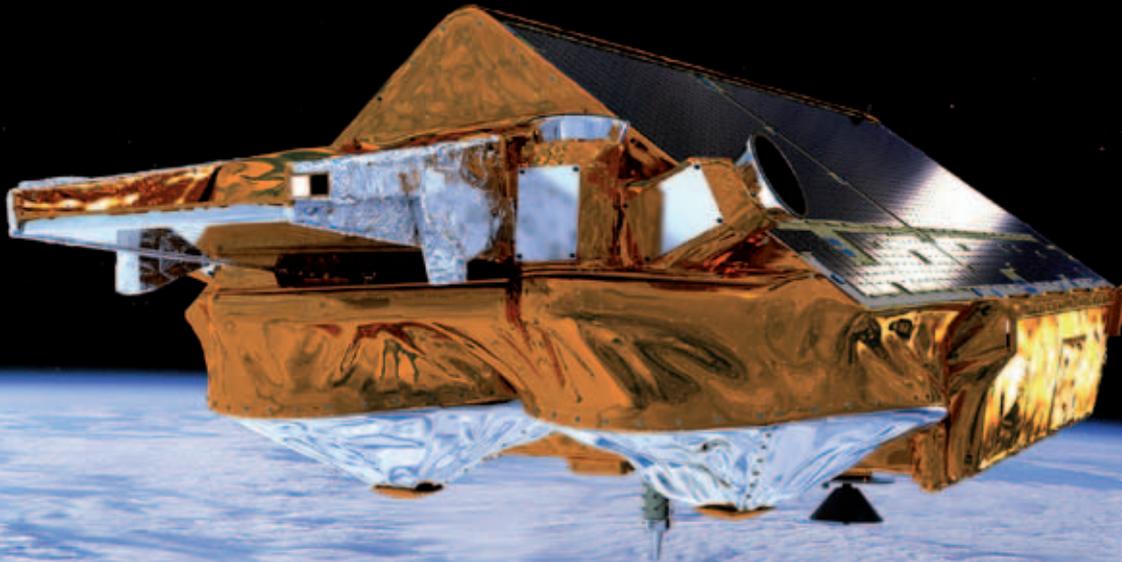


## DIE ESA-EISMISSION



CRYOSAT

# Earth Explorer Missionen der ESA

„Earth Explorers“ ist der Name einer Serie von Erdbeobachtungsmissionen, deren Schwerpunkt auf der Erhebung von Daten für Wissenschaft und Forschung im Rahmen des Living Planet Programms der ESA liegt. Diese Missionen wurden in enger Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern definiert. Als solche sind sie auf das Verständnis des Erdsystems und den Einfluss menschlicher Aktivitäten auf die natürlichen Vorgänge auf der Erde ausgerichtet. Darüber hinaus dienen die Earth Explorer-Satelliten der Realisierung bahnbrechender Technologien und neuer Fernerkundungsmethoden. Ausgerichtet auf wissenschaftliche Fragen, bilden sie die Basis für die Entwicklung neuer Anwendungen in der Erdbeobachtung.

Bisher wurden sechs Missionen zur Realisierung ausgewählt:



**GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer)** – Gestartet im März 2009. GOCE ist der Vermessung des Erdschwerefelds mit bisher nicht gekannter Genauigkeit und räumlicher Auflösung gewidmet. Das erwartete Modell des Geoids – der durch das Schwerefeld der Erde bestimmten Fläche gleichen Schwerepotenzials – wird unser Wissen über Meeresströmungen, Änderungen des Meeresspiegels und Vorgänge im Erdinneren vertiefen. Auch in den Bereichen der Geodäsie und der Vermessung erwartet man von GOCE neue Informationen.



**SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity)** – Gestartet im November 2009. SMOS liefert globale Daten der Bodenfeuchte und des Salzgehalts der Meere. Diese Informationen ermöglichen ein genaueres Verständnis des Wasserkreislaufs und insbesondere der Austauschprozesse zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre. Anhand der Beobachtungen von SMOS lassen sich Wetter- und Klimamodelle verbessern. Außerdem haben die Messungen praktischen Nutzen in den Bereichen Landwirtschaft und Wassermanagement.



**CRYOSAT** – Aufgabe der CryoSat Mission ist es, Schwankungen in der Dicke des Meereises festzustellen. Außerdem überwacht der Satellit die Eisschilde der Antarktis und Grönlands auf kleinste Höhenveränderungen. Informationen über die genauen Veränderungen der Eisdicke helfen, Auswirkungen des Klimawandels auf Eis besser zu verstehen. CryoSat-2 ersetzt den Vorgängersatelliten CryoSat, der bei einem fehlgeschlagenen Start im Oktober 2005 verloren ging.



**SWARM** – Swarm ist eine Konstellation aus drei Satelliten, welche genaue und hochauflösende Messungen der Stärke und der Richtung des Erdmagnetfelds vornehmen. Die bei der Mission entstehenden Modelle des Erdmagnetfelds liefern Einblicke in das Erdinnere, erweitern unsere Kenntnisse über Klima und Wetter und werden in Untersuchungen des Weltraumwetters und schädlicher kosmischer Strahlung praktische Anwendung finden.



**ADM-AEOLUS (Atmospheric Dynamics Mission)** – Aeolus ist die erste Weltraummission, die sich mit der Messung globaler Windprofile beschäftigt. Sie wird zur Verbesserung von Wettervorhersagen beitragen und das Wissen über die Dynamik der Atmosphäre sowie zu Klimavariationen vertiefen.



**EARTH CARE (Earth, Clouds, Aerosols and Radiation Explorer)** – Earth CARE wird in Zusammenarbeit mit der Japanischen Raumfahrtagentur JAXA realisiert. Das Kooperationsprojekt widmet sich der Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Wolken, dem Strahlungshaushalt der Erde und von Aerosolen, die grossen Einfluss auf die Klimaentwicklung haben.

ESA Communications

BR-199 January 2010

2. deutsche Fassung

Inhalt: R. Francis,

M. Drinkwater & M. Davidson

Abbildungen und Layout:

AOES Medialab

ISSN: 0250-1589

ISBN: 978-92-9221-032-8

© 2010 Europäische

Weltraumorganisation

A satellite image showing the ice edge of East Greenland. The image displays a complex, fractal-like pattern of ice and open water, with various shades of blue, white, and black. The ice appears as a dense, textured mass on the left, while the open water is a darker, smoother area on the right. The boundary between them is highly irregular and convoluted.

# DIE ESA-EISMISSION

## Inhalt

<b>CryoSat: Die Eismission der ESA</b>	<b>2</b>
<b>Eis, Klima, Meeresspiegel</b>	<b>4</b>
<b>Wie verändert sich das Eis?</b>	<b>6</b>
<b>Wie CryoSat Veränderungen erkennt</b>	<b>8</b>
<b>Die Mission</b>	<b>10</b>
<b>Die Instrumente</b>	<b>12</b>
<b>Wichtige Aktivitäten am Boden</b>	<b>14</b>
<b>CryoSat im Überblick</b>	<b>16</b>

Eisrandzone vor der Ostküste Grönlands. Als Eisrandzonen bezeichnet man die Grenze zwischen offenen und gefrorenen Meeresbereichen. Das Bild wurde am 14. Juni 2008 mit dem Envisat-Instrument MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) aufgenommen.

# CryoSat: Die Eismission der ESA



Ziel der CryoSat Mission ist es, Veränderungen in der Dicke des Meereises in den Polarregionen sowie der Eisdecken über Grönland und der Antarktis im Detail zu überwachen.

Angesichts der Auswirkungen des Klimawandels, die sich insbesondere in den Polargebieten in großen Schritten vollziehen, wird es immer wichtiger, die Reaktion der Eisfelder genauer zu verstehen. Die schwindende Eisdecke wird häufig als eine erste Folge der globalen Erwärmung genannt. Da das Eis aber auch eine wichtige Rolle bei der Regulierung des Klimas und des Meeresspiegels spielt, haben diese Veränderungen weiterreichende Konsequenzen.

Die Fläche der Eisdecke wird bereits seit Jahren aus dem Weltraum, beispielsweise mit dem ESA-Satelliten Envisat, vermessen. Wie aus dem zusammenfassenden Bericht „Climate Change 2007“ des Weltklimarates (Intergovernmental Panel of Climate Change, IPCC) hervorgeht, „zeigen die Satellitendaten seit 1978, dass die durchschnittliche jährliche Meereisfläche in der Arktis pro Jahrzehnt um 2,7 % zurückgeht“. Doch dies ist nur ein Teil des Gesamtbilds.

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf diese entlegenen, aber empfindlichen Regionen zu verstehen, ist es unerlässlich festzustellen wie sich die Dicke der Land- und Meereismassen genau verändert. Die Daten, die hierfür von CryoSat erhoben werden, vervollständigen das Bild und ermöglichen ein besseres Verständnis der Bedeutung der Eismassen für das Erdsystem.

CryoSat-2 ersetzt den ersten CryoSat-Satelliten, der beim fehlgeschlagenen Start im Oktober 2005 verloren ging. Gerade in der Zeit nach dem Verlust des Satelliten wurde die Beobachtung der Polarregionen jedoch noch dringender, weshalb der Bau des Nachfolgemodells sehr schnell beschlossen wurde. Fast auf den Tag genau vier Jahre nach dieser Entscheidung war der neue, in zahlreichen Punkten verbesserte, CryoSat-2-Satellit zum Start bereit.

Das ursprüngliche Ziel der Mission bestand darin, einen eventuellen Trend einer Verkleinerung der Eisdecken festzustellen. Heute bestehen keine Zweifel mehr an der Existenz des Trends - nun gilt es, diesen genau zu beschreiben.



Radaraufnahme der Spitze der Ellesmere-Insel (links) in der Kanadischen Arktis und Nordwestgrönlands (rechts). Der helle Bereich rechts ist die eisbedeckte Fläche des Grönländischen Eisschildes. Der quer durch die Bildmitte verlaufende dunklere Streifen zeigt den Petermann-Gletscher, den längsten schwimmenden Gletscher der Nordhalbkugel. Das Bild wurde im Jahr 2008 mit dem Envisat-Instrument ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) aufgenommen.

# Eis, Klima, Meeresspiegel

Eis beeinflusst das Klimasystem der Erde auf vielfältige Weise. Ein bestimmter Anteil der durch die Erdatmosphäre auf die Erdoberfläche auftreffenden Sonnenstrahlung wird wieder in den Weltraum reflektiert. Wie groß dieser Anteil ist, hängt von der Helligkeit der Oberfläche ab. Schnee und Eis reflektieren daher rund 80 % des einfallenden Sonnenlichts. Deshalb bleibt Eis, wenn es sich erst einmal gebildet hat, normalerweise bestehen. Wenn das Eis schmilzt und seine Fläche abnimmt, wird weniger Strahlung reflektiert und in der Folge an der Oberfläche mehr Wärme absorbiert. Dies führt zu einem selbstverstärkenden Effekt mit einer zunehmenden Erwärmung.

Jahr für Jahr durchlaufen die Polarmeere einen Zyklus aus Bildung und Schmelze riesiger Mengen von Meereis. Am Nordpol gefriert jeden Winter eine Fläche von der Größe Europas, um im folgenden Winter wieder zu verschwinden. Die Dicke des Meereises stellt einen zentralen Faktor für das polare Klima dar. Das Eis isoliert das im Verhältnis warme Meerwasser gegen die kalte polare Luft und sorgt somit dafür, dass weniger Wärme aus dem Meer an die Atmosphäre abgegeben wird.

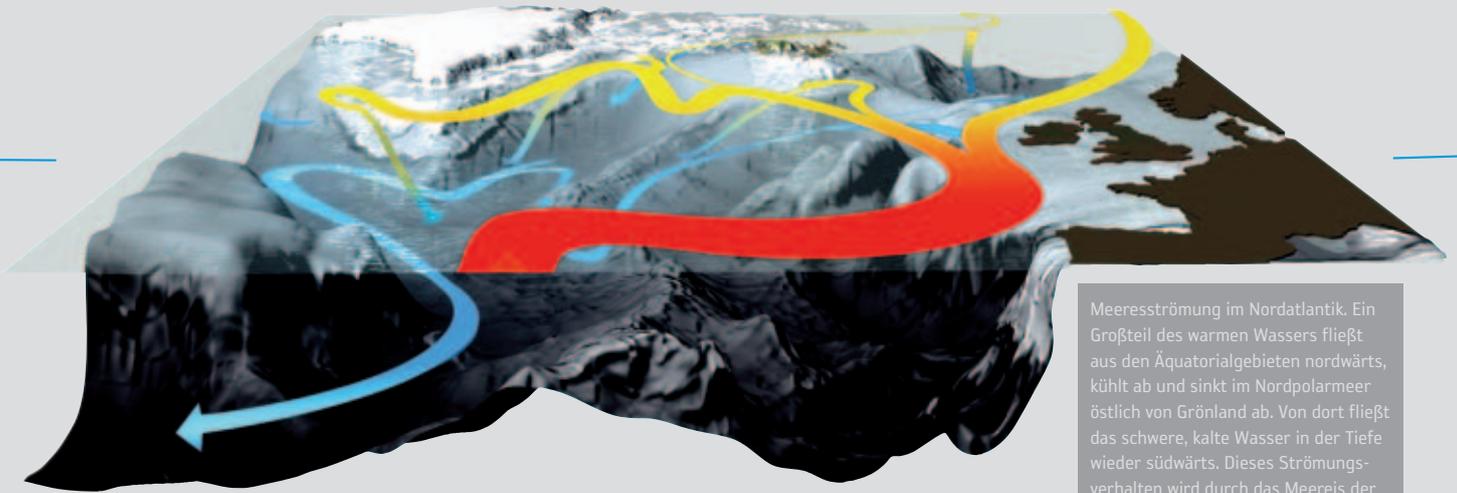
Auch auf die Meeresströmungen haben die saisonalen Veränderungen der Meereismassen einen wesentlichen Einfluss. Wenn das Eis schmilzt gelangt Süßwasser in das umliegende Meer und der Salzgehalt und somit die Dichte des Wassers nehmen ab. Umgekehrt nehmen Salzgehalt und Dichte des Wassers an der Meeresoberfläche zu, wenn das Meerwasser abkühlt und gefriert. Aufgrund seiner höheren Dichte sinkt das Oberflächenwasser nun ab. Wie eine Pumpe treibt es die Strömungen in der Tiefe aus den Polargebieten in Richtung Äquator. Zum Ausgleich strömen an der Oberfläche wärmere, weniger dichte Wassermassen vom Äquator zu den Polen.

Der Golfstrom, der warmes Oberflächenwasser aus dem Golf von Mexiko nach Norden in das Gebiet östlich von Grönland transportiert, hat eine wesentliche Bedeutung für das gemäßigte Klima in Europa. Die Küstengewässer Europas sind deshalb etwa 4°C wärmer als in entsprechenden Breiten im Nordpazifik. Dieses warme Wasser vermischt sich mit dem es umgebenden Wasser, kühlt ab und sinkt, wenn es die Arktis erreicht, zum Meeresboden. Eine Störung dieser Zirkulation durch den Rückgang der Meereismassen in der Arktis kann beträchtliche Auswirkungen auf die Stärke und Richtung des Golfstroms haben. Dies verdeutlicht, wie wichtig es für Prognosen über das künftige Klima Europas ist, die Veränderungen der arktischen Meereismassen besser zu verstehen.

Nicht zuletzt beeinflussen die riesigen Landeismassen den Meeresspiegel. Der Antarktische und der Grönländische Eisschild haben ein Gesamtvolumen von rund 28 Millionen km<sup>3</sup>. Dies bedeutet, dass der Meeresspiegel 65 m niedriger ist, als er es ohne dieses Eis wäre. Bis vor kurzem ging man davon aus, dass diese gewaltigen Eisdecken weitgehend stabil sind. Neuere Beobachtungen zeigen, dass die regionalen Veränderungen in den Polargebieten deutlich schneller erfolgen als erwartet.

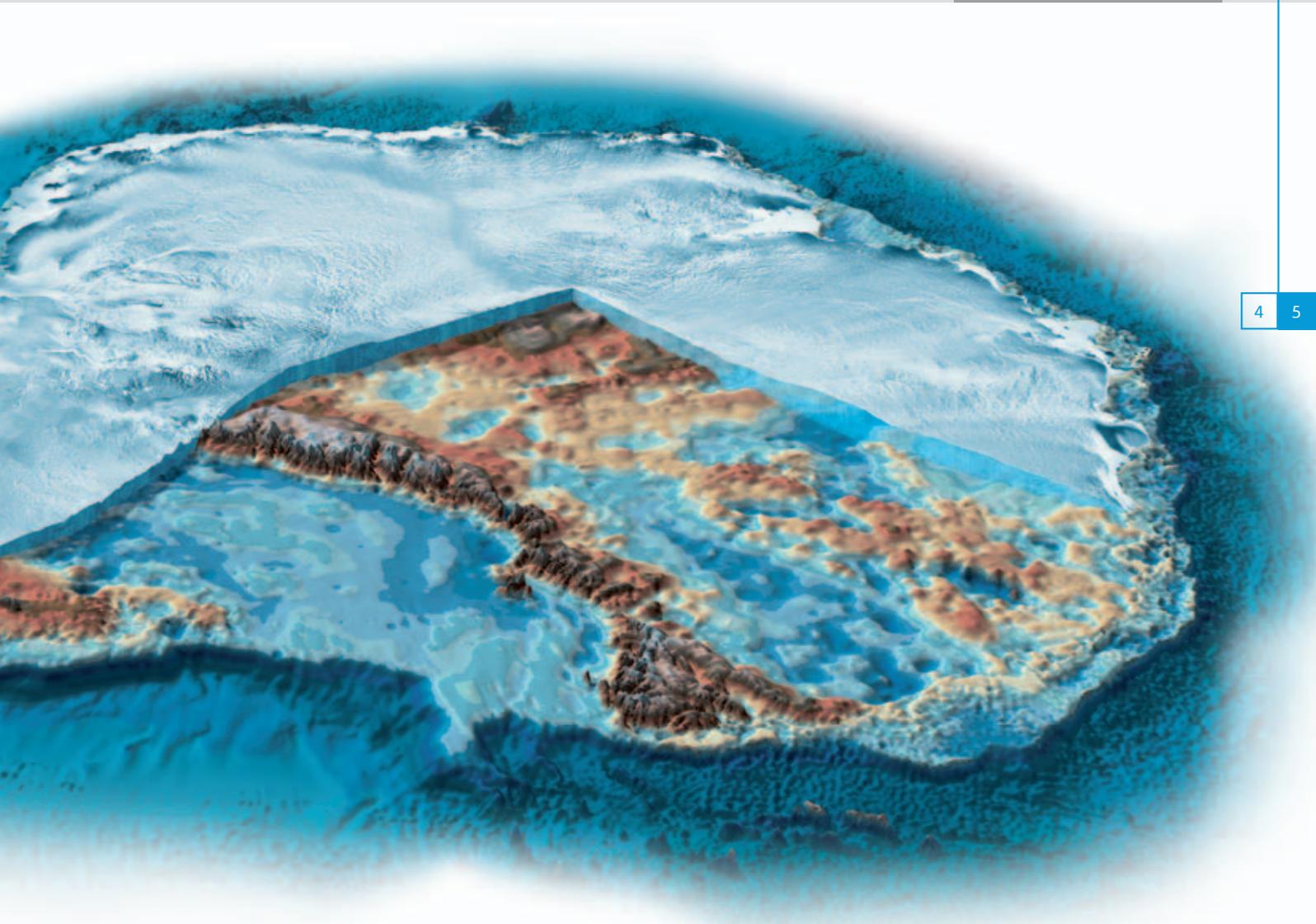


Der Antarktische Eisschild weist eine mittlere Dicke von über 2 km auf, die im Maximum bei 4,5 km liegt. Eingeschlossen unter dieser Eiskappe liegen Inseln, Gebirge, Täler und Seen. An den bläulichen Bereichen im Bild sind die unter dem Meeresspiegel liegenden Teile der Antarktis zu erkennen, die durch das Gewicht der Eismassen niedergedrückt werden. (National Geographic Maps 2002)



Warme Oberflächenströmung
Kalte Tiefenströmung

Meeresströmung im Nordatlantik. Ein Großteil des warmen Wassers fließt aus den Äquatorialgebieten nordwärts, kühlt ab und sinkt im Nordpolarmeer östlich von Grönland ab. Von dort fließt das schwere, kalte Wasser in der Tiefe wieder südwärts. Dieses Strömungsverhalten wird durch das Meereis der zentralen Arktis beeinflusst. Auch wenn die Masse des Meereises jahreszeitlich schwankt, hat sie eine stabilisierende Wirkung auf die Strömungen. Ein Rückgang des Meereises könnte dieses Gleichgewicht erheblich beeinflussen.



# Wie verändert sich das Eis?



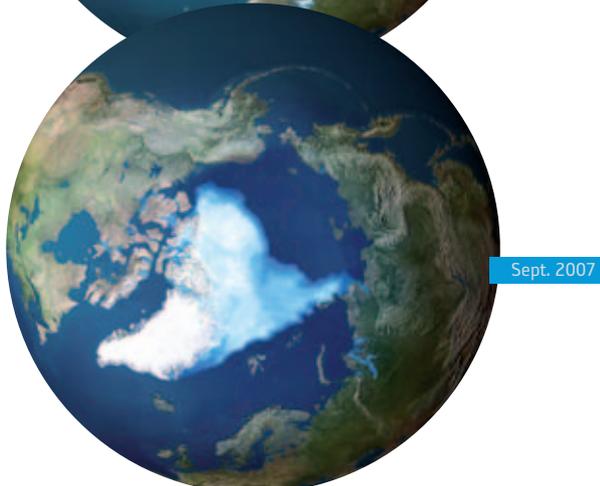
März 1980



Sept. 1980



März 2007



Sept. 2007

Kaum jemand bezweifelt heute noch, dass durch erhöhte Konzentrationen von Treibhausgasen die Temperatur auf der Erde ansteigt. Im vergangenen Jahrhundert ist die durchschnittliche Oberflächentemperatur auf der Erde um etwa 0,6 °C angestiegen und zehn der wärmsten Jahre aller Zeiten fielen in den Zeitraum nach 1997. Wissenschaftler gehen davon aus, dass dieser Trend anhält und die mittleren Temperaturen bis zum Ende dieses Jahrhunderts um weitere 4 °C ansteigen.

Wie wird sich der Temperaturanstieg auf die Eismassen der Erde auswirken? Dies ist noch immer Gegenstand lebhafter Debatten. Eines der augenfälligsten Anzeichen des Klimawandels ist die Veränderung der arktischen Meereismassen. Seit dem Jahr 2000 ist die im Sommer mit Eis bedeckte Fläche des Nordpolarmeers drastisch zurückgegangen. Der Tiefpunkt wurde im September 2007 gemessen. Auch in den Jahren 2008 und 2009 war die Eisbedeckung sehr gering.

Auch gibt es Hinweise auf Veränderungen der Eisbedeckung in Grönland und der Antarktis. Vor dem Jahr 2000 ging man davon aus, dass die zwei großen Eiskappen der Erde zumindest in ihrem Inneren weitgehend stabil sind. Heute weiß man, dass die Eiskappen aufgrund der Erwärmung der Meere an ihrer Basis abschmelzen. Auch zeigt sich, dass die Dicke des Pine-Island-Gletschers, eines großen Gletschers an der Küste der Westantarktis, pro Jahr um etwa 16 m abnimmt. Satellitenaufnahmen dokumentieren außerdem das Aufbrechen des Wilkins Eisschelfs im Südwesten der antarktischen Halbinsel. Im April 2009 führten Risse im Eisschild zum Zusammenbruch einer Eisbrücke, die den Gletscher mit der vorgelagerten Charcot-Insel verband.

Meereis in der Arktis - Maximale Ausdehnung im Winter und minimale Ausdehnung im Sommer der Jahre 1980 und 2007. Der Unterschied zwischen der Meereisausdehnung im März der Jahre 1980 und 2007 ist zwar deutlich, doch die geringe Ausdehnung im September des Vergleichszeitraumes zeigt alarmierende Unterschiede. Seit Beginn der Satellitenüberwachung vor 30 Jahren war sie nie so gering wie im September 2007.

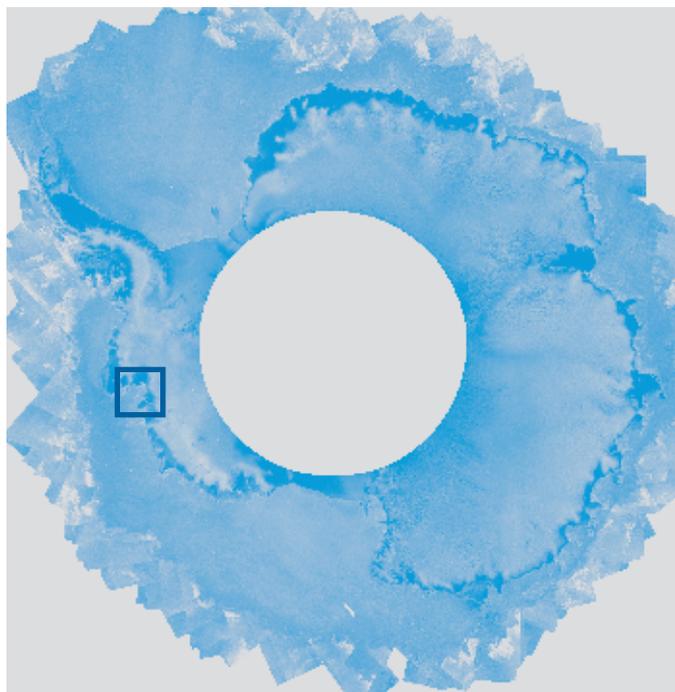
Schmelzwasser fließt in eine große „Gletschermühle“ auf Grönland. (R. Braithwaite)



Neue Daten zur Veränderung der kontinentalen Eisdecken lassen einen Anstieg des Meeresspiegels in einer Größenordnung von 1,4 m bis zum Jahr 2100 erwarten. Diese Zahl wurde vom Wissenschaftlichen Ausschuss für Antarktisforschung (Scientific Committee on Antarctic Research, SCAR) im Bericht zu den Folgen des Klimawandel und Umwelt der Antarktis („Antarctic Climate Change and the Environment“) im Jahr 2009 genannt. Sie liegt deutlich über den Prognosen von 28 bis 43 cm aus dem Vierten Sachstandsbericht des Weltklimarates (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) von 2007.

Angesichts dieser deutlichen Hinweise lautet die Frage nicht mehr, ob sich die Eismassen der Erde verändern, sondern, um wie viel. Ein Rückgang des Meereises lässt sich mit Satelliten im Detail beobachten; um jedoch aus der Eisfläche das Volumen des Eises abzuleiten werden Informationen über die Eisdicke benötigt – Informationen, die CryoSat bereitstellen wird.

CryoSat wurde entwickelt um die Dicke des Eises auf dem Meer und über Land zu vermessen. Der Satellit setzt modernste Technologien ein, um präzise Informationen über die Veränderungen der Eiskanten zu liefern, wo bisherige satellitengestützte Altimetertechniken an ihre Grenzen stoßen. Durch die exakte Vermessung der Eisdicken liefert CryoSat ein detailliertes Bild der Veränderungen der weltweiten Eismassen der Erde.



Die Dicke des Pine-Island-Gletschers in der westlichen Antarktis reduziert sich so rapide, dass er innerhalb von 100 Jahren verschwinden und dabei den globalen Meeresspiegel um etwa 20 bis 30 cm anheben könnte. Forschungsarbeiten unter der Leitung von Prof. Duncan Wingham am University College London (Großbritannien) legen nahe, dass der Hauptstrom des Gletschers im Jahr 2006 vier mal so viel Eis wie 1995 verloren hat und weiter rapide dünner wird. Der Pine-Island-Gletscher transportiert mehr Eis ins Meer als jeder andere Gletscher der Antarktis und ist der sich am schnellsten bewegende Gletscher des gesamten Kontinents. (J. Yungel/NASA)

Die Radaraufnahme des ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) Instruments von Envisat zeigt die Lage der Pine-Island- und Thwaites-Gletscher in der Antarktis. Eine Erfassung der Zentralantarktis ist bedingt durch die Umlaufbahn des Satelliten nicht möglich.

# Wie CryoSat Veränderungen erkennt

## Die Herausforderung

Man unterscheidet zwei Arten von Polareis: Eis auf Landoberflächen und Meereis. Diese haben nicht nur unterschiedliche Auswirkungen auf Umwelt und Klima, sondern sie stellen uns auch vor unterschiedliche Anforderungen, wenn es gilt, deren Dicke zu vermessen.

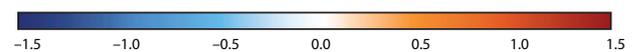
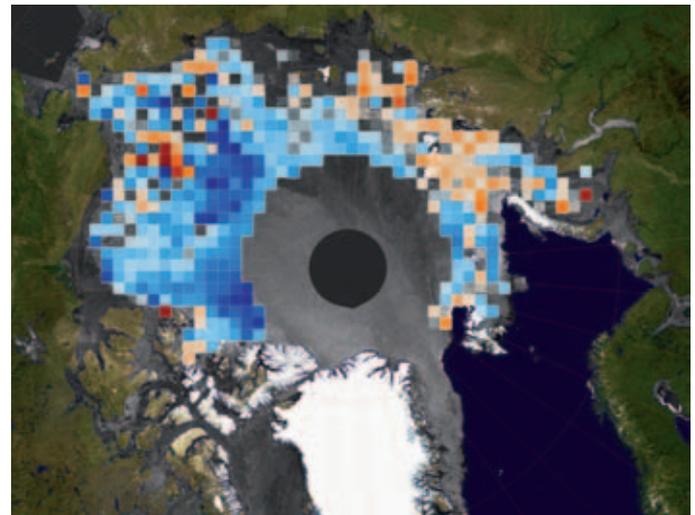
Klima und arktisches Meereis sind eng miteinander verbunden. Veränderungen der Meeresströmungen und des Wetters sind abhängig von Veränderungen der Meereismassen. Das Abschmelzen dieser Eismassen hat aber keine direkte Auswirkungen auf den Meeresspiegel, da dieses Eis bereits schwimmt. Weil Meereis relativ dünn ist - nur wenige Meter - kann seine Dicke direkt gemessen werden. Mit den derzeitigen Messmethoden, wie durch Bohrungen, werden jedoch nur punktuell Daten erhoben.

Die Eisschichten, die Grönland und die Antarktis bedecken, sind hingegen mehrere Kilometer dick. Das Abschmelzen dieser Landeismassen ist es, was sich direkt auf die Höhe des Meeresspiegels auswirkt. Am besten lassen sich derart enorme Dicken durch die Ermittlung der Oberflächenhöhe bestimmen.

Die CryoSat-Mission steht deshalb vor einer doppelten Herausforderung. Zunächst gilt es, genaue Messungen der Dicke des Meereises vorzunehmen, um die jährlichen Schwankungen zu ermitteln. Darüber hinaus muss die Oberfläche der Eisdecken über Land so präzise überwacht werden, dass sich auch geringfügige Veränderungen erkennen lassen.

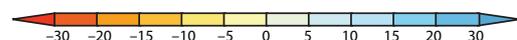
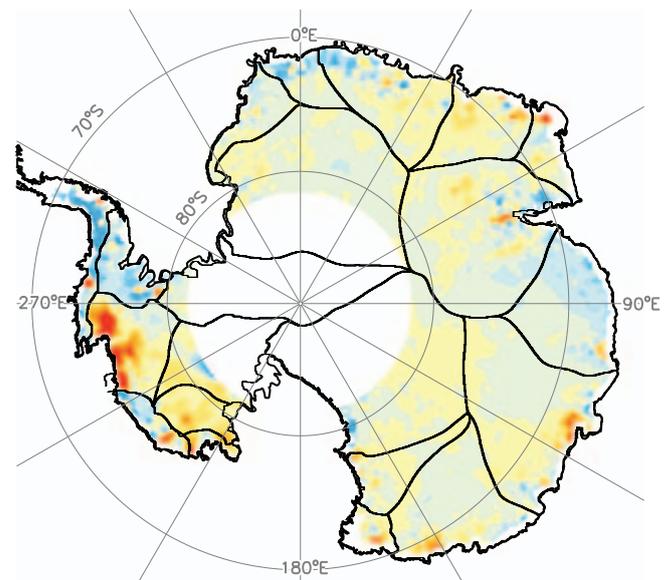
Für diese Herausforderungen ist CryoSat mit einem genauen Radar-Altimeter ausgerüstet. Das Instrument sendet kurze Radarimpulse aus und misst die Laufzeit der Signale vom Satelliten zum Boden und zurück. Altimeter haben sich zu einem wesentlichen Hilfsmittel der ozeanographischen Forschung entwickelt. Für Vorhersagen über die Höhe von Meeresspiegel und Meereswellen stützt man sich routinemäßig auf die Beobachtungen der Radar-Altimeter an Bord des ESA-Satelliten Envisat und der Jason-2 Mission (Ocean Surface Topography Mission). Die Höhe der Meeresoberflächen kann heute mit dieser Methode mit einer Genauigkeit von 2-3 cm gemessen werden.

Umfassendere Messungen der Polargebiete erfordern jedoch ein ganz spezielles Radar-Altimeter. Es muss sich zudem an Bord eines Satelliten mit ungewöhnlich hohen Bahnneigung befinden, um eine möglichst gute Abdeckung der Pole zu erreichen. Mit 88° nördlicher und südlicher Breite erreicht CryoSat-2 deutlich polnähere Gebiete als die bisherigen ESA-Satelliten (82°).



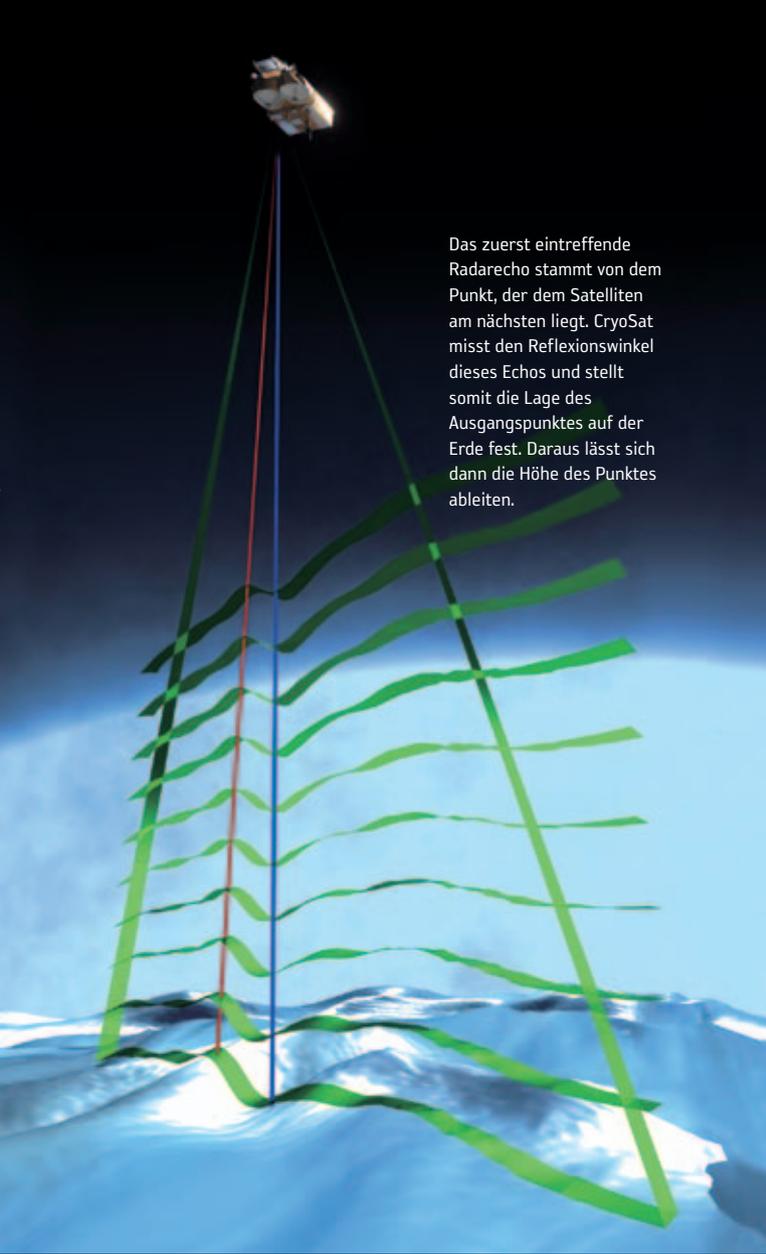
Veränderung der Eisdicke (m)

Veränderung der Meereisdicke im Winter 2007-08 im Vergleich zum Mittelwert der Jahre 2002 bis 2008. Eine Ausdünnung des Meereises in der Beaufortsee und der Zentralarktis ist deutlich zu erkennen. Für die unmittelbare Polumgebung liegen aufgrund der Umlaufbahn von Envisat keine Daten vor (grau). (ESA/S. Laxon)



Höhenveränderung (cm/Jahr)

Mit Radar-Altimetern gemessene Veränderungen der Höhenlage des Antarktischen Eisschildes. Ein beträchtlicher Rückgang ist im Bereich der Eisströme in Küstennähe zu beobachten. Die größten Verluste weisen die Gebiete um den Thwaites- und den Pine-Island-Gletscher in der Westantarktis auf. Die weißen Flächen an den Rändern des Kontinents und um den Pol zeigen, dass von früheren Satelliten keine zuverlässigen Daten vorliegen. Die schwarzen Linien stellen die Hauptabflussbecken dar. (D. Ingham et al.)



Das zuerst eintreffende Radarecho stammt von dem Punkt, der dem Satelliten am nächsten liegt. CryoSat misst den Reflexionswinkel dieses Echos und stellt somit die Lage des Ausgangspunktes auf der Erde fest. Daraus lässt sich dann die Höhe des Punktes ableiten.

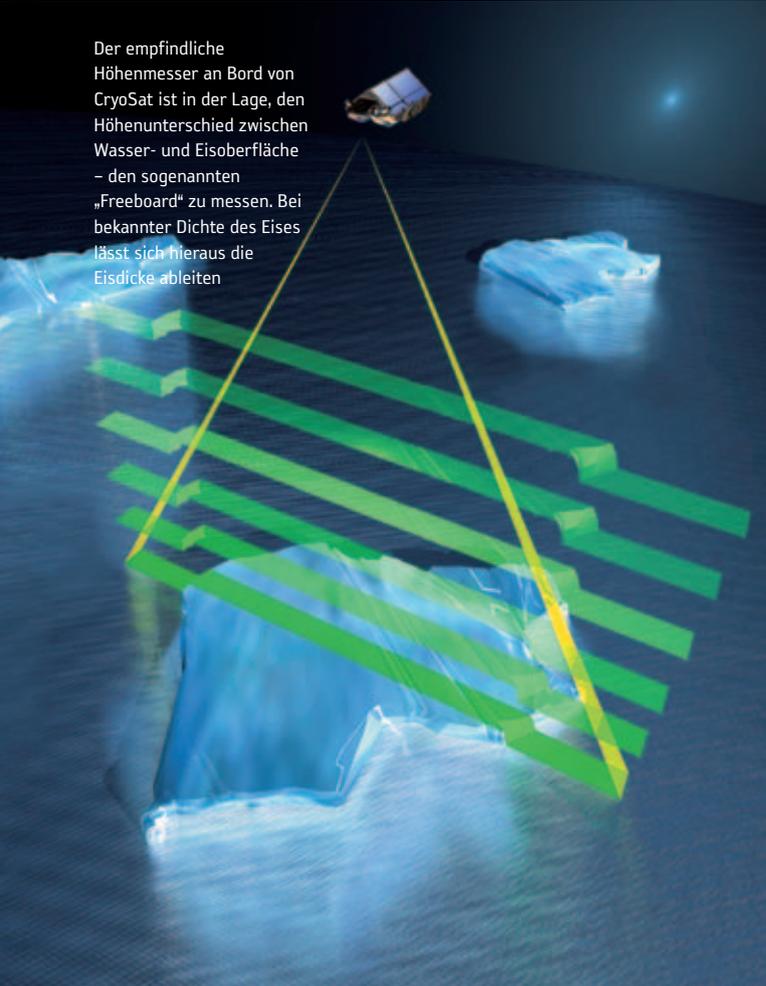
Die Oberfläche des Meeres ist nicht flach. Für das Auge unsichtbar, spiegeln sich die untermeerischen Berge und Senken an der Oberfläche der Meere wider. Durch die Gesteinsmasse eines Gebirges am Meeresboden entsteht eine geringfügig höhere Schwerkraft, die über dem untermeerischen Berg einen wenige Meter hohen Wasserhügel aufwirft. Ein Tiefseeegraben kann an der Oberfläche ein Gegenstück mit einer Tiefe von bis zu 10 m haben. Da sich diese Merkmale jedoch über eine Breite von 200 km erstrecken, sind sie nur per Radar-Höhenmessung aus dem All erkennbar. Für kleinere und kurzlebige Abweichungen von „Normalnull“ sind Erscheinungen wie die Gezeiten und Meeresströmungen verantwortlich.

## Die Antwort

Mit fortschrittlichsten Radartechniken, die für eine höhere Auflösung und bessere Beobachtungsfähigkeiten sorgen, überwindet der für CryoSat entwickelte Höhenmesser die derzeitigen Einschränkungen. Aufgabe des Satelliten ist es, die Meereisdicke für das gesamte Arktische Becken zu bestimmen und die Eisschilde Grönlands und der Antarktis auf Veränderungen der Dicke zu überwachen. Dabei werden insbesondere die Eisränder beobachtet, wo mit dem Eintritt der Gletscher ins offene Meer Eisberge abbrechen. Obwohl die Betriebszeit des Satelliten bisher nur auf drei Jahre ausgelegt ist, wird seine Messgenauigkeit ausreichen, um Hinweise auf die dünner werdenden Eisschilde und Trends in den jährlichen Eisbildungs- und Schmelzyklen des Meereises nachzuweisen. In Kombination mit Beobachtungen der Eisfläche führt dies zu einem besseren Verständnis der Veränderungen des Eisvolumens.

Das auf der Technologie bestehender Instrumente aufbauende Radar-Altimeter an Bord von CryoSat ist mit einer Reihe bedeutender Verbesserungen auf die präzise Vermessung vereister Flächen spezialisiert. CryoSat ermittelt die Dicke von Meereis durch Messung der Höhen-differenz von Eisschollen und Meeresspiegel - dem sogenannten „Freeboard“. Die Ableitung der Meereisdicke erfolgt indirekt über den bekannten Anteil der Eismasse, der sich unter Wasser befindet.

Das zuerst eintreffende Signal im Radarecho stammt von der dem Satelliten am nächsten gelegenen Stelle auf der Erdoberfläche. Über Meereis und dem Ozean befindet sich dieser Punkt direkt unterhalb des Satelliten, aber über unebenem Gelände wie etwa an den Rändern von Eisschilden kann sich dieser nächste Punkt verschieben. Mit herkömmlichen Radar-Altimetern lässt sich die Entfernung zwischen dem Satelliten und dem nächsten Punkt mit hoher Genauigkeit ermitteln. Es ist jedoch nicht möglich, diesem Punkt eine Position oder eine Höhe zuzuweisen. Durch den Einsatz eines sogenannten Radars mit synthetischer Apertur (SAR - Synthetic Aperture Radar) ist CryoSat in der Lage, das Echo in Front- und Heckrichtung zu orten. Für die Querrichtung ist eine zusätzliche Einrichtung erforderlich: Über unebenen Oberflächen liefert der „SAR-Interferometrie“-Modus die Messungen zur Bestimmung des Einfallswinkels des Echos.



Der empfindliche Höhenmesser an Bord von CryoSat ist in der Lage, den Höhenunterschied zwischen Wasser- und Eisoberfläche - den sogenannten „Freeboard“ zu messen. Bei bekannter Dichte des Eises lässt sich hieraus die Eisdicke ableiten

# Die Mission



CryoSat-2 wird mit einer Dnepr-Trägerrakete ins All befördert. Unüblicherweise fliegt die Oberstufe bis zum Aussetzen des Satelliten rückwärts. Dies erhöht die Genauigkeit bei der Einbringung in die Umlaufbahn. Der Start erfolgt vom Raumfahrtzentrum Baikonur in Kasachstan. (ESA/P. Carril)



Die Bodenstation für die CryoSat-Mission befindet sich im nordschwedischen Kiruna. Sie ist zur Flugkontrolle und Überwachung des Satelliten mit dem Europäischen Raumfahrtkontrollzentrum (ESOC) der ESA in Darmstadt verbunden. Die wissenschaftlichen Daten werden direkt in Kiruna von einem automatischen System verarbeitet. (Kiruna Ground Station Team)

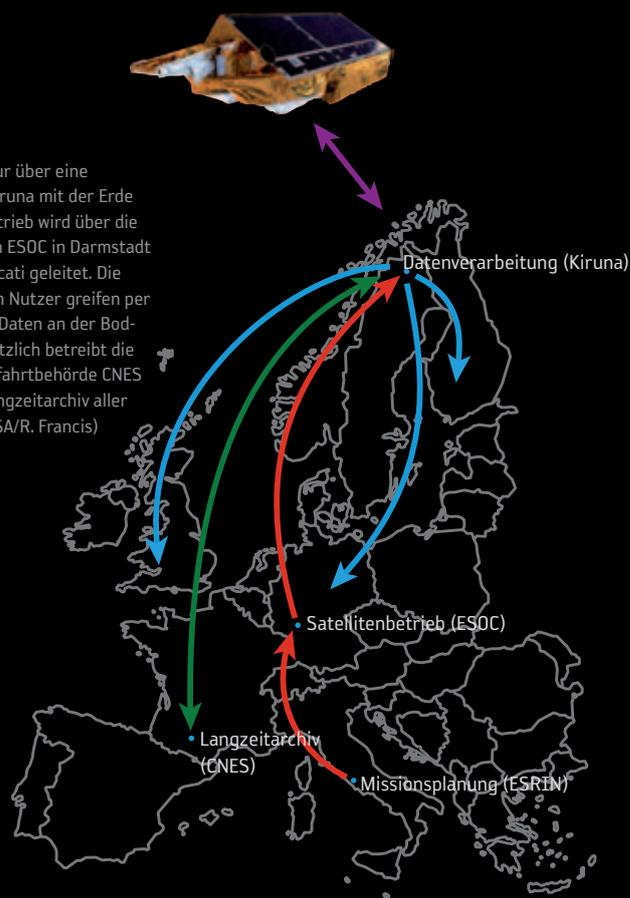
Das Prinzip von CryoSat beruht auf einem Zusammenwirken zahlreicher Einzelkomponenten. Um in seine Umlaufbahn zu gelangen, braucht der Satellit eine Trägerrakete. An einem Fehler dieser Rakete scheiterte die erste Mission. Nicht aus Misstrauen, sondern, weil der damals eingesetzte Träger diesmal nicht verfügbar war, wird der zweite Satellit mit einer anderen Technik gestartet. Diesmal kommt eine von der Interkontinentalrakete SS-18 abgeleitete Dnepr zum Einsatz. Aufgrund der Historie des Trägers erfolgt der Start aus einem Silo im kasachischen Baikonur heraus und wird mit einer spektakulären Explosion eingeleitet, bevor die Triebwerke erst in einigen Dutzend Metern Höhe gezündet werden. Ebenso ungewöhnlich mutet die Flugrichtung der Oberstufe an. Im Rückwärtsflug zieht sie den Satelliten hinter sich her, um ein Maximum an Genauigkeit bei der Einbringung in die Umlaufbahn zu gewährleisten.

Sobald der Satellit ausgesetzt ist, erwacht er zum Leben: Sein Computer, der den Satelliten während des Starts lediglich überwacht, beginnt Befehle zu geben und schafft eine Funkverbindung, damit das ESA-Kontrollzentrum in Darmstadt mit dem Satelliten kommunizieren kann. Rund um die Uhr ist das Team dann damit beschäftigt, den neuen Satelliten vollständig in Betrieb zu nehmen. Nach dieser ersten Phase kehrt eine gewisse Routine ein, die für das Flugkontrollteam jedoch nicht bedeutet, dass es die Arbeit einstellen kann. Es muss weiterhin während der gesamten Missionsdauer von drei Jahren für einen einwandfreien Betrieb des Systems sorgen.

Zu den Befehlen, die das Kontrollzentrum an den Satelliten sendet, gehört die Wahl der Betriebsart für das SIRAL-Instrument in Abhängigkeit von dem jeweils überflogenen Gebiete am Boden. Für diese Entscheidungen wird eine Master-Karte herangezogen, die in der Planungseinrichtung der ESA im italienischen Frascati gepflegt wird. Jede Woche wird die Flugbahn des Satelliten auf dieser Karte berechnet und die Zeitpunkte für den Betriebsartwechsel festgelegt. Da sich das ESA-Kontrollzentrum in mittleren Breiten befindet, gelangt CryoSat auf seiner Bahn nur wenige Male am Tag in seine Reichweite. Um regelmäßig Verbindung mit dem Satelliten aufnehmen zu können, nutzt man daher eine Antenne in Kiruna, im hohen Norden Schwedens.



CryoSat-2 steht nur über eine Bodenstation in Kiruna mit der Erde in Kontakt. Der Betrieb wird über die ESA-Einrichtungen ESOC in Darmstadt und ESRIN in Frascati geleitet. Die wissenschaftlichen Nutzer greifen per FTP direkt auf die Daten an der Bodenstation zu. Zusätzlich betreibt die französische Raumfahrtbehörde CNES in Toulouse ein Langzeitarchiv aller Missionsdaten. (ESA/R. Francis)



Aber nicht nur die Missionskontrolle erfolgt über die Antenne in Kiruna, dort werden auch die wissenschaftlichen Daten von CryoSat empfangen. Bei einer Datenmenge von mehr als 50 GB pro Tag stellt dies eine grosse Herausforderung dar. Um die Funktion der Instrumente zu überwachen, steht ein Teil der verarbeiteten Daten dem Team sofort zur Verfügung. Um aber die Altimetermessungen wissenschaftlich auszuwerten, sind zusätzlich genaue Angaben zur Position und Lage des Satelliten erforderlich. Erst wenn auch diese verfügbar sind, können genaue Datenprodukte erzeugt werden.

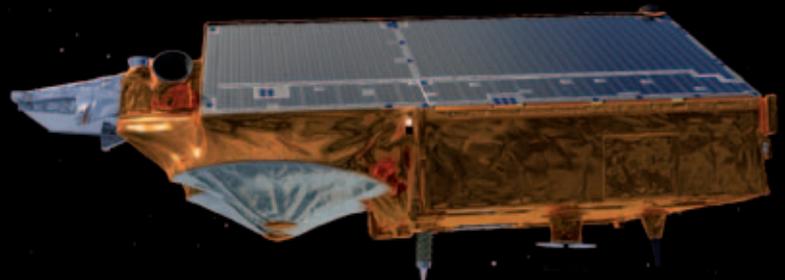
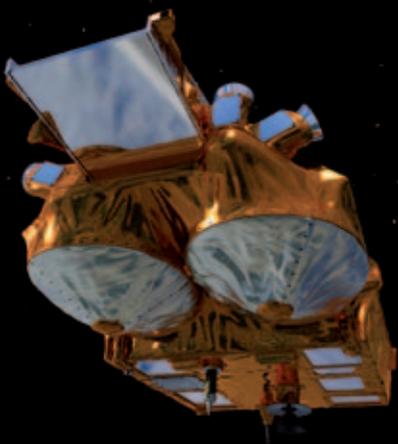
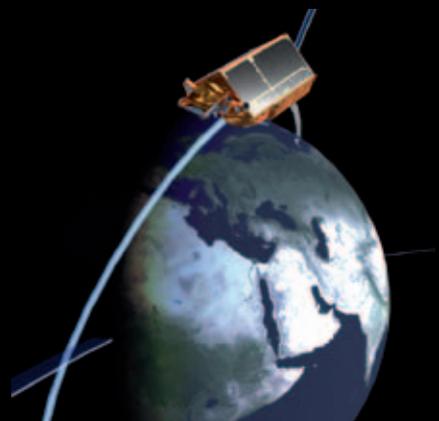
Alle Nutzer der CryoSat-Mission können die endgültigen Datenprodukte direkt über das Internet kostenfrei herunterladen. Für die Langzeitarchivierung sämtlicher Missionsdaten wurde bei der französischen Raumfahrtagentur CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) in Toulouse eine spezielle Datenbank eingerichtet. Hier können die Wissenschaftler langfristig auf die Daten zugreifen, und bei verbesserten Versionen der Verarbeitungssoftware wird dort eine erneute Verarbeitung des gesamten Datensatzes durchgeführt.



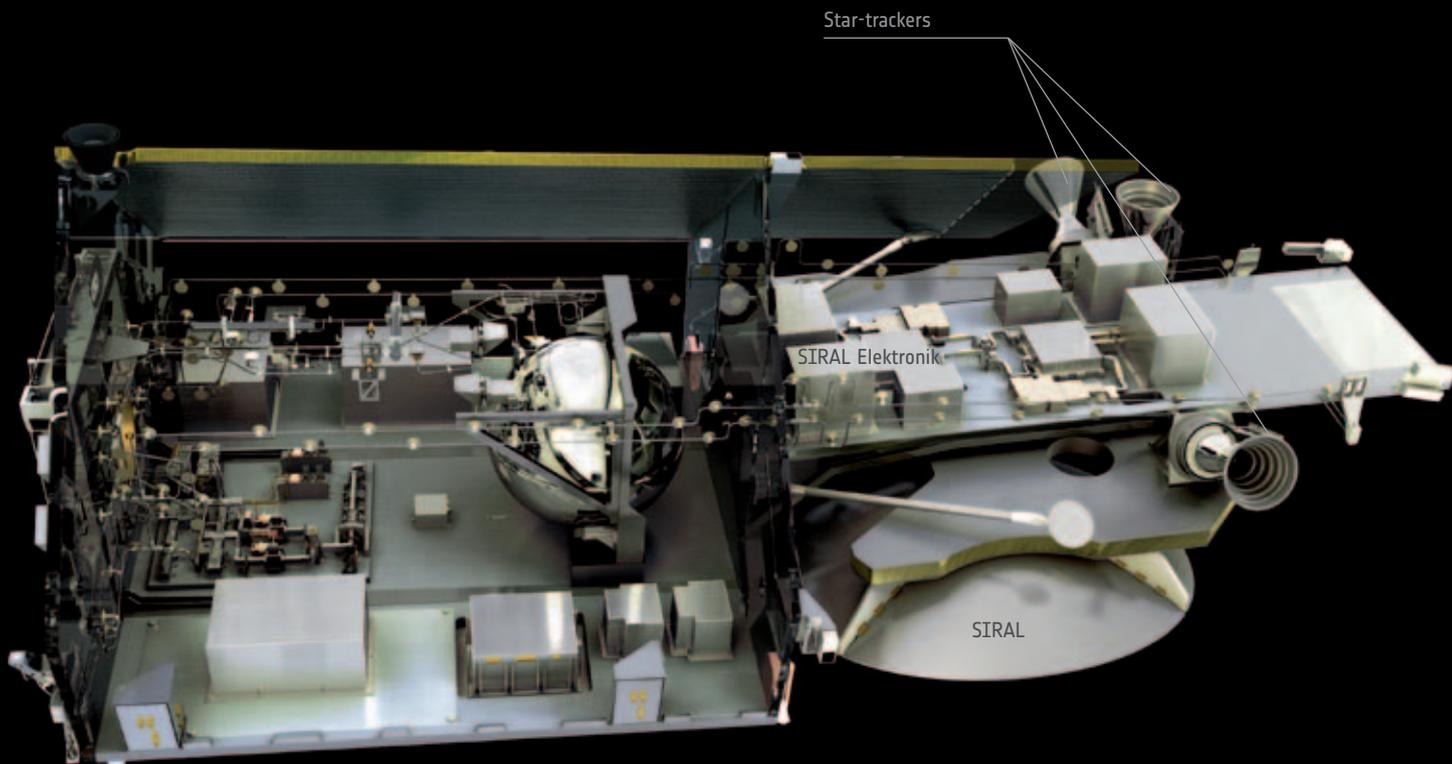
Tests von CryoSat-2 bei der Industrieanlagen Betriebsgesellschaft IABG in Ottobrunn. (ESA/S. Corvaja)



Das Missionskontrollteam für CryoSat-2 im ESOC-Hauptkontrollraum. (ESA/R. Francis)



# Die Instrumente

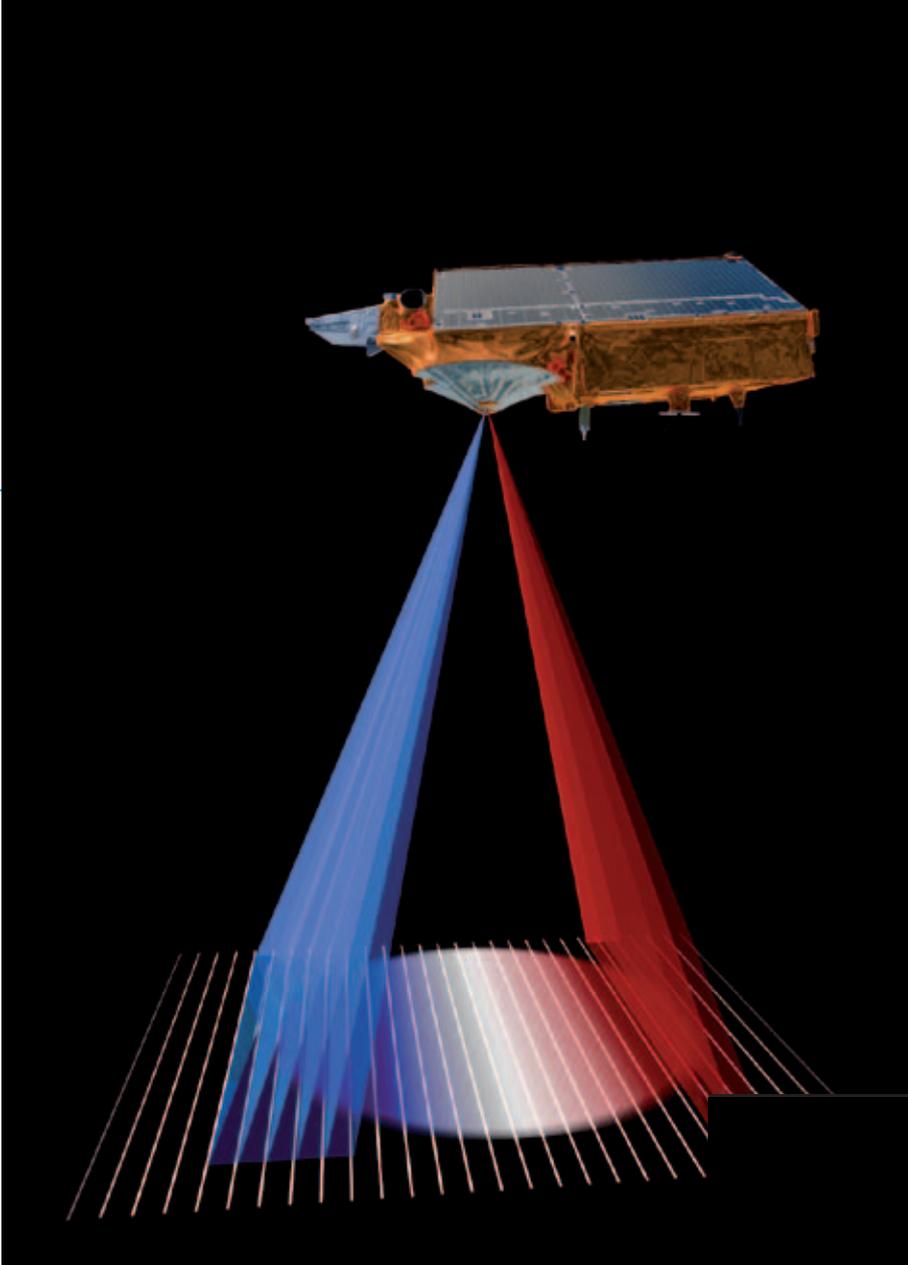


Die zentrale Instrument von CryoSat ist das speziell für die Vermessung der Höhe von Eisschilden und dem Freibord (engl Freeboard) von Meereis ausgelegte **SAR-Interferometrische Radar-Altimeter (SIRAL)**.

Herkömmliche Radarhöhenmesser senden Impulse in Intervallen aus, die lang genug sind, um unkorrelierte Echos zu erhalten. Durch Mittelung vieler dieser unkorrelierten Echos ist eine Rauschreduzierung möglich. Bei der hierbei typischen Geschwindigkeit des Satelliten von 7 km/s beträgt das Impulsintervall etwa 500  $\mu$ s. Das Altimeter von CryoSat sendet hingegen seine Impulsfolgen im Abstand von lediglich etwa 50  $\mu$ s. Unter Nutzung der durch den Doppler-Effekt verursachten Frequenzverschiebungen zwischen den nach vorne und nach hinten gerichteten Teilen des Signals lässt sich das Echo der Impulsfolge in einzelne Streifen quer zur Flugrichtung zerlegen. Die einzelnen Streifen sind etwa 250 m breit und eine Impulsfolge stimmt mit einer Vorwärtsbewegung des Satelliten um 250 m überein. Die durch aufeinander folgende Signalfolgen entstehenden Streifen lassen sich überlagern und zur Rauschreduzierung mitteln. Dieses Prinzip ist als Radar mit synthetischen Apertur (Synthetic Aperture Radar, SAR) bekannt.

Um auch den Einfallswinkel des Radarechos zu erfassen, verfügt der Satellite über zwei Antennen, die die reflektierte Strahlung gleichzeitig empfangen. Stammt das Echo von einem Punkt, der sich nicht direkt unter dem Satelliten befindet, kommt es zu Unterschieden in der Laufzeit des Radarsignals zwischen Boden und Antenne. Diese Unterschiede werden gemessen. Mit einer einfachen geometrischen Berechnung lässt sich dann der Winkel zwischen der „Basislinie“, welche die beide Antennen verbindet, und der Echorichtung ermitteln. Der Unterschied in der Laufzeit ist winzig - mitunter so klein wie eine Wellenlänge des Radarsignals (2,2 cm) - und muss über eine Entfernung von 720 km genau bestimmt werden.

Das Radarinstrument ist eine zentrale Komponente, ebenso unverzichtbar ist jedoch die Kenntnis der exakten Ausrichtung der beiden Empfangsantennen. CryoSat misst deren Orientierung mithilfe des ältesten und genauesten Bezugssystems: der Position der Sterne am Himmel. Drei auf dem Satelliten montierte Star-Tracker nehmen je fünf Bilder pro Sekunde auf. Um die Orientierung zu berechnen, werden die einzelnen Bilder mit dem integrierten Computer ausgewertet und mit einem Katalog der Sternenpositionen verglichen.

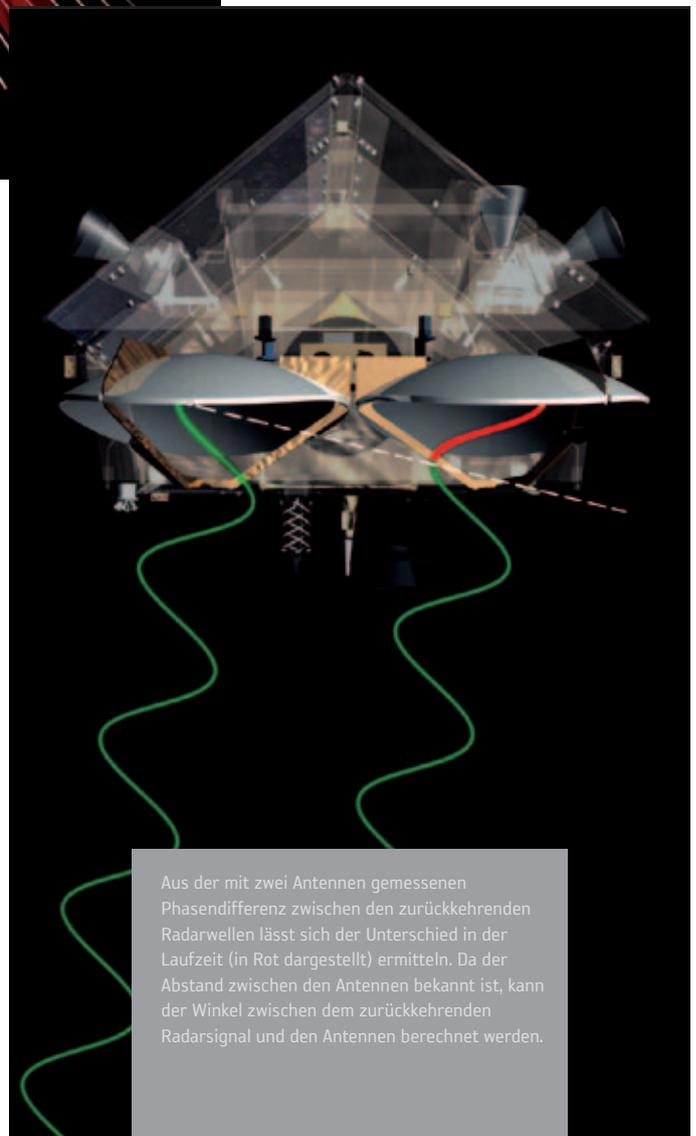


Der Radarstrahl ist leicht nach vorne und nach hinten gerichtet, wobei der Satellit sich mit hoher Geschwindigkeit auf seiner Umlaufbahn fortbewegt. Dabei fliegt er auf das vor ihm liegende Gebiet zu und von hinter ihm liegenden weg (in der Abbildung blau und rot gekennzeichnet). Die relative Geschwindigkeit führt zu minimalen Frequenzverschiebungen in der zurückgestrahlten Radarenergie, die sich durch den Doppler-Effekt erklären lassen. Das Radarecho enthält die Energie des gesammelten Signals, jedoch kann durch die Verarbeitung der korrelierten Impulsfolge das ankommende Echo in eine Reihe von Dopplerstrahlen zerlegt werden.

Das Altimeter misst den Abstand zwischen Satellit und Boden. Aus diesen Messungen kann aber nur dann die die Höhe von Oberflächen abgeleitet werden, wenn die Position des Satelliten sehr exakt bekannt ist. Heute ist die Position von Satelliten auf wenige Zentimeter genau bestimmbar. Hierfür ist CryoSat mit zwei Instrumenten ausgestattet: einem Funkempfänger und einem Laser-Retroreflektor.

Der DORIS-Empfänger (Doppler Orbit and Radio Positioning Integration by Satellite) erkennt und misst die Frequenzverschiebung von Signalen, die über ein Netzwerk von mehr als 50 über die ganze Welt verteilten Funkfeuern ausgesendet werden. Das DORIS-System ist nun seit über einem Jahrzehnt in Gebrauch und kommt auf zahlreichen Satelliten wie zum Beispiel Envisat zum Einsatz.

Der kleine Laser-Retroreflektor ist an der Unterseite von CryoSat angebracht. Er verfügt über sieben Prismen, die das Licht in exakt der Richtung reflektieren, aus der es einfällt. Ein weltweites Netzwerk von Ortungsstationen sendet kurze Laserimpulse und misst die Zeit bis zum Eintreffen des reflektierten Signals. Zwar gibt es nur relativ wenige dieser Stationen, doch da ihre Positionen genau bekannt sind, können sie hochgenaue Positionsbestimmungen von CryoSat liefern.



Aus der mit zwei Antennen gemessenen Phasendifferenz zwischen den zurückkehrenden Radarwellen lässt sich der Unterschied in der Laufzeit (in Rot dargestellt) ermitteln. Da der Abstand zwischen den Antennen bekannt ist, kann der Winkel zwischen dem zurückkehrenden Radarsignal und den Antennen berechnet werden.

# Wichtige Aktivitäten

Angesichts des Ziels der CryoSat-Mission, globale Veränderungen in der Eisdicke von nur wenigen Zentimetern pro Jahr zu erkennen, ist es kaum verwunderlich, dass sich ein Großteil der Bemühungen auf eine maximale Genauigkeit der Messungen konzentriert.

Daher werden bereits im Vorfeld mögliche Fehlerquellen ausgeschlossen. So ist bei der Beobachtung von Eisflächen beispielsweise auch immer mit Schneebedeckung zu rechnen. Deren möglicher Einfluss auf die Messungen muss sorgfältig eingeplant werden. Zu berücksichtigen sind weiterhin auch Veränderungen der Wassergehalt des Schnees, das Gewicht der Schneeschichten auf dem Meereis sowie unterschiedliche Dichten von Schnee und Eis.

Um diese Einflüsse korrigieren zu können, müssen Informationen über die Eigenschaften von Schnee und Eis vor Ort untersucht werden. Hierfür werden Expeditionen in die Polargebiete durchgeführt. Derartige Forschungsreisen müssen sowohl vor als auch nach dem Satellitenstart unternommen werden. Vor dem Start sind die Beobachtungen als Eingangsdaten für die Software erforderlich, die die Messungen von CryoSat in Eisdickekarten umsetzt. Nach dem Start auf dem Boden erfasste Daten dienen zum direkten Vergleich mit den Messungen aus dem All.

Hier handelt es sich um Expeditionen, bei denen nicht selten ein ganzes Team von Wissenschaftlern an der zeitgleichen Erhebung von Daten am Boden und aus der Luft mitwirkt. Zur Ermittlung der Schnee- und Eismerkmale am Boden kommen Georadarsysteme, Neutronensonden und andere modernste Geräte, aber auch herkömmliche Methoden wie etwa das Anlegen von Schneeprofilen oder Eiskernbohrungen zum Einsatz. Auch von Flugzeugen aus werden mit Radargeräten, die demjenigen an Bord des Satelliten sehr ähnlich sind, Vergleichsdaten erhoben.

Zusätzlich zu den von der ESA organisierten Großexpeditionen haben sich eine Reihe von Polarforschern für die CryoSat-Mission begeistern lassen und leisten einen freiwilligen Beitrag, indem sie auf ihren Wanderungen durch die Arktis Messungen der Schneetiefe und anderer Faktoren vornehmen. All diese Aktivitäten am Boden stellen einen unverzichtbaren Bestandteil der Mission dar. Die erhobenen Daten versetzen die Wissenschaftler in die Lage, die von CryoSat beobachteten Schwankungen der Eisdicke zu interpretieren und Trends abzuleiten.

## am Boden





Ein mit AIRAS - der Flugzeugvariante des Radarhöhenmessers an Bord von CryoSat - bestücktes Flugzeug vom Typ Dornier-228 des Alfred-Wegener-Instituts. Unter dem Rumpf ist die rechteckige Antenne erkennbar. Zusammen mit einem Laserscanner liefert sie die für die Validierung der CryoSat-Daten erforderlichen Messwerte. (ESA/M. Davidson)



Camp in Königin-Maud-Land in der Antarktis. Hier wurden Messungen des schneefreien Blaueisgebiets durchgeführt. (Technische Universität Dresden)



Sogenannte Corner- oder Winkelreflektoren wurden während der Validierungskampagnen für CryoSat intensiv genutzt. Es handelt sich um Metallkonstruktionen, welche die Radarstrahlen des flugzeuggetragenen ASIRAS instruments mit definierter Stärke reflektieren. Dadurch helfen sie bei der Analyse der Qualität des Radarsignals und der Eindringtiefe des Signals in Schnee- und Eisflächen. (Norwegian Polar Institute)



Eine Neutronensonde wird in einer Bohrung im Eis versenkt. Sie erfasst wichtige Informationen über die Dichte von Schnee- und Eisschichten, die zur Interpretation der Beobachtungen des Radarhöhenmessers und letztendlich zum Erreichen des Hauptziels der CryoSat-Mission über Landeis beitragen - der Ableitung von Massenbilanzen aus den Höhendaten. (Norwegisches Polarinstitut)

# CryoSat-2 im Überblick

Die CryoSat-Mission ermittelt Veränderungen in der Dicke kontinentaler Eisschilde und von Meereis mit dem Ziel, die Reaktion der Eismassen der Erde auf den Klimawandel zu verstehen. CryoSat-2 ersetzt den Vorgängersatelliten CryoSat, der bei einem fehlgeschlagenen Start im Jahr 2005 verloren ging.

## Mission

Start: März 2010

Dauer: 3 Jahre (im Anschluss an eine sechsmonatige Aktivierungsphase); theoretische Lebensdauer fünf Jahre

## Missionsziele

Bestimmung von Veränderungen der Eisdicke mit einer Genauigkeit von etwa 10 % der erwarteten Schwankungen. Über Meereis entspricht dies einem Wert von ungefähr 1,5 cm/Jahr und über kleinen Landeisflächen einem Wert von etwa 3 cm/Jahr. Über ganz Grönland gemessen ist eine Genauigkeit von 0,7 cm/Jahr gefordert. Die Mission kann diese Anforderungen sicher erfüllen.

## Umlaufbahn

Art: Niedrige, polare, nicht-sonnensynchrone Umlaufbahn  
Durchschnittliche Flughöhe: ca. 720 km  
Bahnneigung (Inklination): 92°

## Nutzlast

SAR Interferometrisches Radar-Altimeter (SIRAL); DORIS (Doppler Orbit and Radio Positioning Integration by Satellite) und Laser-Retroreflektor (LRR) zur exakten Bahnbestimmung

## Konfiguration

Vereinfachte, starre Struktur ohne bewegliche Teile;  
Gesamtabmessungen 4,6 × 2,4 × 2,2 m

## Masse

720 kg beim Start, einschließlich 37 kg Treibstoff

## Stromversorgung

Zwei auf den Satellitenkörper montierte GaAs-Solarzellen mit einer Leistung von je 850 W; 78-Ah-Lithiumionen-Akku

## Lage

- dreiachsrig stabilisiert, LNP (local-normal pointing), mit 6° kopflastiger Trimmung
- Star-Tracker, Magnetfeldmesser, Magnetotorquer und 10-mN-Kaltgastriebwerke
- <0,25° Richtungsfehler

## Steuerung und Kontrolle

Integrierte Datenverarbeitung sowie AOCS-Computer (Lage- und Bahnregelungssystem), Kommunikation über 1553-Bus und serielle Verbindungen

## Datenspeicherung an Bord

- Festkörperspeicher, Kapazität 2 × 128 Gbit
- An Bord erzeugte Nutzlastdaten: 400 Gbit/Tag
- Vollständiger Missionsbetrieb mit einer einzigen Bodenstation in Kiruna, Schweden

## Datenübertragung

- X-Band-Datendownlink für wissenschaftliche Daten zur Bodenstation in Kiruna (100 Mbit/s bei 8,1 GHz)
- S-Band-Datenuplink (2 kbit/s) und -downlink (16 kbit/s) zur Bodenstation in Kiruna, für Satellitentelemetrie und Telekommandos

## Flugbetrieb

- Missionskontrolle durch das Europäische Raumfahrtkontrollzentrum (ESOC) der ESA in Darmstadt über die Bodenstation in Kiruna
- Missionsplanung im ESA Zentrum für Erdbeobachtung (ESRIN) in Frascati (Italien), auf der Grundlage einer geografisch definierten Maske
- Projektkoordination und -durchführung durch des ESA-Zentrum ESTEC in Noordwijk, Holland

## Datenverarbeitung

- EDV-Einrichtung der Bodenstation in Kiruna
- Lokale Datenarchivierung mit Verarbeitung etwa einen Monat nach Lieferung genauer Bahnangaben durch das CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) in Toulouse (Frankreich)
- Langzeitarchivierung beim CNES
- Nutzer-Dienstleistungen koordiniert über ESRIN in Frascati (Italien)

## Hauptauftragnehmer

Astrium GmbH, Friedrichshafen, DE







***European Space Agency***  
***Agence spatiale européenne***

**Kontakt: ESA Communications**  
ESTEC, PO Box 299, 2200 AG Noordwijk, Nederlande  
Tel: (31) 71 565 3408 - Fax (31) 71 565 5433