppen koordiniert werden und sich einzelne Gruppen bilden, die enger an bestimmten Themen zusammenarbeiten. Gerade im Verlauf der Mission werden sich neue Perspektiven ergeben, die erst nach ersten Erfahrungen mit den neuartigen Daten offenbar werden. Deshalb ist ein regelmäßiger Austausch zwischen verschiedenen Gruppen erforderlich.

Mit der Aufnahme deutscher Wissenschaftler in das CryoSat-2 Cal/Val-Team der ESA wurden die Beiträge deutscher Gruppen international gewürdigt. Gerade diese Arbeiten sind jedoch aufgrund der logistischen Erschwernisse von Feldarbeiten in den Polargebieten besonders kostenintensiv. Es ist noch nicht sichergestellt, dass die Eigenmittel der Institute ausreichen, um den internationalen und eigenen Erwartungen gerecht zu werden.

Um diesen Defiziten zu begegnen, wurden bereits erste Schritte eingeleitet, Fördermöglichkeiten für CryoSat-2-Forschung zu schaffen. Diese betrifft insbesondere die Beantragung bestimmter DFG-Schwerpunktprogramme, die in Abschnitt 3.1 beschrieben sind.

Darüber hinaus sollte auch in den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Schwerpunkten des BMBF Möglichkeiten gesucht werden, Ergebnisse aus der CryoSat-2-Mission für die Beantwortung der in den Schwerpunkten beschriebenen Fragen zu nutzen. Das vorliegende Nutzungskonzept stellt die übergreifenden Fragen insbesondere im Zusammenhang der Klimaforschung dar, die innerhalb dieser Schwerpunkte mit CryoSat-2 beantwortet werden können. Gerade BMBF-Projekte ermöglichen die Einrichtung von Forschungsverbänden mehrerer Institute.

Damit CryoSat-2-Daten weite Anwendung finden, müssen allerdings auch Möglichkeiten geschaffen werden, um mögliche End-Nutzer von der Qualität und dem Inhaltsgehalt der neuartigen Daten zu überzeugen. Hierbei hat insbesondere die Förderung von Kalibrierungs- und Validierungsarbeiten eine besondere Bedeutung, auch wenn derartige Projekte mit den übergeordneten Fragen nicht unbedingt in direktem Zusammenhang stehen.

6. Zeitplan

Der CryoSat-2-Start ist für den 25.02.2010 geplant. Der konsolidierte Cal/Val-Plan der ESA sieht ab Mai 2010 bis 2013 die Fortsetzung der CryoVEx-Kampagnen in der Arktis bzw. Antarktis vor, bei denen Bodenmessungen, flugzeuggestützte EM-Eisdicken, ASIRAS bzw. Laseraltimetermessungen durchgeführt werden sollen (Abschn. 4.2.2). Die Arbeiten des deutschen CAL/VAL Teams des AWI und der TU-Dresden werden voraussichtlich im australen Sommer 2010/2011 im Bereich der Schirmacheroase eine CryoVEx-Kampagne durchführen. Dabei sollen GPS-Bodenmessungen in Kombination mit flugzeuggestützten ASIRAS und Laseraltimetermessungen über dem Blaueisgebiet koordiniert durchgeführt werden. Das AWI wird darüberhinaus in den Jahren 2011 – 2013 an den internationalen CryoVEx-Kampagnen in der Arktis maßgeblich mit flugzeuggestützten EM-Bird, Laseraltimeter- und ASIRAS-Messungen beteiligt sein und damit einen wichtigen Anteil am Erfolg der Cal/Val-Aktivitäten der ESA beitragen. Insbesondere zur Integration der verschiedenen Messungen bestand und besteht ein sofortiger Bedarf an Wissenschaftlern, die die Daten zusammenführen können. Seit Juli 2005 bis September 2009 wurden diese Aufgaben im Pre-Launch CryoVEx Cal/Val-Plan der ESA durch ein vom DLR gefördertes Validierungsprojekt am AWI und der TU-Dresden unterstützt. Trotz des CryoSat-Absturzes 2005 wurde dieses Validierungsprojekt sowie eingeschränkte CryoVEx-Kampagnen in den Jahren 2005, 2006, 2007, 2008 fortgesetzt und September 2009 erfolgreich abgeschlossen. Ein Folgeprojekt soll die Weiterführung der deutschen Cal/Val-Aktivitäten in den Jahren Mai 2010 bis Oktober 2013 sichern. Dieses wird wiederum vom DLR gefördert und beinhaltet die Finanzierung von Wissenschaftlern an der TU-Dresden und am AWI die aktiv in enger Kooperation mit der ESA und internationalen Forschergruppen die Validierungsmessungen zu Boden und aus der Luft durchführen werden und insbesondere die Messungen von ASIRAS und CryoSat-2 nutzen werden, um die Wechselwirkungen zwischen Schnee und Ku-Band-Radarwellen zu untersuchen. Außerdem sollen die bislang erhobenen Messreihen fortgeführt werden, um die jährliche Akkumulation entlang der wesentlichen Validierungsprofile in Grönland und auf Austfonna und Devon zu bestimmen.

Die Arbeit des CryoSat-2-Projektbüros in Bremerhaven wird seit Mitte 2006 mit reduziertem Umfang bis zum Ende der Commissioning-Phase (Herbst 2010) fortgeführt, da die vorbereitenden Arbeiten an den einzelnen Instituten bis zu diesem Zeitpunkt andauern werden und koordiniert werden müssen. Die Koordinierung nationaler CryoSat-2-Aktivitäten sollte aber auch darüber hinaus weitergeführt werden.

Mit Beginn der Mission werden die Validierungsarbeiten intensiviert. Hier besteht großer zusätzlicher Personalbedarf, da die mehrfachen, langen und aufwendigen Reisen in die Polargebiete nicht von dem kleinen vorhandenen Mitarbeiterbestand allein durchgeführt werden können. Dabei kann der CryoVEx Cal/Val-Plan der ESA zur Beurteilung der Notwendigkeit verschiedener Arbeiten herangezogen werden.

Nach Beendigung der Validierungs-Phase (voraussichtlich 2011) sollten erste Arbeiten mit den CryoSat-Daten durchgeführt werden, insbesondere um Prozessstudien und Vergleiche mit anderen Satellitendaten durchführen zu können. Gleichzeitig sollten erste Arbeiten beginnen, um die Assimilation der Daten in Meereis/Ozeanmodelle vorzubereiten.

Ab Mitte der Mission (voraussichtlich 2011/2012) wird es ausreichende Daten geben, um eine vollständige Assimilation der Daten und Nutzung der Daten in Modellen zu ermöglichen. Eine vollständige Untersuchung von Trends der Eisdickenänderungen ist erst nach Ende der Mission unter Ausnutzung des gesamten Datensatzes möglich.