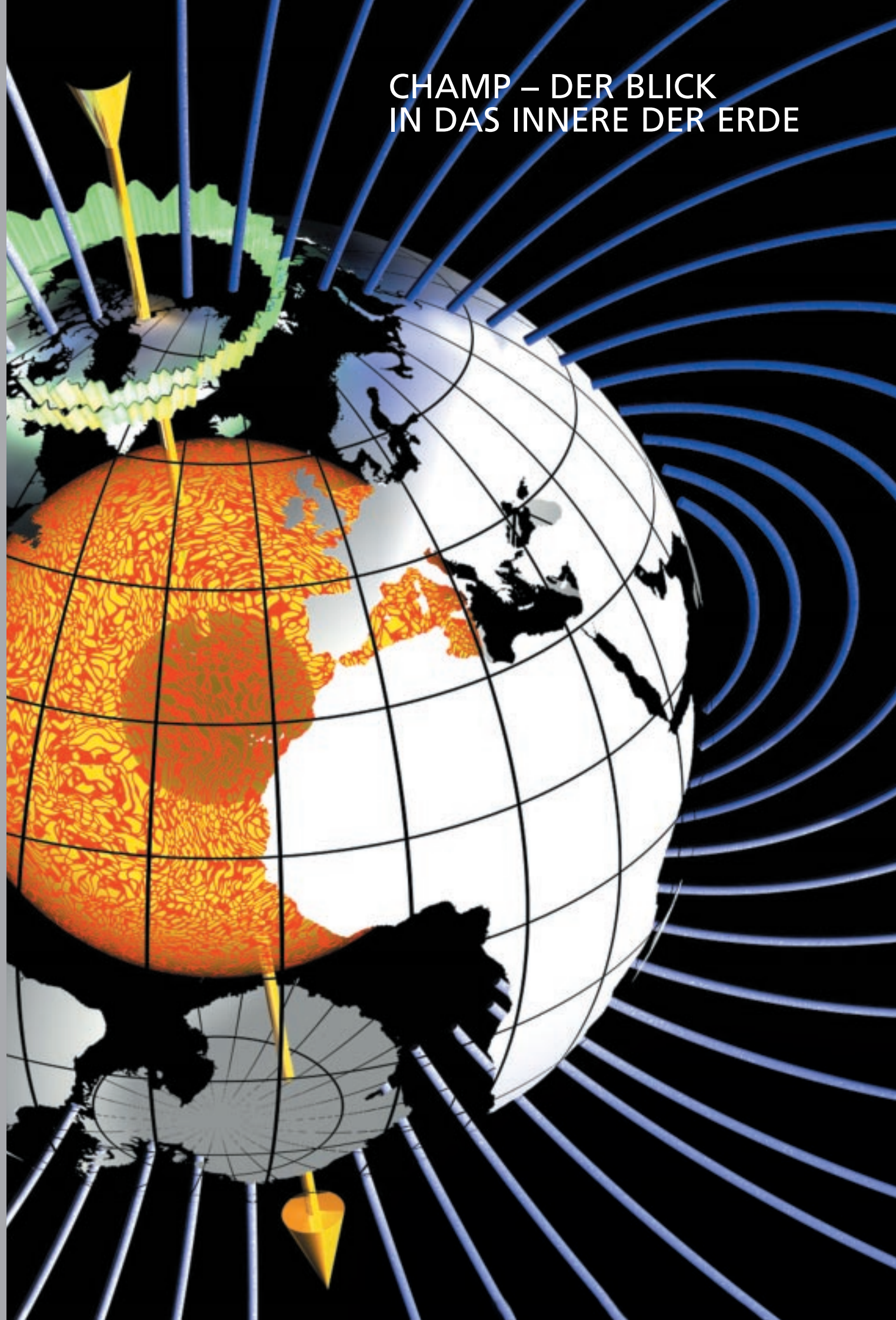
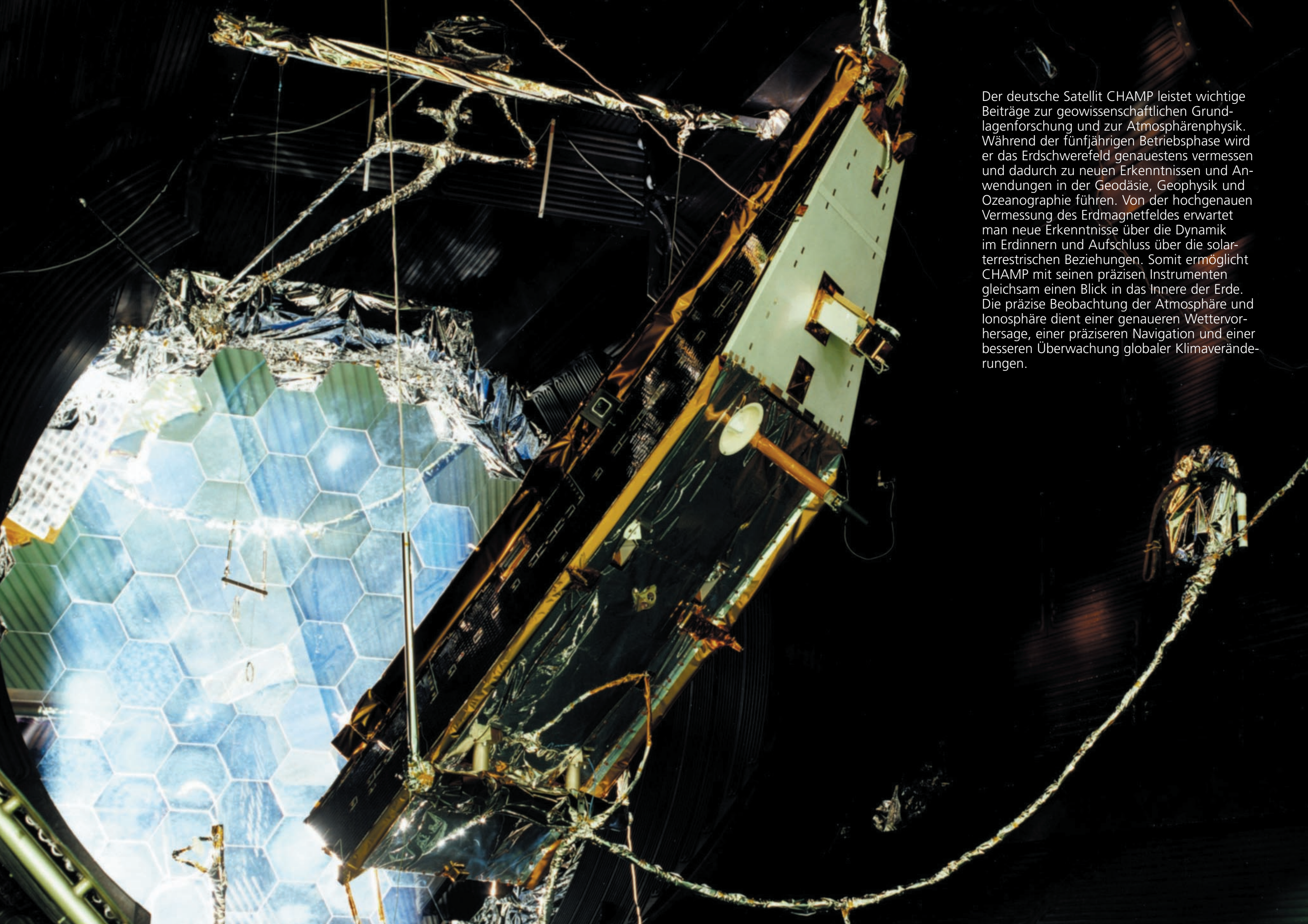
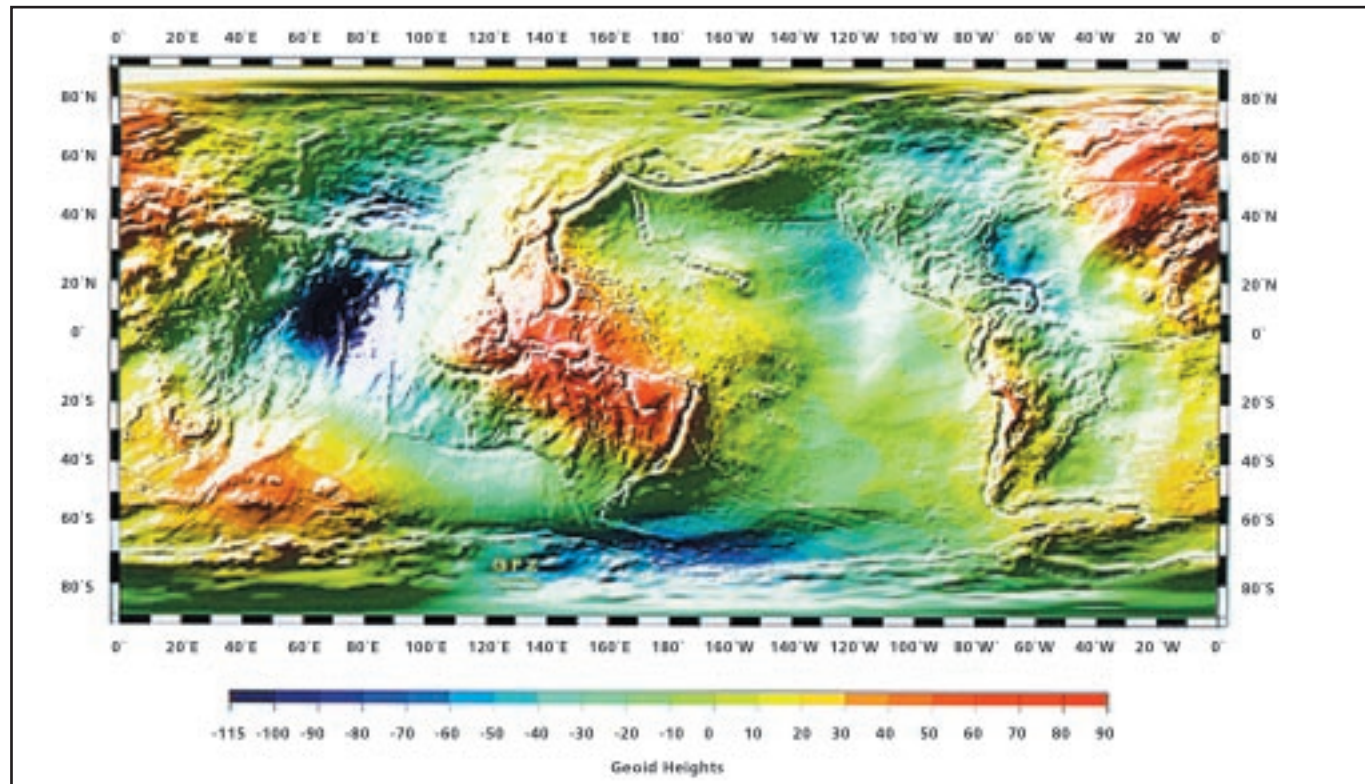


CHAMP – DER BLICK IN DAS INNERE DER ERDE





Der deutsche Satellit CHAMP leistet wichtige Beiträge zur geowissenschaftlichen Grundlagenforschung und zur Atmosphärenphysik. Während der fünfjährigen Betriebsphase wird er das Erdschwerefeld genauestens vermessen und dadurch zu neuen Erkenntnissen und Anwendungen in der Geodäsie, Geophysik und Ozeanographie führen. Von der hochgenauen Vermessung des Erdmagnetfeldes erwartet man neue Erkenntnisse über die Dynamik im Erdinnern und Aufschluss über die solar-terrestrischen Beziehungen. Somit ermöglicht CHAMP mit seinen präzisen Instrumenten gleichsam einen Blick in das Innere der Erde. Die präzise Beobachtung der Atmosphäre und Ionosphäre dient einer genaueren Wettervorhersage, einer präziseren Navigation und einer besseren Überwachung globaler Klimaveränderungen.



Aufgaben und Ziele des Wissenschaftssatelliten CHAMP

Wir leben auf einem dynamischen Planeten, der sich – angetrieben durch großräumige Stoff- und Energieumlagerungsvorgänge in seinem Inneren und durch vielfältige Einwirkungen von außen – in einem ständigen Wandel befindet. Um den Lebensraum Erde in seiner ganzen Vielfalt und Komplexität zu verstehen, ist die Erde als System zu betrachten: ein System, das die festen, flüssigen und gasförmigen Anteile im Erdraum einschließt, die starken raumzeitlichen Veränderungen unterworfen sind und zwischen denen komplizierte Austauschvorgänge auf sehr unterschiedlichen Raum-Zeit-Skalen wirken. Prozesse, die in und auf der Erde ablaufen, sind miteinander gekoppelt und bilden verzweigte Ursache-Wirkungsketten, die durch den Eingriff des Menschen zusätzlich beeinflusst sein können.

Zur Charakterisierung eines so umfassenden und komplexen Systems sind riesige globale und regionale Datensätze notwendig, die möglichst langfristig und gleichzeitig verschiedenste Phänomene und Prozesse erfassen, die sich innerhalb und zwischen den Sub-

systemen abspielen. Entsprechende Rechnerressourcen und mathematisch-physikalische Modellansätze sind unabdingbar, um solche immensen Datenmengen in weiterführende Modellinformation umzusetzen.

Globale Datensätze sind in schneller zeitlicher Abfolge nur mit Satellitentechniken zu gewinnen, die aber wegen der einzuhaltenden minimalen Flughöhe in der Regel ein eingeschränktes Auflösungsvermögen haben. Ein Zusammenspiel von Satellitendaten und Daten von mehr konventionellen Messtechniken an der Erdoberfläche bzw. in den erdnahen Schichten der Erdatmosphäre ist deshalb das geforderte Vorgehen bei der Untersuchung des Gesamtsystems Erde.

Vor diesem Hintergrund zielt die geowissenschaftliche Kleinsatellitenmission CHAMP (**CH**allenging **MI**nisatellite **P**ayload) mit ihrer multifunktionalen und komplementären Nutzlast auf Beiträge zu folgenden Systemkomponenten ab:

- Geosphäre: Untersuchungen zu Struktur und Dynamik im Erdinnern, vom Erdkern über den Erdmantel bis in die Erdkruste, und Untersuchungen zu Wechselwirkungen mit dem Ozean und der Atmosphäre.

- Hydrosphäre: Genauere Beobachtung der Ozeanzirkulation, der globalen Veränderungen des Meeresspiegels und der Kurzzeitschwankungen im globalen Wasserhaushalt sowie Wechselwirkungen mit Wetter und Klima.

- Atmosphäre: Globale Sondierung der vertikalen Schichtung der neutralen und ionisierten Gashölle der Erde mit den Bezügen zum irdischen Wetter und zum sogenannten Weltraumwetter.

Titelbild: Der Blick ins Innere der Erde – wie ihn der Satellit CHAMP ermöglichen wird. Zu erkennen sind der vorwiegend aus flüssigem Eisen bestehende Erdkern und im Zentrum der feste, innere Kern. Die thermisch getriebene Konvektion im flüssigen Kern erzeugt das Magnetfeld der Erde.

Außerhalb der Erde beobachtet man eine Magnetfeldverteilung, die der eines Stabmagneten ähnelt. Lage und Richtung des fiktiven Magneten sind durch den gelben Pfeil angedeutet. In hohen Breiten wirken die Magnetfeldlinien wie Führungszentren für geladene Teilchen. Sie leiten zum Beispiel hochenergetische Elektronen aus dem Weltall auf die Atmosphäre, die dort die spektakulären Polarlichter aufleuchten lassen. (Quelle: GFZ)

Mit CHAMP ist erstmals ein geowissenschaftlicher Satellit in einer sehr niedrigen, nahezu polaren Umlaufbahn instrumentell so ausgestattet, dass gleichzeitig Schwerefeld- und Magnetfeld der Erde mit deutlich verbesserter räumlicher Auflösung beobachtet werden können und dies über einen Zeitraum von fünf Jahren. Damit werden zeitliche Änderungen in den Feldkomponenten gut erfassbar.

Ein zusätzliches Ziel der Mission, das sich aus der erweiterten Nutzung einiger für die Feldbestimmung eingesetzter Instrumente an Bord des Satelliten ergibt, ist die Bestimmung von Zustandsgrößen in den Troposphären-, Stratosphären- und Ionosphären-Schichten der Erde wie z.B. Temperatur, Wasserdampfkonzentration und Elektronendichte.

Das CHAMP-Projekt entstand 1994 als Leitprojekt für die Raumfahrtindustrie in den neuen Bundesländern, ausgehend von einem Projektvorschlag des GeoForschungsZentrums Potsdam (GFZ). Gemeinsam mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und einem Konsortium von Industriefirmen aus den neuen und alten Bundesländern wurden unter der Führung des GFZ Potsdam 1995 und 1996 Machbarkeits- und Designstudien durchgeführt und im Januar 1997 mit der Entwicklung und der Herstellungsphase für die CHAMP-Mission begonnen.

Die Verantwortlichkeiten für die verschiedenen Missionselemente verteilen sich auf

- GFZ GeoForschungsZentrum Potsdam: Projektverantwortung und -management (mit EST, Flöha), Instrumente, Wissenschafts- und Datensysteme

- DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Oberpfaffenhofen/Neustrelitz: Bodensysteme und Satellitenbetrieb, Datenempfang

- DJO Jena-Optronik GmbH, Jena: Satellitenentwicklung und Bau (mit Astrium Friedrichshafen, RST Rostock)

- Cosmos International GmbH, Fuchs Gruppe, Bremen: Startvorbereitung und Startrakete (mit Polyot, Omsk und OHB Bremen)

Internationale Partner haben sich durch kostenlose Gerätebestellungen in die Mission eingebracht. Es sind dies

- NASA, USA: GPS TRSR-2 Bordempfänger (JPL)

- CNES, Frankreich: STAR-Akzelerometer (ONERA)

- AFRL, USA: Ionen-Drift Meter

Wenn CHAMP im Juli 2000 vom russischen Startplatz Plesetsk mit einer COSMOS-Rakete in seine niedrige

polare Umlaufbahn eingeschossen wird, wird eine Dekade der intensiven Schwere- und Magnetfelderkundung eingeläutet und ein neues Fernerkundungsverfahren für atmosphärische Zustandsgrößen in einem präoperationalen Betrieb auf seine Nutzung für die Kurzfristwettervorhersage und Klimaüberwachung hin überprüft. Eine intensive Nutzung der Daten für die Erdsystemforschung und für wichtige praktische Anwendungen ist zu erwarten.

Das Schwerefeld der Erde

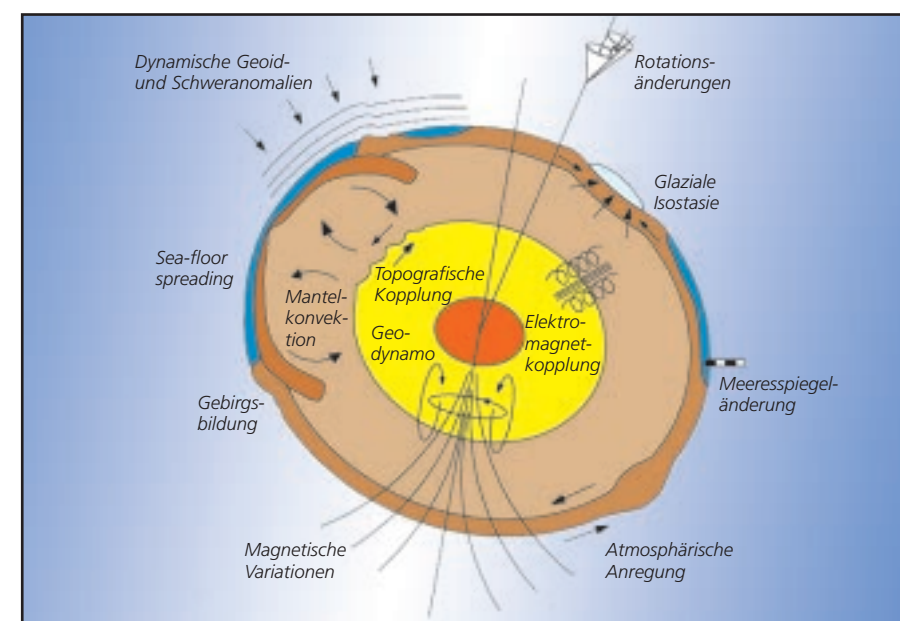
Das globale Schwerefeld der Erde, die Laufzeitinformation von Erdbebenwellen sowie das Magnetfeld der Erde sind die Schlüsselinformation zur Erkundung von Struktur und Dynamik des Erdinnern. Über das Schwerefeld und seine Veränderungen wird es möglich, Wechselwirkungen zwischen dem Ozean, den großen Eisflächen, der Erdkruste und der Atmosphäre zu erfassen und damit Bezüge zum Klima und seinen Veränderungen herzustellen.

Erstmals in dieser Kombination ist CHAMP mit Instrumenten so ausgestattet, dass seine Position und Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt über die von CHAMP aus sichtbaren Satelliten der GPS-Konfiguration bestimmt

Vorhergehende Doppelseite: Genau getestet: Vor dem Start wurden für CHAMP bei der IABG (Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH) in München in der Umwelt- und Simulationsanlage genauestens alle erforderlichen Systemtests durchgeführt. Im Hintergrund ist der Sonnensimulator zu sehen. (Quelle: DJO)

Abb. links oben: Im Geoid mit seinen Beulen und Dellen manifestiert sich die unregelmäßige Massenverteilung der Erde. Das Geoid entspricht der ungestörten Meeresoberfläche, wie sie sich aufgrund der Schwerkraftverteilung einstellt. (Quelle: GFZ)

Abb. links: Dynamische Prozesse im Erdinnern und an der Erdoberfläche sowie ihre beobachtbaren geophysikalischen Signale. (Quelle: GFZ)



werden können und nicht durch das Schwerfeld verursachte Bahnstörungen mit einem Beschleunigungsmesser an Bord direkt gemessen und damit eliminiert werden können. Aus den dann ausschließlich auf das Schwerfeld zurückzuführenden Reststörungen im Bahnverlauf kann auf die räumliche Struktur des globalen Schwerfeldes und seine zeitliche Veränderlichkeit geschlossen werden.

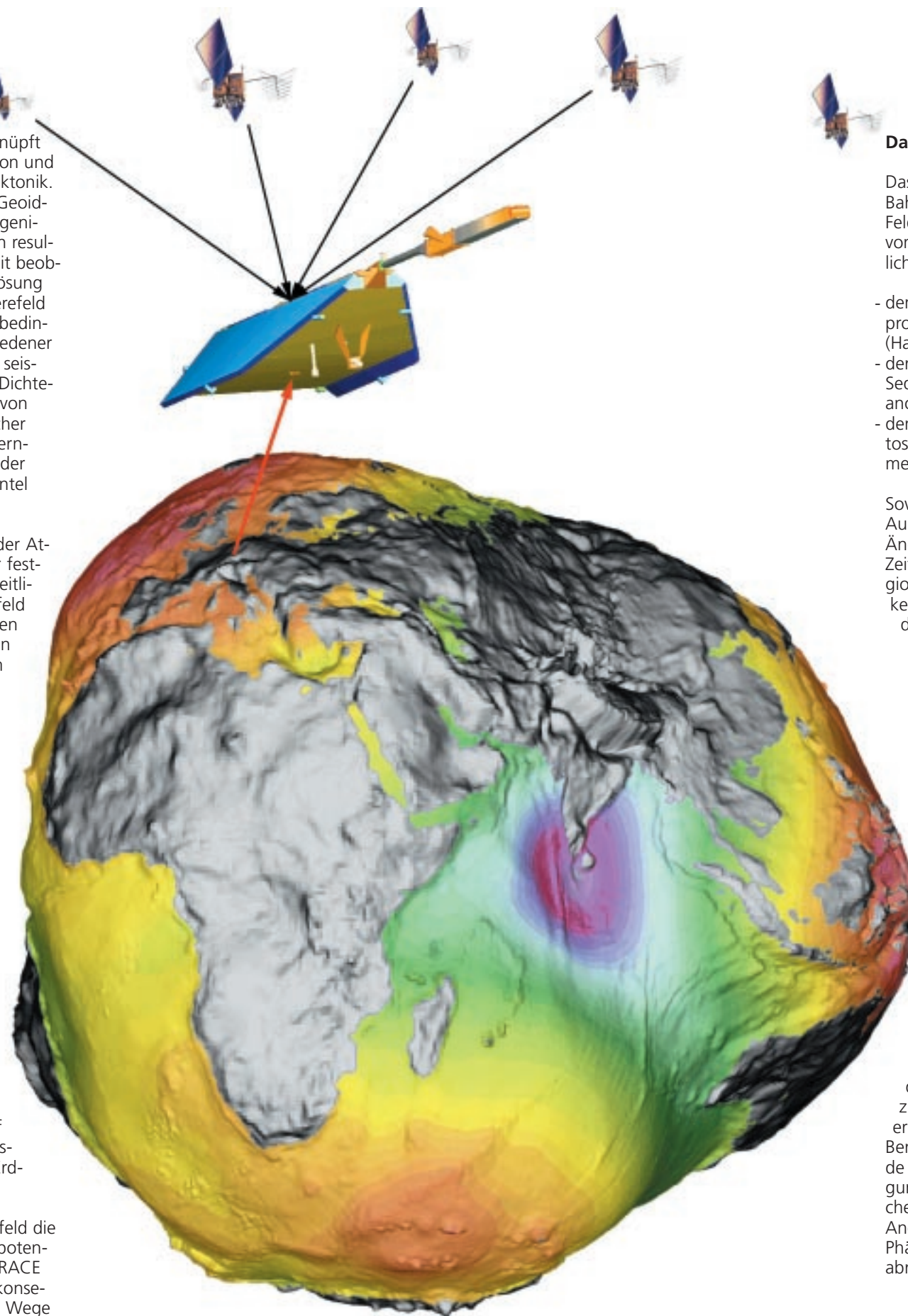
Mit den für die GPS/CHAMP-Inter-satellitenmessungen zu erhaltenden Beobachtungsgenauigkeiten lässt sich für die wichtigste Niveaufläche des Schwerfeldes der Erde – das die ungestörte Meeresoberfläche repräsentierende Geoid – eine Genauigkeitssteigerung von ein bis zwei Zehnerpotenzen gegenüber jetzigen Satelliten-Schwerfeldmodellen erreichen. Diese Genauigkeitssteigerung wird erhebliche direkte und indirekte Auswirkungen auf Fragestellungen der Geodäsie, Geophysik, Ozeanographie und der Satellitennavigation haben. Denn das Schwerfeld bzw. das globale Geoid bildet die Bezugsfläche für alle topografischen Höhen auf den Kontinenten und den Ozeanen und ist die grundlegende Voraussetzung für die genaue Bahnbestimmung von niedrig fliegenden Satelliten. Ein genaues Geoidmodell erfüllt zum Beispiel in der Fernerkundung, Kartographie und Landesvermessung wichtige Aufgaben bei der Erstellung grossräumiger topografischer Geländemodelle, in der Ozeanographie bei der Kartierung der Strömungssysteme und im anbrechenden Zeitalter der intensiven Nutzung von Navigations-, Kommunikations- und Fernerkundungssatelliten bei der genauen Bahnverfolgung dieser Satelliten und der Bereitstellung genauer Navigations- und Bildinformation für den Nutzer.

In der unregelmäßigen Struktur des Schwerfeldes manifestieren sich Dichtunregelmäßigkeiten, die einen wesentlichen Schlüssel zum Aufbau und Verständnis der dynamischen Vorgänge darstellen, die sich im Inneren der Erde abspielen. Schwere- und Magnetfeld sowie seismische Geschwindigkeiten sind die einzigen im Außenraum der Erde messbaren Signale von dynamischen Vorgängen, die im Inne-

ren der Erde ablaufen und verknüpft sind mit z.B. der Mantelkonvektion und ihrer Kopplung an die Plattentektonik. CHAMP wird die langwelligen Geoid-signale, die aus Massenheterogenitäten im Erdmantel und Erdkern resultieren, mit Millimetergenauigkeit beobachten können. Bei dieser Auflösung und Genauigkeit für das Schwerfeld wird CHAMP wesentliche Randbedingungen zur Evaluierung verschiedener Modelle, zur Umwandlung von seismischen Geschwindigkeiten in Dichtewerte und zu Untersuchungen von Struktur- und statisch-dynamischer Massenkompensation an der Kern-Mantel-Grenze und im Bereich der Diskontinuitäten im oberen Mantel liefern.

Mit Massenumverteilungen in der Atmosphäre, dem Ozean und der festen Erde zusammenhängende zeitliche Änderungen im Schwerfeld laufen auf sehr unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen ab und sind in der Regel vom Signal her sehr klein. Bisher konnten solche Änderungen mit einiger Genauigkeit nur für den Ellipsoidanteil des Feldes bestimmt werden. Die lange CHAMP-Missionsdauer und die wiederholte Schwerfeldmodellierung in dreimonatigem Abstand werden es möglich machen, erstmals zwischen verschiedenen Signalen zu unterscheiden, die zu zeitlichen Schwereänderungen führen. Die größten zu erwartenden, mit CHAMP messbaren Signale resultieren aus Massenbewegungen in der Atmosphäre, Grundwasseränderungen, Massenverlagerungen der Ozeanströmung, aus der viskoelastischen Antwort der Lithosphäre auf glaziale Auflasten und aus Massenbewegungen des flüssigen Erdkerns.

CHAMP läutet für das Schwerfeld die internationale Dekade der Geopotenziale ein. Die Folgemissionen GRACE (2001) und GOCE (2005) sind konsequente Erweiterungen auf dem Wege der Detailmodellierung des Schwerfeldes für die Erdsystemforschung.



Das Magnetfeld der Erde

Das mit Satelliten auf erdnahen Bahnen gemessene geomagnetische Feld ist physikalisch die Überlagerung von Magnetfeldern von im Wesentlichen drei Quellen:

- dem im Erdkern ablaufenden Dynamoprozess und Prozessen im Erdmantel (Hauptfeld)
- der Magnetisierung von Gesteinen und Sedimenten in der Erdkruste (Krustenanomalienfeld)
- den in der Erdionosphäre und -magnetosphäre fließenden elektrischen Strömen (Außenfeld).

Sowohl das Innen- als auch das Außenfeld weisen deutliche zeitliche Änderungen auf, deren Perioden das Zeitmaß der Vorgänge in den Quellregionen widerspiegeln. Eine bemerkenswerte rezente Säkularvariation des Hauptfeldes ist die Abnahme des Dipolfeldes.

An Hand von verlässlichen Beobachtungen der vergangenen 150 Jahre, aber auch aus Aufzeichnungen vergangener Jahrhunderte lässt sich schließen, dass die Stärke des Magnetfeldes kontinuierlich abnimmt. Was auf globalem Maßstab wie eine säkulare Variation des Geodynamos aussieht, stellt sich bei lokaler Betrachtung als eine unerwartet differenzierte und dynamische Veränderung dar. Während der letzten 20 Jahre, für die es verlässliche Satellitenmessungen des globalen Magnetfeldes gibt, hat sich das Magnetfeld im Bereich des Südatlantiks bereits um zehn Prozent reduziert. Eine derart dramatische Abnahme führt zum Beispiel zu einem lokal stark erhöhten Strahlungshintergrund. Bereits heute erfahren niedrig fliegende Satelliten 90 Prozent ihrer Schädigungen durch hochenergetische Teilchen im Bereich der südantlantischen Anomalie. Ein weiteres interessantes Phänomen sind die sogenannten Jerks, abrupte Änderungen im Magnetfeld.

Wenn ein solches Ereignis während der CHAMP-Mission auftritt, wird es zum ersten Mal möglich sein, seine globale Raum-Zeit-Struktur zu erfassen. Hieraus lassen sich Rückschlüsse auf die Leitfähigkeit des Materials im Erdmantel ziehen.

Ganz besondere Erwartungen richten sich auf die globale Kartierung der magnetischen Anomalien im Krustenfild. Ein Vergleich dieser Ergebnisse mit anderen Beobachtungen, wie dem Schwerfeld oder der Geologie der Kruste, verspricht ein deutlich klareres Bild der Plattentektonik und des Krustenaufbaus.

Die externen Quellen im Bereich der Hochatmosphäre zeichnen sich durch eine große Variabilität aus. Ihre Ursache sind dynamische Vorgänge auf der Sonne. Zeiten großer magnetischer Unruhe bezeichnet man als „magnetische Stürme“, die sich in hohen Breiten durch Polarlichter manifestieren. Erfahrungen aus der jüngeren Vergangenheit haben gezeigt, dass rapide Magnetfeldänderungen und die damit verbundenen Umkonfigurationen der Plasmapopulation im erdnahen Welt- raum zu empfindlichen Störungen moderner technischer Systeme (z.B. Ausfall von Telekommunikationssatelliten, Zusammenbruch von großen Überlandstromversorgungsnetzen und Schädigungen an langen Pipelines) führen können. CHAMP wird mit seinen Beobachtungen einen Beitrag zur Vorhersage des sogenannten Welt- raumwetters leisten können.

Die internationale Dekade der Geopotenziale wurde im Bereich der Magnetik vom dänischen Satelliten Ørsted eingeläutet. CHAMP und später auch SAC-C werden hierin wichtige Bausteine sein.

Abb.: Das Erdschwerfeld, hier dargestellt durch das Geoid (stark überhöht), lässt sich aus den mittels der GPS-Satelliten beobachteten Bahnstörungen des CHAMP-Satelliten ausmessen. (Quelle: GFZ)



Sondierung der Atmosphäre und Ionosphäre

In jüngster Zeit ist mit der Mission GPS/MET das hohe Nutzungspotenzial für die Fernerkundung der Neutralatmosphäre und Ionosphäre mit GPS eindrucksvoll demonstriert worden. Mit verbesserter Empfängertechnik und einer den Anforderungen der numerischen Wettervorhersage besser angepassten Auswertestrategie soll dieses als Radio-Okkultationstechnik bezeichnete Verfahren auf CHAMP wiederum eingesetzt werden.

Das Verfahren basiert auf der Analyse von Mikrowellen-Signalen, die an Bord von CHAMP von „untergehenden“ GPS-Satelliten beim Durchgang durch die Neutralatmosphäre oder Ionosphäre empfangen werden. Bei stetiger Annäherung an den Horizont wachsen sowohl Brechungswinkel als auch die ausbreitungsbedingte Verzögerung der Signallaufzeit durch das Eintauchen des Strahls in immer dichtere Luftschichten rasch an, so dass hieraus Schlüsse über das Ausbreitungsmedium gezogen werden können. Aus den gemessenen Refraktionsprofilen können dann nach Durchführung geeigneter Korrekturen unter Zugrundelegung von Zusatzannahmen vertikale Druck-

und Temperaturprofile für den tangentialen Bereich der einfallenden Strahlen abgeleitet werden. Die Höhenauflösung der Temperatur beträgt einige 100 Meter, wobei der verbleibende Temperaturfehler theoretisch unter ein Grad Kelvin liegen kann. Derzeitig bekannte Verfahren zur Ableitung meteorologischer Größen aus den Radio-Okkultationsdaten erreichen diese Genauigkeit jedoch noch nicht immer. Ihre Verbesserung und die Validierung der CHAMP/GPS-Messungen mit unabhängigen meteorologischen Daten gehören deshalb zu den vordringlichen wissenschaftlichen Aufgaben dieses Teiles der CHAMP-Mission.

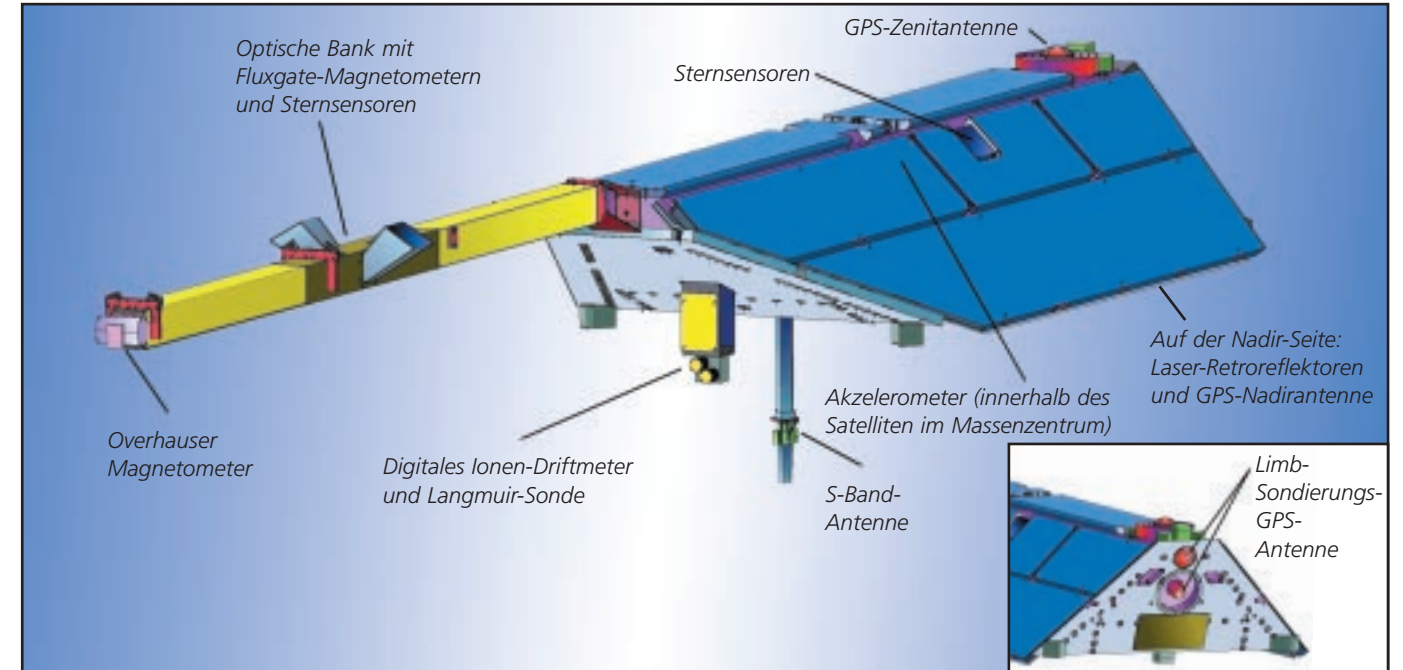
Wegen seines signifikanten Beitrags zum Brechungsindex erschwert vorhandener Wasserdampf eine Temperaturbestimmung in der unteren Troposphäre. Dies bietet auf der anderen Seite aber die Möglichkeit, den Wasserdampf – ein für die Meteorologie und Klimatologie außerordentlich wichtiges Spurengas in der Troposphäre – selbst in diesem Bereich zu bestimmen.

Neben diesen wichtigen Beiträgen zur Beobachtung des irdischen Wettergeschehens liefern die mit dem GPS-Empfänger, dem Akzelerometer, dem Ionendriftmeter und den Magnetometern an Bord von CHAMP zu gewin-

nenden Daten und Ergebnisse vielfältige Möglichkeiten für die weitere Erforschung und Überwachung des Weltraumwetters.

Gerade bei den im Jahr 2000 zu erwartenden turbulenten Weltraumwetterlagen und den damit verbundenen möglichen Störungen in einer Reihe von technischen Systemen (z.B. Hochspannungsnetze, Navigationssysteme, Satelliten) ist diese durch CHAMP gegebene Möglichkeit der Überwachung von großer praktischer Bedeutung. CHAMP wird einer der ersten Satelliten sein, der dieses vielversprechende globale Verfahren der Radio-Okkultations-Messungen in Verbindung mit Messungen weiterer Sensoren kontinuierlich nutzt. Damit wird im Zusammenspiel mit den Messungen von Folgesatelliten mit ähnlicher Geräteausstattung (SAC-C, GRACE) der Weg für ein neues effizientes Fernerkundungsverfahren der Atmosphäre eröffnet, das mit Messungen über den Ozeanen, Kontinenten und Polargebieten die bestehenden Lücken im meteorologischen Beobachtungsnetz schließen hilft.

Abb.: Der CHAMP-Satellit nach der Fertigstellung mit eingeklapptem Ausleger. (Quelle: GFZ)



Wissenschaftliche Instrumente

An Bord von CHAMP befinden sich sieben verschiedene Beobachtungsinstrumente, die in unterschiedlicher Kombination für die Magnetfeld-, für die Schwerefeld- und für die Atmosphärensondierung eingesetzt werden.

GPS-Empfänger

Der von NASA/JPL beigestellte Turbo Rogue Space Receiver (TRSR) besteht aus einem 16-Kanal-Empfänger und vier Antennen (eine in Richtung Zenit, eine in Nadir-Richtung und zwei in Gegen-Flugrichtung). Mit der zenitweisenden Antenne können bis zu zwölf Satelliten gleichzeitig empfangen werden und aus den Trackingdaten die bordseitige Navigationslösung bzw. in der Offline-Prozessierung die präzise Bahn des CHAMP-Satelliten gewonnen werden. Eine Helix-Antenne an der Unterseite des Satelliten soll den Empfang von GPS-Signalen ermöglichen, die von der Meeres- oder Eisoberfläche rückgestrahlt werden. Mit den zwei auf der Rückseite des Satelliten angebrachten Antennen können Signale der am Horizont auf- oder untergehenden GPS-Satelliten für die Atmosphärensondierung empfangen werden.

Laserretroreflektor

Ein vom GeoForschungsZentrum Potsdam gefertigter Laserreflektor in einem neuartigen Design ist an der Unterseite des Satelliten angebracht und dient der zentimetergenauen Entfernungsbestimmung zwischen Laser-Bodenstationen und dem CHAMP-Satelliten.

Akzelerometer

Das von der französischen Raumfahrtbehörde CNES beigestellte elektrostatische Akzelerometer STAR dient der Messung aller nichtgravitativen Beschleunigungen, die auf den CHAMP-Satelliten einwirken. Das von ONERA entwickelte und gebaute Instrument misst die Beschleunigungen bis 10 m/s^2 bei einer Auflösung von $3 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$. Zwei starr mit der Sensoreinheit des Akzelerometers verbundene Sternsensoren dienen dazu, die genaue inertielle Lage des Akzelerometers im Raum festzulegen.

Overhauser und Fluxgate Magnetometer

Das von der französischen Firma LETI hergestellte Overhauser-Magnetometer misst skalar die Magnetfeldstärke am Ort des Sensors. Es dient als magnetisches Referenzinstrument und wird zur Kalibrierung der beiden Fluxgate-Magnetometer verwendet. Mit letzteren

werden alle drei Komponenten des Magnetfeldvektors ausgemessen. Um auch hier die Lage der Sensorachsen im Raum genau orientieren zu können, sind zwei Sternsensoren auf einer optischen Bank zusammen mit den Fluxgate-Magnetometern untergebracht. Die Fluxgate-Magnetometer wie auch die Sternsensoren wurden von der Dänischen Technischen Universität gebaut.

Digitales Ionendriftmeter

Das vom amerikanischen Air Force Research Laboratory (AFRL) beigestellte Ionendriftmeter misst in erster Linie die Geschwindigkeit der den Satelliten frontal anströmenden Ionen. Diese Geschwindigkeit ist die Summe aus der Strömungsgeschwindigkeit der Ionen und der Fluggeschwindigkeit des Satelliten. Bei Kenntnis der Ionen-geschwindigkeit ist es möglich, das elektrische Feld der Umgebung zu bestimmen.

Abb.: Die wissenschaftlichen Instrumente an Bord von CHAMP. (Quelle: GFZ)

GeoForschungszentrum Potsdam

Das GFZ Potsdam ist das 1992 gegründete nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für die Geowissenschaften. Forschungsgegenstand des Zentrums ist das System Erde. Neben grundlagenspezifischen Forschungsaktivitäten unterstützt das GFZ die geowissenschaftliche Forschung in Deutschland durch Koordination, Logistik und apparative Hilfestellung in gemeinsamen Projekten und in internationaler Kooperation. Mit seiner Struktur und rund 600 Mitarbeitern umfasst das GFZ alle Disziplinen der festen Erde von der Geodäsie über die Geophysik, Geologie und Mineralogie bis zur Geochemie in einem multidisziplinären Forschungsverbund. Es war deshalb nur konsequent, dass das GFZ 1994 in die Diskussion um die Realisierung eines Leitprojektes für die Raumfahrtindustrie in den neuen Bundesländern eine Kleinsatellitenmission zur übergeordneten Thematik „Erdsystemforschung“ einbrachte.

Projektzuständigkeiten der Partner

Das CHAMP-Projekt wurde durch die Projektphasen A, B und C/D über eine 80-prozentige Zuwendung des Bundes an das GFZ Potsdam und jeweils zehn Prozent Eigenmittel der HGF-Einrichtungen GFZ und DLR finanziert. Dem entsprechend lag die Gesamtverantwortung für das Projekt beim GFZ Potsdam, das den Projektleiter stellte und in der Betriebsphase nach dem Start den CHAMP-Projekt-Direktor stellt. Die technisch-wissenschaftliche Zuständigkeit des GFZ erstreckt sich in der Entwicklungs- und Betriebsphase auf die technische Begleitung der Satellitenherstellung, die wissenschaftlichen Geräte an Bord des Satelliten, die Wissenschafts- und Datensysteme und

die Koordination der wissenschaftlichen Nutzer. Das DLR ist in allen Phasen des Projektes für die Bodensysteme, den Satellitenbetrieb und den Empfang der Kontroll- und Wissenschaftsdaten zuständig. Der Satellit wurde von der Jena-Optronik GmbH in Gemeinschaftsarbeit mit Astrium (vormals DSS Friedrichshafen) und RST Rostock entwickelt und gebaut. Mit der Beschaffung der COSMOS-Rakete (Polyot, Omsk), der Fertigung des Raketenadapters und den Vorbereitungen am Startplatz Plesetsk wurde die Firma COSMOS International der Fuchs Gruppe Bremen beauftragt.

Das GFZ war von Anbeginn des Projektes CHAMP in den verschiedenen Projektphasen

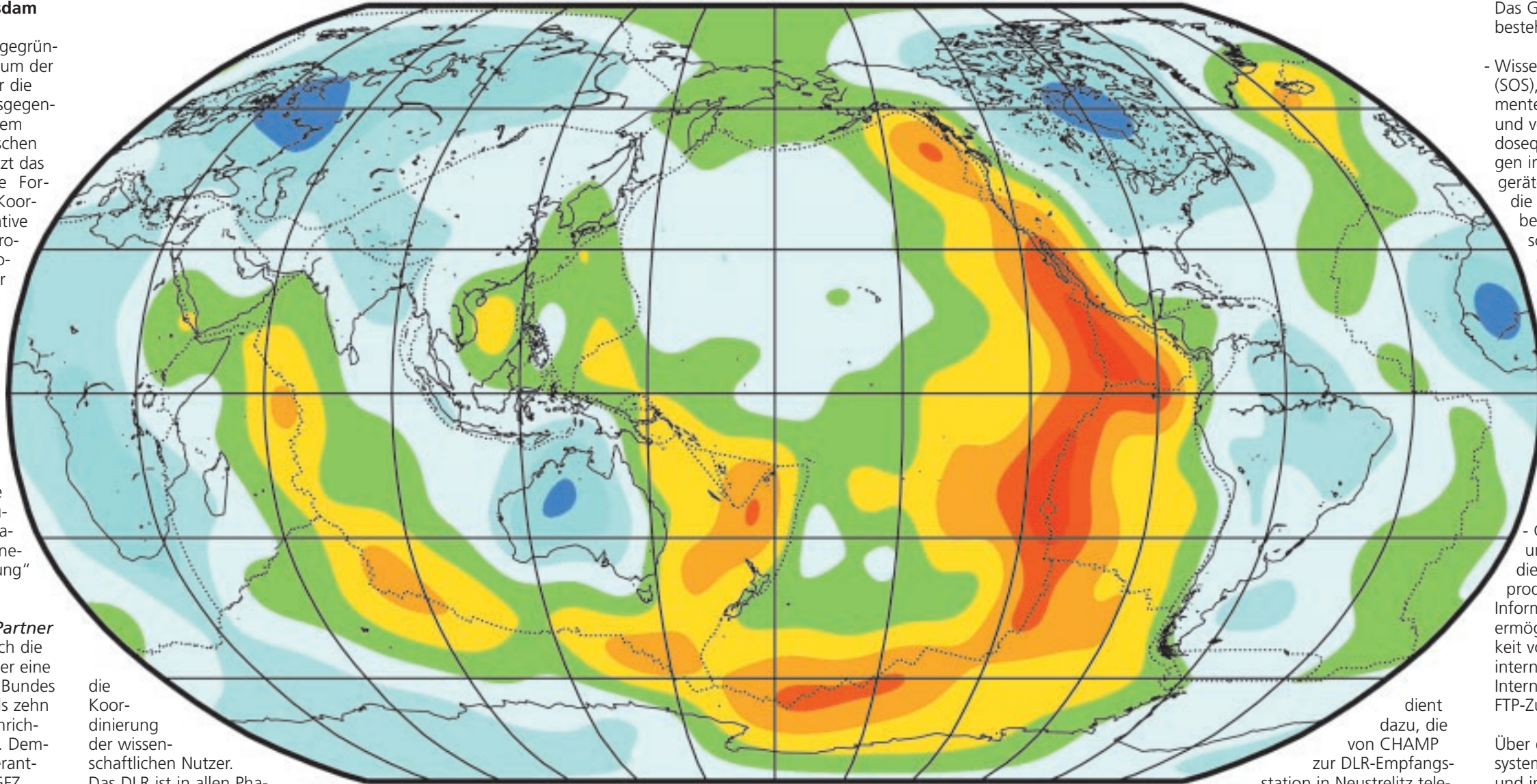
- Phase A: 10/94 - 03/95: Definition und Machbarkeit
- Phase B: 11/95 - 10/96: Design und Anforderungen
- Phase C/D: 01/97 - 5/00: Entwicklung und Herstellung

für das Projektmanagement, die Festlegung der wissenschaftlichen Zielsetzungen, die Definition der Anforderungen an die wissenschaftliche Nutzlast und die Erstellung der Missions- und

Systemspezifikationen zuständig. In der Entwicklungs- und Herstellungsphase war es neben dem allgemeinen Projektmanagement und der Projektkontrolle zuständig für die Bereitstellung, die Tests und die Überwachung der Nutzlastinstrumente und auch für den Aufbau, die Tests und die Inbetriebnahme der Wissenschaftsdatensysteme.

Das CHAMP Wissenschaftsdatensystem

Das vom GFZ Potsdam entwickelte und während der Mission von verschiedenen Abteilungen des Zentrums betriebene Wissenschaftsdatensystem



Das GFZ-Wissenschaftsdatensystem besteht aus dem

- Wissenschaftsdaten-Betriebssystem (SOS), in dem die empfangenen Instrumentendaten entschlüsselt, überwacht und vorverarbeitet werden, Kommandosequenzen für Parameteränderungen in den wissenschaftlichen Bordgeräten erstellt werden und über das die Verbindung zwischen dem Verarbeitungssystem für die Wissenschaftsdaten (SDS) und dem Missions-Betriebssystem (MOS) des DLR hergestellt wird.
- Wissenschaftsdaten-Verarbeitungssystem (SDS), in dem die vorverarbeiteten wissenschaftlichen Daten zu Bahn-/Schwerfeld-, Magnetfeld- und Atmosphären/Ionosphären-Produkten verarbeitet werden. Hierbei werden die Datenveredelungsklassen 2 bis 4 unterschieden.
- CHAMP-Informationssystem und Datenzentrum (ISDC), das die Daten, Metadaten und Datenprodukte langzeitspeichert, gezielte Informations- und Produktrecherchen ermöglicht und die Online-Verfügbarkeit von Daten und Produkten für interne und externe Nutzer per www-Internetbrowser oder über direkten FTP-Zugriff gewährleistet.

Über das CHAMP-Wissenschaftsdatensystem plant das GFZ die nationalen und internationalen Nutzer von CHAMP-Daten mit korrigierten und kalibrierten Daten und mit einer Vielzahl von Standardprodukten verschiedener Bearbeitungstiefe über die gesamte Missionsdauer zu bedienen.

Abb.: Schwerefeldsignatur der Dichteverteilung im oberen Erdmantel bis 350 Kilometer Tiefe als Ergebnis einer gemeinsamen Analyse von Schwerefeld und seismischer Tomographie. Die Farbskala reicht von Rot (Schweredefizit = geringere Dichte, wärmer) bis Blau (Schwereüberschuss = höhere Dichte, kühler). (Quelle: GFZ)



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Beim Projekt CHAMP hat das DLR zwei wichtige Aufgaben: Es initiierte das Projekt und erfüllt bei der Steuerung des Satelliten und dem Datenempfang wichtige Funktionen.

Das Raumfahrt-Kontrollzentrum

Die Betriebsphase von CHAMP ist auf fünf Jahre ausgelegt. Während dieser Zeit kommt dem Deutschen Raumfahrt-Kontrollzentrum des DLR in Oberpfaffenhofen eine wichtige Aufgabe zu: Es ist für den Betrieb, die

Kontrolle des Satelliten sowie den Datenempfang zuständig. Die eigentliche Aufgabe des Raumfahrt-Kontrollzentrums beginnt nach dem Start von CHAMP im russischen Kosmodrom Plesetsk mit der ersten Kontaktaufnahme zum Satelliten. Die COSMOS-Trägerrakete bringt CHAMP in eine kreisförmige Umlaufbahn in 460 Kilometer Höhe über der Erde. Die Aufstiegsbahn führt dabei fast über den Nordpol, bei einer Inklination von 87 Grad gegenüber dem Äquator. Diese Bahn wird der Satellit praktisch – mit Ausnahme einer langsam abnehmenden Flughöhe – fünf Jahre beibehalten, wobei er jeden Ort der Erdoberfläche wiederholt überfliegt.

Nach einer Aufstiegsphase von etwa 30 Minuten ist der endgültige Orbit erreicht, und die Oberstufe der Rakete trennt den Satelliten über den Hawaii-Inseln ab. Bereits hier versucht man, den Satelliten optisch zu erfassen, mittels einiger im pazifischen Raum befindlicher Laser-Tracking-Stationen. Endgültig geschieht die erste Kontaktaufnahme ca. 20 Minuten nach Separation über der NASA-Bodenstation McMurdo in der Antarktis. Diese Bodenstation gehört neben den beiden weiteren Stationen Poker Flat (in Alaska) und Svalbard (auf Spitzbergen) zum Polar-Netzwerk der NASA, das im

Rahmen einer Kooperationsvereinbarung zwischen DLR und NASA für die erste Phase der CHAMP-Mission und auch zur eventuellen Notfallunterstützung zur Verfügung steht. Die geographische Lage dieser Bodenstationen in extremen nördlichen und südlichen Breiten ermöglicht eine Kontrolle der Satellitenmission auf nahezu jeder Erdumkreisung.

Die ersten Daten des Satelliten werden über das Kommunikationsnetzwerk von NASA und DLR direkt zum Raumfahrt-Kontrollzentrum des DLR nach Oberpfaffenhofen geschickt. Dort beginnt dann die erste wichtige Phase

der Mission: der Kontakt zu CHAMP auf seiner tatsächlichen Flugbahn, die Analyse des Zustandes, das Austesten der Funktionsbereitschaft aller Systeme sowie dessen Konfiguration für seine eigentlichen wissenschaftlichen Aufgaben. Das Ausklappen des Auslegers mit den empfindlichen und hochgenauen Sensoren, die Inbetriebnahme des autonomen Bordsystems zur Positions- und Lagebestimmung (auf Basis von Daten der GPS-Satelliten sowie der eigenen Sternsensoren) und die Kommandierung auf immer genauere Modi des Lageregelungssystems sind nur einige Beispiele dafür. Für diesen Zweck und auch zur Kontaktierung des Satelliten während der fünfjährigen Missionsdauer sind die beiden Antennen der DLR-Bodenstation Weilheim das Hauptinstrument – unterstützt in den ersten 30 Stunden vom Polar-Netzwerk der NASA.

Danach liegen die Kontrolle und der Betrieb von CHAMP ausschließlich in der Hand des Deutschen Raumfahrt-Kontrollzentrums. Das umfangreiche Arbeitsprogramm für den Satelliten und seine Systeme und Sensoren wird im Kontrollzentrum zusammengestellt und in komplexe Kommandosequenzen umgesetzt. Diese werden während der zirka zehn Minuten andauernden Stationsüberflüge von Weilheim zum Satelliten übertragen, innerhalb derer auch die gespeicherten Daten über eine hochratige Datenverbindung (1Mbps) zum Boden gebracht werden müssen. Aufgrund der durch die Satellitenbahn begrenzten Sichtbarkeiten über den DLR-Bodenstationen (rund vier- bis sechsmal pro Tag für jeweils maximal zehn Minuten) bedarf dieser gesamte Prozess einer exakten Planung der Messungen an Bord sowie auch der Einsatzplanung der am Boden verfügbaren Ressourcen. Diese Betriebsplanung, Berichte über das Satellitenverhalten sowie Betriebsanfragen werden über die Schnittstelle des MSI (Mission-, Science- and Operations-Interface) mit dem GFZ in Potsdam und damit mit wissenschaftlichen Nutzern weltweit ausgetauscht und abgestimmt.

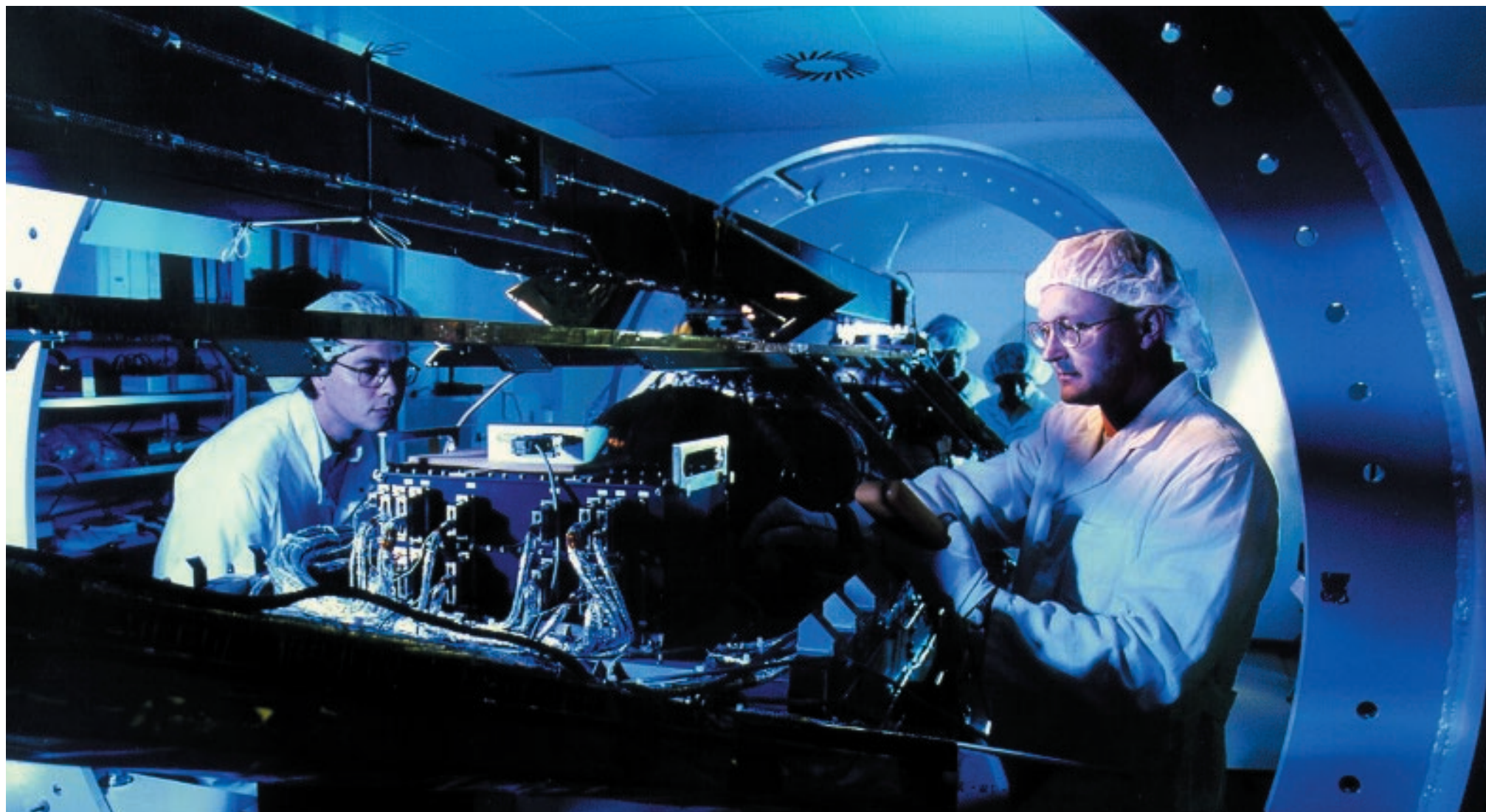
Rohdatenzentrum in Neustrelitz
Nach einer mehrwöchigen intensiven Phase der Inbetriebnahme verlagert sich der Schwerpunkt im Routinebetrieb auf die Gewinnung von Messda-

ten zum Gravitations- und Magnetfeld der Erde, sowie der Ionosphäre und Atmosphäre. Diese im Massenspeicher an Bord kontinuierlich gesammelten Daten werden regelmässig bei Überflügen über Deutschland zur Bodenstation Neustrelitz (DLR) übertragen, wo die wissenschaftliche Daten direkt extrahiert und im ebenfalls in Neustrelitz angesiedelten Rohdatenzentrum (Raw Data Center – RDC) archiviert und für die Weitergabe an das GFZ vorbereitet werden. Hier befindet sich auch das nationale Bodensegment des ebenfalls zum DLR gehörenden Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums (DFD), das eine Vielzahl an Daten von hochauflösenden Fernerkundungssatelliten, aber auch wissenschaftlichen Kleinsatelliten, empfängt.

Die vom Satelliten CHAMP im Mittel viermal täglich gesendeten Daten werden zunächst auf einem Plattensystem in Echtzeit gespeichert. Danach werden aus dem Datenstrom gezielt Informationen über die einzelnen Sensoren und den Satelliten extrahiert und an das Betriebszentrum der Mission in Oberpfaffenhofen übermittelt sowie an das wissenschaftliche Zentrum der Mission am GFZ in Potsdam weitergeleitet. Von dort erfolgt die weitere Veredelung und Auswertung der Daten sowie die Weitergabe an die internationale Forschergemeinschaft.

Nach der Inbetriebnahmephase von mehreren Wochen werden die Daten von CHAMP rund fünf Jahre lang rund um die Uhr – teilweise hochautomatisiert – empfangen. Erstmals kommt bei einer Kleinsatellitenmission die neue Datenmanagement-Infrastruktur des DFD zum Einsatz, die missionsübergreifend den gesamten Produktlebenszyklus einschließlich Robotarchivierung begleitet. Die empfangenen, sogenannten Rohdaten von CHAMP werden im Rohdatenzentrum (RDC) in Neustrelitz zur Sicherung langfristig archiviert.

Abb.: Die 30-Meter-Antenne des DLR in Weilheim/Lichtenau wird für die Kommando-gabe, den Telemetrie-Datenempfang sowie die Bahnvermessung von interplanetaren Raumsonden eingesetzt. (Quelle: DLR)



Jena Optronik GmbH

Die Jena-Optronik GmbH wurde als Hauptauftragnehmer im April 1997 vom GeoForschungsZentrum Potsdam mit der Entwicklung, Fertigung, Test und Lieferung des Satelliten beauftragt. Das Auftragsvolumen belief sich auf 30,5 Millionen Mark.

Ein integriertes Industrieteam, an dem Astrium (ehemals Dornier Satellitensysteme GmbH in Friedrichshafen) und die RST Raumfahrt und Umweltschutz GmbH aus Rostock unter Führung des Unternehmens in Thüringen beteiligt waren, nahm seine Arbeit auf. Dabei griff man auf die umfangreichen Erfahrungen von Astrium im Satellitenbau zurück.

CHAMP entstand aus dem bei Astrium entwickelten Flexbus-Konzept, welches den erfolgreichen Einstieg in die Entwicklung und Fertigung von Kleinsatelliten ermöglicht. Der Erfolg dieses Konzeptes basiert auf der Entwicklung kostengünstiger und intelligenter Komponenten, die den Entwicklungs- und Testablauf sowie den operationellen Betrieb des jeweiligen Satelliten wesentlich vereinfachen. Neben Aufgaben für wissenschaftliche Missionen kann Flexbus auch für die Erkundung, Kommunikation und Navigation ausgerüstet und eingesetzt werden.

Ein zweites Projekt auf der Grundlage von Flexbus ist die Gravitationsfeldmission Grace für die amerikanische Raumfahrtbehörde NASA. Zudem besteht weltweites Interesse, das flexible Konzept mit seinen intelligenten und

preisgünstigen Komponentenlösungen für kommerzielle Raumfahrtprojekte einzusetzen.

Durch das Flexbus-Konzept von Astrium wurde CHAMP zu einem vergleichsweise kostengünstigen Forschungsprojekt.

Die Jena-Optronik verantwortete in der Hauptauftragnehmerrolle im integrierten Team (IT) das Management des gesamten Projektes CHAMP. Dazu zählten alle System-Engineering-Arbeiten, das technische Konzept sowie die Definition der erforderlichen Subsysteme auf Spezifikationsebene, und das Unternehmen betreute zudem Entwicklung und Bau des Satelliten während der gesamten Projektlaufzeit

minium-Sandwich-Struktur, die zur Erhöhung der Steifigkeit zusätzlich eine Verstärkung erhielt.

Die wichtigsten Einzelkomponenten, die integriert wurden, waren unter anderem:

- Akzelerometer zur Bestimmung der auf den Satelliten wirkenden Störbeschleunigungen.
- Ein GPS-Empfänger, um die genaue Position und Geschwindigkeit von CHAMP zu bestimmen.
- Ein Laser Retro Reflektor zur Bestimmung der Entfernung zwischen dem Satelliten und der Bodenstation mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich.

Um die wissenschaftlichen Missionsziele zu erfüllen, mussten anspruchsvolle technische Lösungen realisiert werden:

- Integration des Akzelerometers innerhalb des Satellitenschwerpunktes mit einer maximalen Abweichung von +/- 2 mm über die gesamte Missionsdauer
- Integration des Laser Retro Reflektors innerhalb eines Radius von 5 mm vom Schwerpunkt des Satelliten
- Symmetrische Anordnung der Kaltgastanks um den Schwerpunkt des Satelliten
- Optimierung des Satelliten bezüglich eines minimalen atmosphärischen Widerstands

Die Jenaer Spezialisten arbeiteten an verschiedenen Arbeitspaketen mit, wobei sie in einigen Aufgabenbereichen auch die Systemführung inne hatten. Dazu zählen unter anderem:

- System Control SW Engineering
- Basic & Interface SW
- Entwicklungsumgebung, SW Versions- und Konfigurationskontrolle
- AOCS Engineering (Attitude and Orbit Control System)
- Operation Engineering

Als eine Hauptkomponente des Satellitensystems hat die Jena-Optronik das Software-Paket OBDH (On-Board Data Handling) entwickelt und geliefert. Diese Software ist für das sichere Funktionieren und Zusammenspiel aller Teilsysteme des Satelliten zuständig – für die Erfassung und Verarbeitung der System- und Instrumentendaten, die Gewährleistung aller Betriebsmodi, die

Aufbereitung der Daten zur Übertragung zum Boden sowie der zur Kommandoausführung vom Boden empfangenen Daten.

Eine verantwortungsvolle Aufgabe übernahm das Unternehmen auch mit den Integrations- und Funktionstests des Satelliten, die alle erfolgreich verliefen. Die Integrationsarbeiten fanden bei Astrium in Friedrichshafen und bei Jena-Optronik in Jena statt. Bei der IABG in Ottobrunn bei München wurde ein umfangreiches Verifikations-Testprogramm durchgeführt. Im Ergebnis der elektromagnetischen Verträglichkeitsuntersuchungen, der Überprüfung der mechanischen und akustischen Belastungen und schließlich der Tests unter Weltraumbedingungen in der Vakuumkammer der IABG konnten die erforderlichen Parameter des Satellitensystems bestätigt werden. Danach erfolgte der Transport zum russischen Startplatz nach Plesetzsk.

Mit der Realisierung des Kleinsatelliten CHAMP hat die Jena-Optronik ihre Systemfähigkeit auf diesem Gebiet nachdrücklich bestätigt und weiter ausgebaut.

Abb.: Präziser Zusammenbau: Die einzelnen Elemente von CHAMP werden bei der elektrischen Integration Stück für Stück umfangreichen Tests unterzogen. (Quelle: DJO)

GeoForschungsZentrum Potsdam

Das GFZ wurde 1992 als nationales Zentrum für die Geoforschung auf dem traditionsreichen Potsdamer Telegrafenberg gegründet. Das GFZ umfasst mit seinen heute etwa 600 Mitarbeitern alle Disziplinen der Wissenschaften der festen Erde von der Geodäsie über die Geophysik, Geologie und Mineralogie bis zur Geochemie in einem multidisziplinären Forschungsverbund.

Forschungsgegenstand des GFZ ist das „System Erde“, d.h. der Planet, auf dem wir leben, mit den in seinem Innern und an der Oberfläche ablaufenden geodynamischen, physikalischen und chemischen Prozessen sowie den komplexen Wechselbeziehungen zwischen den Subsystemen Geo-, Hydro-, Bio- und Atmosphäre.

Ziel ist es, über das Prozessverständnis zu einem effizienteren Geo- und Umweltmanagement zu gelangen und zur Lösung hochaktueller Probleme von globaler Bedeutung in internationaler Kooperation beizutragen. Satelliten-, Flugzeug- und Boden-gestützte Messsysteme sowie Laborexperimente sind wichtige Elemente für die Erreichung dieses Zieles.



Jena-Optronik GmbH

Die Jena Optronik GmbH besteht als eigenständige Firma seit Ende 1991. Sie ist ein Unternehmen der Astrium GmbH und der Jenoptik-Gruppe. Die Jena-Optronik beschäftigt ca. 115 Mitarbeiter und hat ihren Sitz in Jena, einem Zentrum der deutschen Optikindustrie.

Aufbauend auf den ca. 30-jährigen Erfahrungen in der Entwicklung von Raumfahrttechnik und den grundsätzlichen Kompetenzen in der Opto-Elektronik, der bildgebenden Sensorik und bildverarbeitenden Elektronik sowie Software konzipiert, entwickelt, fertigt und qualifiziert die Jena-Optronik hochwertige Systeme für Anwendungen in der Raumfahrt und auf der Erde für den gesamten Prozess von der Datengewinnung bis zur Verarbeitung und aufgabenspezifischen Interpretation.

Wesentliche Produktgruppen der Jena-Optronik sind:

- Lagemesssensoren für die Raumfahrt
- Optische Systeme für Raumfahrt-Forschung und Erdbeobachtung
- Satelliten-on-board-Software und Erdbeobachtungs-Datenprozessoren
- Intelligente optische Messsysteme für die medizinische Diagnose und biochemische Analyse
- Satellitendatenauswertungs-Dienstleistungen



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Das DLR ist das nationale Zentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. So betreibt das DLR umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in nationaler und internationaler Kooperation. Über die eigene Forschung hinaus ist das DLR als Raumfahrtagentur im Auftrag der Bundesregierung für die Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig.

Mit ca. 4.500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern verfügt das DLR über acht Standorte in Köln-Porz (Sitz des Vorstands), Berlin, Bonn, Braunschweig, Göttingen, Lampoldshausen, Oberpfaffenhofen und Stuttgart sowie Büros in Brüssel, Paris und Washington.

