

Erdfernerkundung

## TanDEM-X – hochpräzise 3D-Landvermessung aus dem All

Earth Remote Sensing

## TanDEM-X – High-Precision Spaceborne 3D Surveying

Seite 4/page 4



### Erdbeobachtung: CryoSat-2

Earth Remote Sensing: CryoSat-2 12

### Extraterrestrik: STEREO

Space Science: STEREO 18

### Exploration: Kaguya/SELENE

Exploration: Kaguya/SELENE 24

### Trägersysteme: Europas

Weltraumbahnhof Kourou  
Launcher Systems: Europe's Spaceport Kourou 30

### Forschung unter Weltraumbedin- gungen: Nobelpreis für Ada Yonath

Research under Space Conditions: Nobel Prize  
awarded to Ada Yonath 36

### Deutsche Raumfahrt- Missionen: Azur

German Space Missions: AZUR 44

### Raumfahrt-Kalender

Space Calendar 50



**Dr. Rolf Densing,**  
Programmdirektor der  
DLR Raumfahrt-Agentur

Dr. Rolf Densing,  
DLR Space Agency's  
programme director

### Liebe Leserinnen und Leser,

mit COUNTDOWN Nr. 12 halten Sie die erste im neuen Layout erscheinende Ausgabe in der Hand. Im Rahmen dieses Relaunches wurden die tragenden Pfeiler der DLR-Magazinfamilie optisch aufgefrischt und einander angeglichen sowie inhaltlich schärfer voneinander getrennt: die DLR-Nachrichten – ab jetzt: „DLR-Magazin“ – mit Themen aus der DLR-eigenen Forschung und Entwicklung in Luft- und Raumfahrt, Energie, Verkehr und Sicherheit auf der einen Seite, sowie die COUNTDOWN, die über aktuell von der Raumfahrt-Agentur betreute Förderprojekte in Forschungsinstitutionen und Industrie berichtet, auf der anderen Seite. Wie finden Sie das Ergebnis? Über Ihre Zuschriften freuen wir uns!

Noch eine wesentliche Neuerung: Nach der Berufung von Gerold Reichle an die Spitze der Raumfahrt-Abteilung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung zu Jahresbeginn wurde die Verantwortung für die Leitung der Raumfahrt-Agentur im DLR übergangsweise an uns delegiert. Wir wünschen Herrn Reichle viel Erfolg an seiner neuen Wirkungsstätte und freuen uns, die deutsche Raumfahrt in noch verantwortungsvollerer Position mitgestalten zu dürfen.

Dass Raumfahrt-Projekte aufgrund ihrer technischen Komplexität und ihres finanziellen Umfangs oft nur in Zusammenarbeit mehrerer Staaten zu realisieren sind, ist allgemein bekannt. Je nach Art des Projektes bilden sich bi- oder multinationale Kooperationen, welche, wie im Fall der Europäischen Weltraumorganisation ESA, mit der Zeit wachsen und einen institutionellen Rahmen erhalten. Innerhalb der ESA ist Deutschland einer der größten Beitragszahler, was nicht nur der europäischen Raumfahrt, sondern auch über das in den ESA-Regularien festgeschriebene Rückflussprinzip der einheimischen Industrie und Wissenschaft zugute kommt.

Zu den Raumfahrt-Highlights des Jahres 2010 auf europäischer Ebene zählt der erfolgreiche Start des ESA-Erdbeobachtungssatellit CryoSat-2 am 8. April (siehe Beitrag hierzu in diesem Heft ab Seite 12). Seine primäre Aufgabe ist es, die Dicke des polaren Meereises in bislang unerreichter Genauigkeit zu bestimmen. Erwartet wird eine verlässliche Datenbasis zur Analyse und Voraussage von Wechselwirkungen zwischen langfristiger Erderwärmung, polarer Eisschmelze sowie dem Nachlassen ozeanischer Wasserzirkulationen. Nach einer sechsmonatigen Inbetriebnahme-Phase werden ab Oktober abgesicherte Radar-Daten erwartet. Über die Qualität der ersten Probeaufnahmen sind wir sehr erfreut.



**Christoph Hohage,**  
Projektdirektor der  
DLR Raumfahrt-Agentur

Christoph Hohage,  
DLR Space Agency's project  
director

### Dear readers

COUNTDOWN no. 12 is the first issue we have made available to you in a new layout. In the course of this relaunch the main pillars of the DLR family of magazines have been optically brushed up, aligned to each other, and more clearly separated as regards content: the DLR news – from now on 'DLR magazine' – dealing with topics from DLR research and development in aerospace, energy, transport, and security on the one hand, and COUNTDOWN, reporting on funded projects in research institutions and industry currently managed by the space agency, on the other hand. What do you think about the outcome? We are looking forward to your comments!

Yet another essential innovation: After Gerold Reichle had been appointed head of the spaceflight department of the Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development at the beginning of this year, responsibility for the management of the DLR Space Agency has been temporarily delegated to us. We wish Mr. Reichle lots of success in his new domain and we are glad being given the opportunity to play a major role in the future development of German spaceflight from an even more responsible position.

It is a matter of common knowledge that, due to their technical complexity and financial scope, spaceflight projects often can only be realised in a cooperation of several countries. Depending on the type of project bi- or multinational cooperation is established, which, like in the case of the European Space Agency ESA, grows in the course of time and is given an institutional framework. Within ESA, Germany ranks among the main contributors, thus inuring not only to the benefit of European spaceflight, but – by virtue of the 'fair return' principle stipulated in the ESA regulations – also to the benefit of the domestic industry and science.

One of the highlights in spaceflight in 2010 on a European level was the successful launch of the ESA Earth observation satellite CryoSat-2 on April 8 (see the article in this issue starting on page 12). Its primary task is to determine the thickness of the polar sea ice with hitherto unrivalled accuracy. CryoSat-2 is expected to deliver a reliable database for analysis and prediction of reciprocal effects between long-term global warming, polar ice melt and the decrease of oceanic water circulations. Following a six-month commissioning phase verified radar data are expected from October onwards. We are very glad about the quality of the first test takes.

Ein weiterer Raumfahrt-Meilenstein aus europäischer Sicht ist der bevorstehende Start des zweiten Automatischen Raumfahrzeuges ATV-2, das zudem im Gedenken an einen der bedeutenden deutschen Physiker auf den Namen „Johannes Kepler“ getauft wurde. Derzeit befindet sich ATV-2 auf dem Wasserweg von Bremen, wo es gebaut wurde, nach Französisch-Guayana. Voraussichtlich Ende dieses Jahres wird ATV-2 von dort aus, integriert in eine europäische Ariane-5 ES-Trägerrakete, zur Internationalen Raumstation aufbrechen und diese mit lebensnotwendigen Gütern wie Sauerstoff und Nahrungsmitteln versorgen.

Bei den bilateralen Raumfahrt-Vorhaben Deutschlands ist an vorderster Stelle das im Februar von Bundeskanzlerin Merkel und Staatspräsident Sarkozy verkündete geplante deutsch-französische Methan-Beobachtungsprojekt zu nennen, das inzwischen den Namen MERLIN (Methane Remote Sensing LIDAR mission) erhalten hat. Das Kick-Off-Meeting für die Phase O/A-Machbarkeitsstudie mit allen Partnern aus Wissenschaft, Industrie und Administration fand am 18. Mai in der DLR Raumfahrt-Agentur statt. Der Satellit soll ab 2013/2014 die natürlichen und die vom Menschen verursachten Quellen und Senken des nach Kohlendioxid wichtigsten Atmosphärgases Methan identifizieren. Ein eigener Bericht hierzu folgt in COUNTDOWN-Ausgabe 13, die im dritten Quartal 2010 erscheint. Ebenfalls in gemeinsamer Trägerschaft von DLR und der französischen Raumfahrt-Agentur CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) hat sich im Auftrag der deutschen und französischen Regierung eine Träger-Arbeitsgruppe gebildet, die sich den Perspektiven zukünftiger europäischer Trägerraketen widmet.

Auch aus dem nationalen Bereich gibt es Erfreuliches zu vermelden: Die zweite von der DLR Raumfahrt-Agentur veranstaltete Nationale Satellitenkommunikations-Konferenz, die Ende März in Bonn stattfand, ist von den Haupt-Zielgruppen – deutsche Raumfahrt-Unternehmen, hochrangige politische Vertreter und potenzielle Nutzergruppen – gerne angenommen und zahlreich besucht worden. Auf dem Weg zur Systemkompetenz bei Kommunikationssatelliten - sowohl im Bus- als auch im Nutzlastbereich - ist Deutschland seit der ersten Konferenz dieser Art 2008 durch Initiierung des nationalen Heinrich-Hertz-Satellitenprojektes mit Start 2015 (siehe Titelstory COUNTDOWN 11) einen wesentlichen Schritt vorangekommen.

Greifbar nah ist der Start des deutschen Erdbeobachtungssatelliten TanDEM-X: Ende Juni soll er vom kasachischen Baikonur aus an Bord einer Dnepr-Trägerrakete in seine Erdumlaufbahn geschossen werden. Der Transport des Satelliten zum Startplatz hat am 11. Mai wie geplant stattgefunden. TanDEM-X ergänzt das Leistungsspektrum seines Zwillinges, des Mitte 2007 gestarteten TerraSAR-X, wesentlich. Zusammen werden beide Satelliten, die in einer richtungweisenden öffentlich-privaten Partnerschaft realisiert wurden, ein hochgenaues digitales Höhenmodell der gesamten Erdoberfläche erstellen.

Näheres hierzu erfahren Sie auf den folgenden Seiten in diesem Heft. Wir wünschen Ihnen viel Freude bei der Lektüre!

An additional milestone from a European point of view is the coming launch of the second automatic spacecraft ATV-2, which besides has been given the name of 'Johannes Kepler' in memory of one of the leading German physicists. At present, ATV-2 is on the waterway from Bremen, where it has been built, to French Guiana. Presumably end of this year, ATV-2, integrated in a European Ariane5 ECA launch vehicle, will be launched from there to the International Space Station to provide goods indispensable to life, like, for example, oxygen and food.

Among the bilateral German spaceflight projects, first and foremost the scheduled German-French methane observation project announced in February by Federal Chancellor Merkel and State President Sarkozy, which in the meantime has been named MERLIN (Methane Remote Sensing LIDAR mission). The kick-off meeting for the phase O/A feasibility study with all partners from science, industry, and administration took place at the DLR Space Agency on May 18. The Satellite is to identify the natural sources and sinks and those caused by humans of the atmospheric methane gas, being second in importance to carbon dioxide, starting 2013/2014. A special report on this topic will follow in COUNTDOWN no. 13 scheduled to be published in the third quarter 2010. Also in joint sponsorship by DLR and the French space agency CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) a launcher workgroup has been established on behalf of the government Germany and of France, devoted to the prospects of future European launch vehicles.

Not least, good news can be reported from the national level of spaceflight: the second National Satellite Communications Conference hosted by the DLR Space Agency that took place in Bonn end of March has been well accepted and visited by the main target groups – German spaceflight companies, top-ranking politicians and potential user groups. It became apparent that Germany, on its way to system competence in satellite communications - including the satellite bus as well as the payload - has taken a decisive step forward since the first Conference of this kind in 2008 by initiating the national Heinrich Hertz satellite project, which is to be launched in 2015 (see cover story COUNTDOWN 11).

Within easy reach, is the launch of the German Earth observation satellite TanDEM-X: it is scheduled to be launched to its Earth orbit onboard a Dnepr launcher from Baikonur/Kazakhstan by the end of June. The satellite was transported to the launch site as planned on May 11. TanDEM-X substantially complements the scope of performance of its twin, TerraSAR-X, which was launched mid-2007. Both satellites, having been realised in a public-private partnership pointing the way to the future, will jointly establish a high-accuracy digital elevation model of the Earth's entire surface.

You will find more detailed information on this topic on the following pages of this issue. Enjoy reading!

Die deutschen Radarsatelliten TerraSAR-X und TanDEM-X im Parallelflug (DLR/Astrium)

The German radar satellites TerraSAR-X and TanDEM-X in parallel flight (DLR/Astrium)

## TanDEM-X vor dem Start

Hochpräzise 3D-Landvermessung aus dem All

Von Michael Bartusch und Dr. Hermann Berg

**TanDEM-X (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement) demonstriert deutsche Kompetenz in der satellitengestützten Radartechnik: Nach den erfolgreichen Space-Shuttle-Missionen SIRC/X-SAR und SRTM, den europäischen Radarsatelliten ERS 1 und 2, Envisat sowie dem seit 2007 erfolgreich arbeitenden TerraSAR-X wird TanDEM-X wissenschaftliche und kommerzielle Anwendungen der radargestützten Erdbeobachtung maßgeblich erweitern.**

### TanDEM-X Launch Date Approaching

High-precision spaceborne 3D land surveying mission

By Michael Bartusch and Dr. Hermann Berg

**TanDEM-X, or TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement, bears testimony to Germany's competence in satellite-based radar technology. TanDEM-X will significantly extend the range of scientific and commercial applications of radar-assisted Earth observation, following a series of successful Space Shuttle missions, such as SIRC/X-SAR and SRTM, Europe's radar satellites ERS 1 and 2, Envisat, and TerraSAR-X, which has been operating successfully since 2007.**



Netzwerk der Bodenstationen mit ihren Regionen, in denen TanDEM-X-Dateneingang möglich ist

Ground station network and corresponding regions, in which TanDEM-X data can be received

Primäres Missionsziel ist die Erstellung eines globalen digitalen Höhenmodells mit bisher unerreichter Genauigkeit. Bei einem Abstand von nur wenigen hundert Metern werden die beiden Satelliten TanDEM-X (TDX) und der nahezu baugleiche TerraSAR-X (TSX) das erste konfigurierbare SAR-Interferometer (SAR = Synthetic Aperture Radar) im Weltraum bilden. Ein leistungsfähiges Bodensegment, welches eng mit TerraSAR-X verzahnt ist, erlaubt die Steuerung dieser komplexen Mission. Der Start von TanDEM-X wird im ersten Halbjahr 2010 an Bord einer Dnepr-Rakete von Baikonur aus erfolgen.

Mit der TSX/TDX-Formation wird es möglich sein, die komplette Landoberfläche der Erde – 150 Millionen Quadratkilometer – innerhalb von drei Jahren vollständig zu vermessen. Die Auflösung des digitalen Höhenmodells ist vergleichbar mit Flugzeug-getragenen Verfahren: Für ein 12-Meter-Raster wird eine Höheninformation mit einer Genauigkeit von besser als zwei Meter erreicht. Der spezifische Vorteil der satellitengestützten Erd-Vermessung liegt in der Erzeugung eines globalen, homogenen Geländemodells ohne Brüche an regionalen oder Ländergrenzen oder Uneinheitlichkeiten, die aus unterschiedlichen Messverfahren und zeitlich gestaffelten Messkampagnen entstehen. Hierbei spielt der Einsatz des Radars eine entscheidende Rolle, da es unabhängig von Wetter- und Beleuchtungsbedingungen betrieben werden kann.

TanDEM-X wird, wie zuvor schon TerraSAR-X, in einer öffentlich-privaten Partnerschaft zwischen dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der Astrium GmbH realisiert. Die Partner finanzieren den Satelliten gemeinschaftlich. Das DLR entwickelt das für die Mission notwendige Bodensegment und ist verantwortlich für Planung und Durchführung der Mission, Steuerung der beiden Satelliten und Generierung des digitalen Höhenmodells. Die Nutzung der Daten für wissenschaftliche Zwecke unterliegt der Leitung des DLR-Institutes für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme in Oberpfaffenhofen. Die kommerzielle Vermarktung wird exklusiv durch die Firma Infoterra GmbH in Friedrichshafen, einer Tochterfirma der Astrium GmbH, abgedeckt.

#### Geländemodelle aus dem All nun konkurrenzfähig

Digitale Höhenmodelle sind von grundlegender Bedeutung für ein breites Spektrum kommerzieller und wissenschaftlicher Anwendungen. Beispielsweise verlangen viele geowissenschaftliche Disziplinen wie Hydrologie, Geologie und Ozeanographie nach präzisen aktuellen Informationen über die Beschaffenheit der Erdoberfläche. Die Anwendungsbereiche erstrecken sich von einer höheren Effizienz bei der Förderung von Bodenschätzen über eine optimierte Kriseneinsatzplanung in Katastrophenfällen

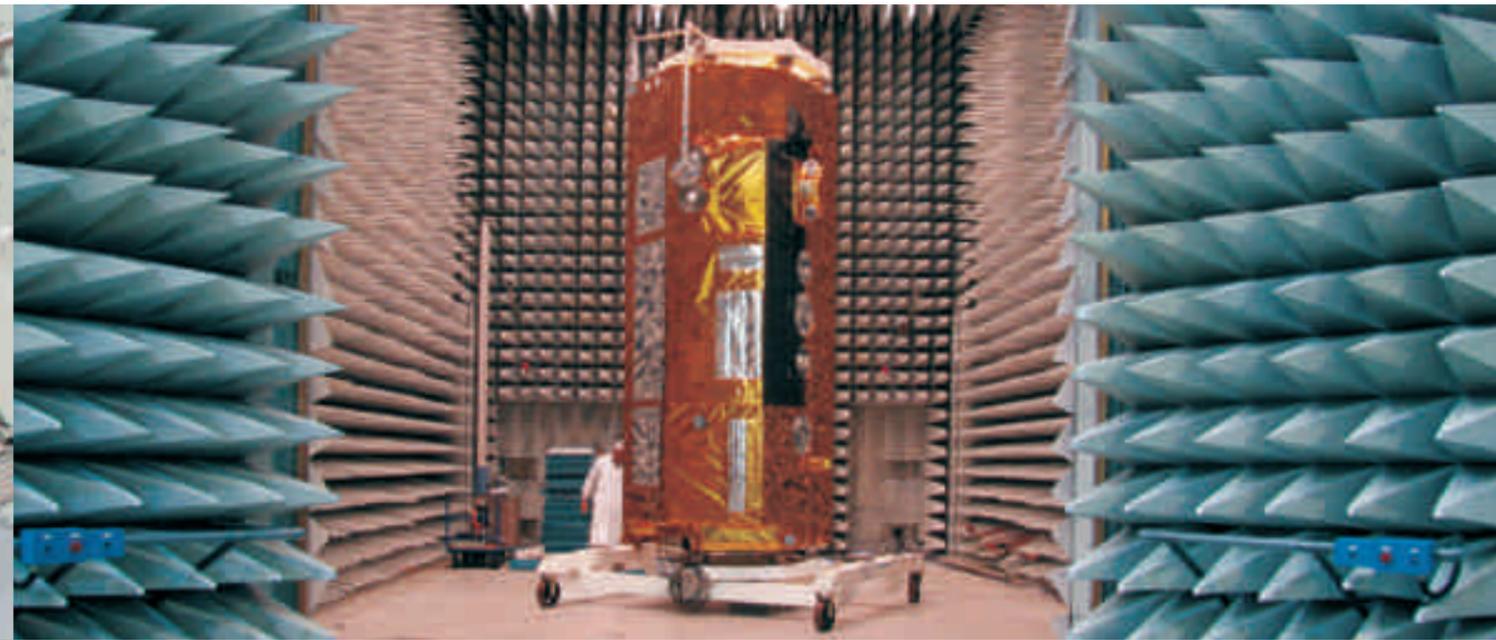
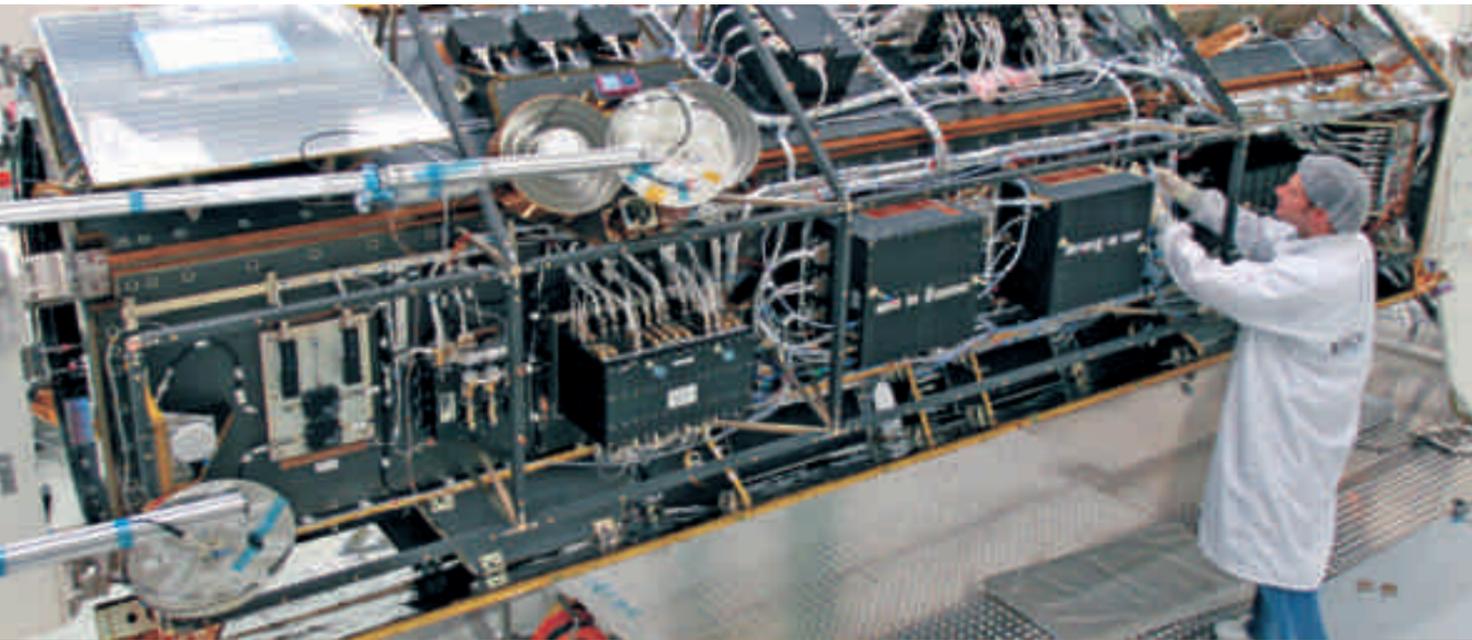
The mission's primary objective is to create a global digital elevation model of unequalled accuracy. Flying only a few hundred metres apart, the two satellites, TanDEM-X (TDX) and its almost identical counterpart TerraSAR-X (TSX), will form the first configurable SAR interferometer (SAR = Synthetic Aperture Radar) in space. A powerful ground segment will be linked with TerraSAR-X and control the whole complex mission. TanDEM-X will be launched from Baikonur on board a Dnepr rocket in the first half of 2010.

The TSX/TDX formation will be able to survey the Earth's complete land surface – 150 million square kilometres – within three years. The resolution of the digital elevation model obtained will be comparable to that of aircraft-borne remote sensing: for each 12-metre grid segment, elevation data will be available with a vertical resolution better than two metres. The specific advantage of satellite-borne surveying is that it provides a global, homogeneous terrain model without any discontinuities between adjacent regions or countries caused by differences in measurement methods or time lags between measuring campaigns. The role of radar is crucial here as it can be operated in any weather and lighting conditions.

Like its predecessor TerraSAR-X, TanDEM-X will be realised in a public-private partnership between the German Aerospace Centre (DLR) and Astrium, with both partners funding the satellite jointly. DLR is developing the ground segment and is responsible for scheduling and running the mission, controlling the two satellites and generating the digital elevation model. The scientific exploitation of the data obtained is coordinated by the DLR Microwaves and Radar Institute in Oberpfaffenhofen. Commercial marketing is exclusively in the hands of Infoterra, a Friedrichshafen-based subsidiary of Astrium.

#### Terrain models made in space now competitive

Digital elevation models are of fundamental importance to a wide range of commercial and scientific applications. For example, many of the Earth sciences such as hydrology, geology and oceanography depend on accurate and up-to-date information on the state of the Earth's surface. Applications range from making mining for minerals more efficient to better contingency planning in the case of natural disasters to improved intelligence in the preparation of defence and security missions. Moreover, digital maps are a necessary ingredient of reliable navigation, whose accuracy must keep up with the demands of ever more sophisticated global positioning using GPS and its European competitor, Galileo, which is expected to be operational from late-2013. So we are looking forward to a whole range of applications based on improved elevation data in standard maps like those of TanDEM-X.



Beide Bilder: TanDEM-X bei Tests in der Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft in Ottobrunn bei München (IABG)

Both pictures: TanDEM-X being tested at IABG at Ottobrunn near Munich (IABG)

bis hin zu einer besseren Vorbereitung von Verteidigungs- und Sicherheitseinsätzen. Digitale Karten sind auch Voraussetzung für zuverlässige Navigation: Deren Genauigkeit muss Schritt halten mit erhöhten Anforderungen bei der globalen Positionsbestimmung mittels GPS und dem voraussichtlich ab Ende 2013 verfügbaren europäischen Konkurrenzsystem Galileo. So sehen wir einer verbesserten Höheninformation in Standard-Kartenwerken, wie sie durch TanDEM-X geliefert wird, entgegen.

Das hervorragende Kosten-Nutzenverhältnis der TanDEM-X-Mission wird es erlauben, erstmalig hochgenaue Geländemodelle aus dem Weltraum in globalem Maßstab zu einem konkurrenzfähigen Preis anzubieten. Bereits heute besteht eine weltweite Nachfrage, einerseits von nationalen Kartierungsbehörden, unter anderem in Schwellenländern mit schlechtem Kartierungsstatus; andererseits von nachrichtendienstlichen Organisationen aus EU, NATO, und der Gemeinschaft der acht größten Volkswirtschaften. Diese greifen zunehmend mit großen Budgets auf Daten kommerzieller Anbieter zurück.

Deutschland wird mit dem digitalen Geländemodell der Erde ab 2013 über ein attraktives, weltweit einmaliges Datenprodukt verfügen, das – neben vielen wissenschaftlichen Anwendungsmöglichkeiten – in Initiativen und Programmen wie zum Beispiel ZKI (Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation des DLR), GMES (Global Monitoring for Environment and Security) und GEOSS (Global Earth Observation System of Systems), aber auch in sicherheitsrelevante Kooperationsabkommen eingebracht werden kann.

Das Missionskonzept basiert auf dem koordinierten Betrieb der beiden Satelliten TanDEM-X und TerraSAR-X, die in enger Helix-Formation fliegen. Hochflexible und rekonfigurierbare Abbildungsgeometrien werden auf diese Weise Realität. Der TanDEM-X-Satellit ist für eine nominelle Lebenszeit von fünf Jahren konzipiert und hat eine geplante Überlappungszeit mit TerraSAR-X von drei Jahren.

Thanks to its outstanding cost-benefit ratio, the TanDEM-X mission will be the first to permit producing high-precision terrain models from space on a global scale and offering them at a competitive price. There is a world-wide demand even today, coming on the one hand from national mapping agencies in emerging markets with poor mapping status, and on the other hand from intelligence services in the EU, NATO and the Group of Eight major industrial nations. All these increasingly spend substantial amounts to purchase data from commercial providers.

Once its digital elevation model of the Earth will be complete in 2013, Germany will possess an attractive data product which is unique worldwide and which, beyond its scientific applications, will be available for initiatives and programmes such as ZKI (DLR's Centre for Satellite-Based Crisis Information), GMES (Global Monitoring for Environment and Security) and GEOSS (Global Earth Observation System of Systems), but also in security-relevant cooperation agreements.

The mission's concept is based on the coordinated operation of the two satellites TanDEM-X and TerraSAR-X, flying in close helix formation. This is how highly flexible and reconfigurable mapping geometries will become reality. The TanDEM-X satellite is designed for a five-year nominal lifetime; its operation is planned to be overlapping with that of TerraSAR-X for three years.

#### TanDEM-X Betriebs-Modi

Der SAR-Sensor auf TanDEM-X ist vollständig kompatibel mit dem Pendant auf TerraSAR-X, wodurch nicht nur ein unabhängiger Betrieb in einem mono-statischen Modus möglich wird (die Satelliten senden und empfangen unabhängig voneinander), sondern auch synchronisierte Aufnahmen im bistatischen Modus. Dabei wird die Szene nur von einem Sensor beleuchtet, die reflektierten Signale aber werden gleichzeitig von beiden Satelliten empfangen. Durch die simultane Aufzeichnung werden Veränderungen der abzubildenden Oberflächen und daraus resultierende Genauigkeitseinbußen in der Höhenbestimmung vermieden.

#### Bi-statischer SAR-Betrieb

Im bistatischen Modus wird das TanDEM-Interferometer mit zwei unabhängigen Oszillatoren betrieben, welche jeweils Frequenz und Phase der Radarstrahlung vorgeben. Das unkompenzierte Oszillatorrauschen erzeugt erhebliche interferometrische Phasen- und somit Höhenfehler. Um diese zu korrigieren, und um die beiden SAR-Sensoren in Einklang zu bringen, sind die SAR-Instrumente von TanDEM-X und TerraSAR-X in der Lage, Synchronisationsinformationen über eine spezielle Verbindung auszutauschen, die aus sechs Hornantennen besteht.

#### Basislinien-Bestimmung

Bei jedem Interferometer ist es entscheidend, den Abstand der Radar-Sensoren möglichst genau zu kennen. Dieser Abstand, die sogenannte Basislinie, wird aus der präzisen Orbitbestimmung der Satelliten abgeleitet. Die dafür notwendigen GPS-Messungen auf TDX und TSX liefert der IGOR-Empfänger (Integrated GPS Occultation Receiver). Die Hauptverantwortung für die präzise Basislinienbestimmung liegt beim Deutschen GeoForschungszentrum (GFZ) in Potsdam. Aufgrund der strengen Anforderungen ist eine zweite Lösung durch das DLR sowie interferometrische Messungen vorgesehen, um die Basislinien zu kalibrieren.

#### TanDEM-X modes of operation

The SAR sensor on TanDEM-X is wholly compatible with its counterpart on TerraSAR-X, allowing not only its independent operation in monostatic mode (with satellites transmitting and receiving data independently) but also delivering synchronous images when in bistatic mode. In the latter case the scene is illuminated by only one sensor but the backscattered signal is received by both satellites simultaneously. Simultaneous recording rules out any discrepancies in the surfaces mapped, thus preventing elevation inaccuracies.

#### Bistatic SAR operation

The TanDEM interferometer is active when the system is operating in bistatic mode. It features two independent oscillators which control the frequency and phase of the radar beam. Uncompensated oscillator noise would generate significant interferometric phase errors, and thus elevation errors. To correct these and to bring the two SAR sensors into synch, the SAR instruments of TanDEM-X and TerraSAR-X have the capability to share synchronisation data via a special link consisting of six horn aerials.

#### Baseline calibration

In any interferometer it is crucial to know the distance between radar sensors as accurately as possible. This distance, called the baseline, is derived from the satellites' exact orbital positions. The required GPS measurements on TDX and TSX are delivered by the IGOR receiver (Integrated GPS Occultation Receiver). The main responsibility for an exact determination of the baseline lies with the German Research Centre for Geosciences, GFZ, in Potsdam. To meet the strict requirements, a second solution has been envisaged by DLR involving additional interferometric measurements for an even more accurate baseline calibration.

Die Bahnen von TerraSAR-X und TanDEM-X sind wie die Stränge einer Doppelhelix gegeneinander verdreht. Über dem Äquator sind sie horizontal, über den Polen vertikal versetzt. Dadurch kreuzen sich ihre Bahnen niemals. Die Abstände bewegen sich in Flugrichtung zwischen null und 1.000 Metern, quer zwischen 200 und 500 Metern.

The orbits of TerraSAR-X and TanDEM-X are twisted towards each other like the strands of a double helix. They are shifted horizontally above the equator and vertically above the poles. This is why their flight paths never cross. The distance between them ranges from zero to 1,000 metres in course and between 200 and 500 metres diagonally.



### Sicherheitsmechanismen für den Formationsflug

Um die angestrebte Qualität des globalen digitalen Höhenmodells zu erreichen, werden sich die beiden Satelliten in einem Abstand von 200 bis 500 Metern zueinander bewegen. Dies erfordert spezielle Maßnahmen, damit das Kollisionsrisiko minimiert und verhindert wird, dass es zur gegenseitigen Bestrahlung durch die Radarantennen kommt:

**Safe Mode:** Dieser benutzt zur Lageregelung Elektromagnete, die den Satelliten im Erdmagnetfeld ausrichten. In Verbindung mit einem eigens hierfür erstellten Betriebskonzept wird eine schnelle Reaktion im Falle von Anomalien gewährleistet.

**Sperrzonen (exclusion zones):** Dabei handelt es sich um zu definierende und zu überwachende Orbitabschnitte, in die keine Radarpulse ausgesendet werden dürfen.

**„Sync-Warning“ Sequenzen:** Die gegenseitige Überwachung der Betriebsstation der Satelliten funktioniert durch Austausch dieser Sequenzen. Im Falle von Anomalien werden Radarpulse unterdrückt.

**Inter-Satellite Link:** Dieser ermöglicht dem TDX-Satelliten den Empfang der Telemetrie des TSX-Satelliten.

### Der Satellit

TanDEM-X ist im Wesentlichen ein Nachbau des TerraSAR-X-Satelliten. Geringfügige Änderungen erlauben den Betrieb zweier synchron arbeitender Radargeräte und den Formationsflug. Die 80 Zentimeter breite SAR-Antenne ist rechts zur Satellitenbahn auf die Erde ausgerichtet. Aufgrund der sonnensynchronen Kreisbahn erfolgt die Energieversorgung über ein Solarpanel. Die SAR-Messdaten werden im selben Frequenzband an die Bodenstationen übermittelt, das auch vom Radar verwendet wird.

TanDEM-X verfügt über ein zusätzliches Antriebssystem, das mit Hochdruck-Stickstoffgas arbeitet. Dieses Kaltgassystem liefert schwächere Impulse als der Hydrazin-Antrieb, den beide Satelliten für Bahnkorrekturen verwenden, und unterstützt den Formationsflug durch feine Bahnkorrekturen.

Auf TanDEM-X ist ein S-Band-Empfänger untergebracht. So kann TanDEM-X die Low-Rate-Telemetrie von TerraSAR-X „mithören“ und die Abstrahlung von Radarimpulsen unterdrücken, wenn TerraSAR-X sich im Safe Mode befindet. Dies gilt etwa im Fall einer Orbitabweichung, in der das Risiko einer Radarbeleuchtung gegeben ist. Zusätzlich erhält TDX Informationen zur Position und Geschwindigkeit von TSX.

### Formation flight safety mechanisms

In order to achieve the intended quality of the global digital elevation model, the two satellites will fly at a distance of 200 to 500 metres. This requires specific features to minimise the risk of collisions; additional measures are needed to also avoid any disturbance of one satellite by the radar aeriels of the other:

**Safe Mode:** A mode whereby the satellite's attitude control is taken over by a magnetic torquer consisting of solenoids that stabilise the satellite within the Earth's magnetic field. Together with a specifically designed operating concept this guarantees a quick reaction to any anomalies.

**Exclusion zones:** Specific sections of the orbit, yet to be identified and monitored, where no radar pulses must be transmitted.

**'Sync-Warning' sequences:** The mutual monitoring of operational status information is carried out by exchanging these sequences. In the event of an anomaly, radar pulses are suppressed.

**Inter-Satellite Link:** enables the TDX satellite to receive telemetric information from the TSX satellite.

### The satellite

TanDEM-X is essentially a re-build of the TerraSAR-X satellite. Some minor modifications permit the synchronised operation of two radar devices and support formation flight. Its 80 centimetre wide SAR antenna points to the Earth on the right side of the satellite subtrack. The sun-synchronous orbit allows the use of a fixed solar array. SAR measurement data are transmitted to ground stations in the same frequency band as used by the aerial.

TanDEM-X has an additional propulsion system based on high-pressure nitrogen gas. This cold gas system provides smaller impulses than the hydrazine system used by both satellites for orbit maintenance, and supports formation flying by fine orbit control.

An additional S-band receiver is accommodated on TanDEM-X. This provides an inter-satellite link and allows TanDEM-X to listen to the TerraSAR-X low rate telemetry and suppress radar transmission in case TerraSAR-X is in Safe Mode. This will be important in case of an orbital deviation involving a risk of radar illumination. Additionally, the module will feed TDX with information on the position and speed of TSX.

### Das Synthetic-Aperture-Radar (SAR)

Radargeräte, die im X-Band (9,65 GigaHertz) arbeiten, können die Erdoberfläche zeit- und wetterunabhängig abbilden. Verwendet wird dazu eine aktive Antenne mit einer Matrix von Sende- und Empfangsmodulen, mit deren Hilfe schnelle Richtungsänderungen des Radarstrahls und programmierbare Antennencharakteristika durchgeführt werden können. Die Möglichkeit, die Polarisierung und andere Radarparameter von einem Impuls zum nächsten zu ändern, macht die SAR-Technik so flexibel, dass sie auch zur Erprobung neuer Betriebsarten verwendet werden kann.

Zur Erfassung der enormen Datenmenge verfügt der Halbleiter-Massenspeicher von TanDEM-X über eine Kapazität von 768 Gigabit, doppelt so viel wie TerraSAR-X. In der letzten Entwicklungsphase wurde das Design des SAR dahingehend erweitert, dass ein kontinuierlicher Austausch von Synchronisierungsimpulsen – und damit die Zusammenarbeit beider SAR-Instrumente im bistatischen Betrieb – gewährleistet wird. Sechs Hornantennen auf jedem Satelliten senden dazu Synchronisationssignale in praktisch alle Richtungen.

### Synthetic Aperture Radar (SAR)

A radar device operating in the X-band (9,65 gigahertz) can scan the Earth's surface independently of time and weather. Its operation is based on an active aerial featuring a matrix of transmission and reception modules for quick re-adjustments of radiation patterns and radar beam directions. The ability to change its polarisation and other radar parameters from one pulse to the next makes SAR technology flexible enough to be used for testing new operation modes.

To cope with the enormous quantity of data to be captured, the semiconductor mass storage device of TanDEM-X has a capacity of 768 gigabits, which is twice that of TerraSAR-X. In the final engineering phase, the SAR design was modified to permit a continuous exchange of synchronisation pulses – thus ensuring guaranteed cooperation of the two SAR instruments when in bistatic satellite operation. For this purpose, each satellite has been fitted with six horn aeriels, sending synchronisation signals for quasi-omnidirectional coverage.

### TECHNISCHE PARAMETER

#### Flugbahn

Art	sonnensynchron
Flughöhe	514 Kilometer
Inklination	97,4 Grad
Lokale Zeit am aufsteigenden Knoten	18:00 Uhr
Wiederholungszeitraum	11 Tage

#### Satellit

Abmessungen	5,0 Meter (Höhe) x 2,4 Meter (Durchmesser)
Startgewicht	1.330 Kilogramm
Stromverbrauch	730 Watt (Durchschnittswert)
Batteriekapazität	108 Ampere
Lebensdauer	5,5 Jahre (6,5 Jahre für Betriebsstoffe)

#### Radar

Mittelfrequenz	9,65 Gigahertz
Polarisierung	Horizontal-Horizontal, Horizontal-Vertikal, Vertikal-Horizontal, Vertikal-Vertikal
Radarauftrittwinkelbereich	20-55 Grad (15-60 Grad zur Datenerfassung)
Räumliche Auflösung	1 Meter (Spotlight Modus)
Empfindlichkeit	-19 Dezibel (Rauschäquivalent Sigma-Null)

### TECHNICAL PARAMETERS

#### Orbit

Orbit type	sun-synchronous
Orbit altitude	514 kilometres
Orbit inclination	97.4 degrees
Orbit local time at ascending node	18:00 p.m.
Orbit repeat cycle	11 days

#### Satellite

Satellite size	5.0 metres (height) x 2.4 metres (diameter)
Launch mass	1,330 kilogrammes
Power consumption	730 watts (average)
Battery capacity	108 ampere
Satellite lifetime	5.5 years (6.5 years for consumables)

#### Radar

Radar centre frequency	9.65 gigahertz
Radar polarisations	horizontal-horizontal, horizontal-vertical, vertical-horizontal, vertical-vertical
Radar angle of incidence range	20-55 degrees (15-60 degrees for data collection)
Radar spatial resolution	1 metre (spotlight mode)
Radar sensitivity	-19 decibels (noise equivalent sigma-zero)

### Das Bodensegment

Das Bodensegment umfasst die gesamte Infrastruktur, die zum Betrieb der TanDEM-X-Mission, zur Generierung der globalen Höhenmodell-Datensätze und zur Verteilung an die kommerziellen und wissenschaftlichen Nutzer notwendig ist. Nach Umsetzung der TanDEM-X-Erweiterungen wird es ein gemeinsames TSX/TDX-Bodensegment geben. Die Erweiterungen umfassen die oben dargestellten Maßnahmen für einen sicheren Formationsflug und zur hochgenauen Bestimmung der Basislinien.

#### Weitere Schlüsselfunktionen für den TanDEM-X Betrieb:

##### Missionsplanung

Ein Schlüsselproblem des gemeinsamen Betriebs beider Missionen stellen die verschiedenen Akquisitionsszenarien dar, wobei TerraSAR-X-Anfragen typischerweise Einzelszenen für individuelle wissenschaftliche oder kommerzielle Nutzer sind, das globale digitale Höhenmodell jedoch eine globale Kartierungsstrategie erfordert. Im Gegensatz zu konventionellen Erdbeobachtungsmissionen muss sich die globale TanDEM-X-Aufnahmestrategie an der Formationsgeometrie orientieren, die durch die Helix-Parameter vorgegeben wird. So ist für eine feste Helix die Höhenmodell-Erstellung nur in einem bestimmten Breitengradbereich möglich.

TSX und TDX müssen sich auch die begrenzten Ressourcen des Raumsegmentes teilen. Unter diesen Randbedingungen und der Voraussetzung einer dreijährigen „Tandem-Phase“ (gemeinsamer Betrieb) wurde ein entsprechendes Missions-Szenario erstellt. In diesem ist die frühzeitige Planung der TanDEM-X-Aufnahmen vorgesehen, welche einen Zeitraum von bis zu einem Jahr abdecken und mit hoher Priorität eingeplant werden. Dies lässt genug Spielraum für TerraSAR-X-Aufnahmen, die um die TanDEM-X-Bestellungen herum geplant werden können.

##### Boden-Empfangsstations-Netzwerk

Ein Netzwerk von drei TanDEM-X-Bodenstationen (Kiruna/Schweden, Inuvik/Kanada und O'Higgins/Antarktis) ist erforderlich, um den Datentransfer von mehr als 358.400 Giga-Byte an Rohdaten zu bewerkstelligen, die für das globale digitale Höhenmodell benötigt werden. Nach dem Empfang der Daten in den Bodenstationen und einer ersten Qualitätsprüfung werden diese zur Aufnahme in das Archiv des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums (DFD) verschickt.

##### Prozessierungskette

Der Daten-Verarbeitungsablauf ist in drei Hauptschritte unterteilt: Überprüfung der übertragenen Datensegmente an den Empfangsstationen, Bewertung der Ergebnisse im Prozessierungszentrum in Oberpfaffenhofen sowie Verarbeitung der Aufnahmen zu Roh-Höhenmodellen, nachdem alle notwendigen Eingangsdaten verfügbar sind. Der sogenannte Mosaicking- und Kalibrierungsprozessor erzeugt abschließend das globale digitale Höhenmodell aus den Roh-Höhenmodellen. Deren absolute Orientierung wird kontinentweise durch Blockausgleich korrigiert. Danach werden die Roh-Höhenmodelle in einem qualitätskontrollierten digitalen Höhenmodell zusammengeführt. Insgesamt wird die TanDEM-X-Mission 1,5 PetaByte (1.572.900 GigaByte) an Daten im DFD-Archiv füllen. Der globale Höhenmodell-Datensatz wird 15 TeraByte umfassen und vier Jahre nach dem Start zur Verfügung stehen.

### The ground segment

The ground segment includes the entire infrastructure required for operating the TanDEM-X mission, for generating the elevation model data sets, and for passing them on to their commercial and scientific users. Once the final modifications of TanDEM-X are in place, TSX and TDX will have a joint ground segment. As already mentioned, the modifications include features ensuring a safe formation flight and a high-precision calibration of the baseline.

#### Further key functions of the TanDEM-X project:

##### Mission planning

A key challenge in the joint operation of the two missions lies in their diverse acquisition scenarios, with TerraSAR-X enquiries typically coming from individual scientific or commercial users asking for discrete scenes, while the global digital elevation model would require a single global mapping strategy. Unlike conventional Earth observation missions, a global TanDEM-X imaging strategy must necessarily be based on the parameters of the mission's specific helical formation geometry. Hence, for a given helix, a digital elevation model can only be generated within a specific range of latitudes.

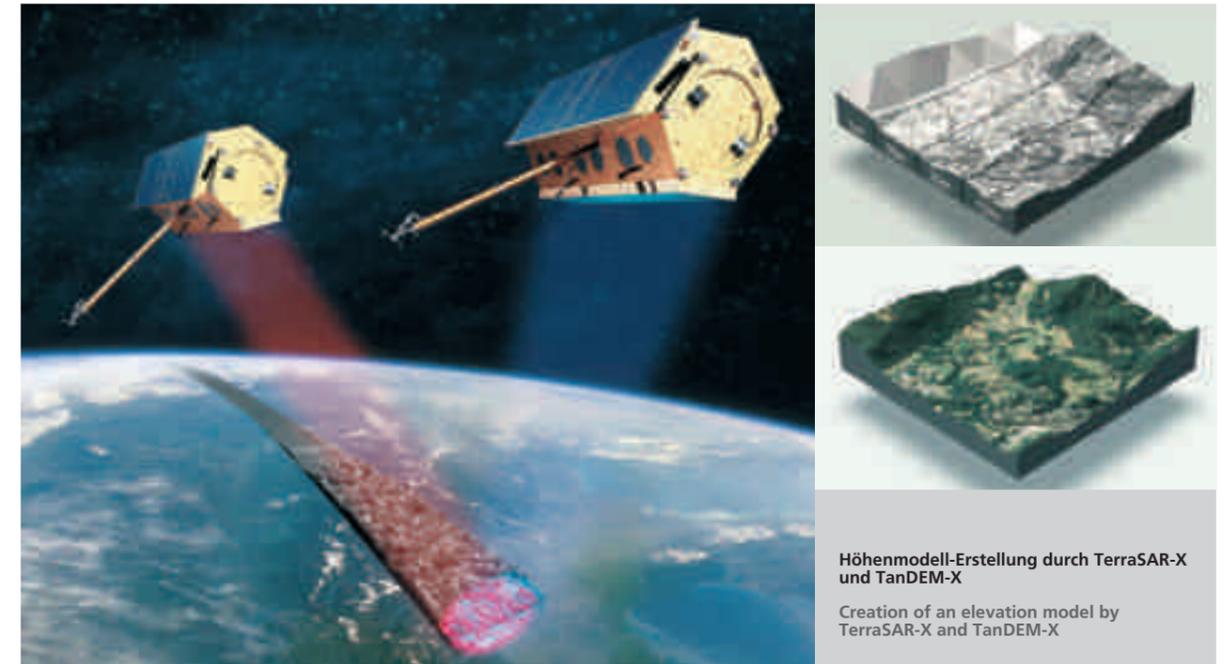
TSX and TDX will have to share the space segment's limited resources. A mission scenario has been developed based on these boundary conditions and under the assumption of a three-year 'tandem phase' (i.e. joint operation). The scenario includes a firm schedule for TanDEM-X imaging, planning for a period of up to one year ahead and with high-priority status. This will leave enough capacity for TerraSAR-X images to be planned around TanDEM-X requests.

##### A network of receiving stations on the ground

A network of three TanDEM-X ground stations (Kiruna/Sweden, Inuvik/Canada and O'Higgins/Antarctica) will be necessary to handle the data transfer of more than 358.400 gigabytes of raw data, which will be the amount required for the global digital elevation model. Once the data have been received and given an initial quality check, the ground stations transmit the material to the German Remote Sensing Centre (DFD) for archiving.

##### Processing chain

Data processing is organised in three main steps: Verification of transmitted data segments at the receiver stations, evaluation of results at the Oberpfaffenhofen processing centre, and combining of images into a raw elevation model once all relevant input data are available. A so-called mosaicking and calibration processor subsequently generates the global digital elevation model based on all raw elevation models, correcting their absolute orientation by block adjustments for each continent. Raw elevation models will then be combined into a final, quality-controlled digital elevation model. All in all, the TanDEM-X mission will deliver 1.5 petabytes (1,572,900 gigabytes) of data to the DFD archive. The global elevation model dataset will comprise 15 terabytes and be available four years after launch date.



Im Nationalen Raumfahrtprogramm Deutschlands konzentriert sich die Radar-Entwicklung auf die Fortführung der X-Band-Linie und deren Kommerzialisierung. Als Teil der öffentlich-privaten Partnerschaft bei TerraSAR-X hat sich die Industrie dazu verpflichtet, den nächsten TerraSAR-X-Satelliten aus Eigenmitteln zu finanzieren und zu betreiben. Die Infoterra GmbH arbeitet derzeit an der Definition des TerraSAR-X2. Dieser wird frühestens 2014 starten.

Durch die Förderung des nationalen Erdbeobachtungsprogramms werden bereits heute die Grundsteine für zukünftige X-Band-Radarmissionen entwickelt. So soll in der nächsten Generation die experimentelle Fähigkeit zu höchstauflösenden Messungen, wie sie auf TerraSAR-X und TanDEM-X existiert, durch Nutzung der digitalen Strahlenformung weiter verbessert und auf deutlich breitere Beobachtungstreifen angewandt werden. Hierfür entwickelt die Astrium GmbH in Friedrichshafen zurzeit im Auftrag des DLR einen Antennendemonstrator. Eine auf TanDEM-X folgende X-Band-Mission könnte das erfolgreiche Konzept von öffentlich-privater Partnerschaft in Finanzierung und Nutzung fortsetzen.

Gleichzeitig sucht das DLR im Rahmen der verfügbaren Ressourcen nach Möglichkeiten, die bereits etablierte X-Band-Linie in weiteren Frequenzen zu ergänzen. So wurden gemeinsam mit dem amerikanischen Jet Propulsion Laboratory erste Untersuchungen entsprechender Missionskonzepte im L-Band begonnen. Darüber hinaus engagieren sich Industrie und DLR bei zwei aktuellen Earth Explorer-Missionskandidaten der Europäischen Weltraumorganisation ESA im P-Band (BIOMASS) und im X-/Ku-Band (CoReH2O). SIGNAL, ein aktueller Vorschlag für eine Ka-Band SAR-Mission, wird derzeit ebenfalls auf sein Potenzial hin untersucht.

*Michael Bartusch ist Projektleiter für TanDEM-X in der Abteilung Erdbeobachtung der DLR Raumfahrt-Agentur.*

*Dr. Hermann Berg ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Erdbeobachtung der DLR Raumfahrt-Agentur.*

Radar technology development within Germany's national space programme continues to focus on the X-band line and its commercial exploitation. Under the TerraSAR-X public-private partnership agreement, DLR's industry partners have made a commitment to fund and operate the next TerraSAR-X satellite entirely from their own resources. Infoterra GmbH is currently pressing ahead with the project definition of TerraSAR-X2, which is to be launched in 2014 at the earliest.

Contributing to the national Earth observation programme of today is an early opportunity to develop key elements for future X-band radar missions. Next-generation hardware will be improved with regard to its experimental capability to make ultra high-resolution measurements similar to those of TerraSAR-X and TanDEM-X, based on digital beam formation, and it will handle a significantly wider swath in a single pass. Astrium in Friedrichshafen, by order of DLR, is currently developing an aerial demonstrator. Conceivably, a future X-band mission following TanDEM-X could once again be funded and exploited by a successful public-private partnership.

DLR, within the limits of its own budget, is also looking into complementing its existing X-band line with additional frequencies. The potential of missions in the L-band is currently being investigated together with the US-based Jet Propulsion Laboratory. Moreover, industry partners and DLR are participating in two current candidate missions of ESA's Earth Explorer programme, which would operate in the P-band (BIOMASS) and in the X-/Ku-band (CoReH2O). SIGNAL, a current proposal for a Ka-band SAR mission, is equally under consideration for its potential.

*Michael Bartusch serves as TanDEM-X project manager at the DLR Space Agency's Earth Observation Department.*

*Dr. Hermann Berg is a scientific assistant at the DLR Space Agency's Earth Observation Department.*

# CryoSat-2: Europas neue Eis-Mission

Von Dr. Veit Helm

**Was ist dran an den Klimaszenarien, die fast täglich in den Medien im Umlauf sind? Schmilzt tatsächlich das Eis an den Polen, und wenn ja, wie schnell? Welche Veränderungen sind vom Menschen verursacht, welche der natürlichen Variabilität geschuldet? Zur Klärung dieser wichtigen Fragen wird CryoSat-2 – der dritte ESA-Erdbeobachtungssatellit aus der Explorer-Serie nach GOCE und SMOS – einen wichtigen Beitrag leisten, der zugleich wesentlich für das Verständnis des Klimawandels und seiner Folgen ist.**

## CryoSat-2: Europe's new ice mission

By Dr. Veit Helm

**Is there any substance in all those climate scenarios that are being bandied around by the media almost every day? Is the ice at the poles actually melting, and if so, how quickly? What changes are man-made, and which ones are due to natural variability? CryoSat-2, after GOCE and SMOS ESA's third Earth observation satellite in the Explorer series, is expected to make a major contribution towards answering these important questions, helping us greatly at the same time to understand climate change and its consequences.**

### Fernerkundung der polaren Eismassen

Mit CryoSat-2 kommt neuartige Technologie in Form eines sehr speziellen Radaraltimeters (SIRAL – SAR Interferometric Radar Altimeter) zum Einsatz. Mit SIRAL kann man die Oberflächenhöhe der Eisschilde und die Meereisdicke hochgenau und räumlich hoch aufgelöst in einem fast polaren Orbit kontinuierlich vermessen. Innerhalb der voraussichtlichen Betriebszeit von fünf Jahren können jährliche Änderungen im Zentimeterbereich sichtbar gemacht werden. In Kombination mit Daten zur Eisdicke wird so die Aussagekraft vorhandener Modelle vergrößert; Wissenschaftler können bessere Prognosen über den Anteil der Eisschilde an der Änderung des Meeresspiegels geben.

Der Einfluss der derzeit beobachteten Erwärmung in der Arktis auf das Meereis ist von enormer Bedeutung: Meereis wirkt als eine Art Deckel oder Isolationsschicht. Es unterbindet die Erwärmung oberflächennaher Wasserschichten durch direkte Sonneneinstrahlung sowie den Wärmeaustausch zwischen kalter polarer Luft und Ozean. Durch Neueisbildung oder Schmelzen ändern sich zudem Temperatur, Salzgehalt und damit auch Dichte des Meerwassers. Dies hat Auswirkungen auf die sogenannte thermohaline Zirkulation („thermo“ steht für Wärme, „halin“ für Salz): Die Bildung von neuem Eis hinterlässt in der Umgebung Wasser mit relativ hoher Salzkonzentration und Dichte. Dieses sinkt zunächst ab und strömt dann in Richtung Äquator. Als Ausgleich fließt warmes, weniger dichtes Oberflächenwasser nordwärts. Umgekehrt gilt: Wenn polare Eismassen in Folge erhöhter Sonneneinstrahlung schmelzen, steigt nicht nur der Meeresspiegel. Auch sinkt durch das Einbringen von Schmelzwasser Salzgehalt und damit die Dichte des Nordatlantik-Wassers – die thermohaline Zirkulation, eine essenzielle Einflussgröße im globalen Kreislauf, wird somit gebremst. Mit CryoSat-2 wird erstmalig die Meereisdicke direkt großräumig vermessen. Zeitliche Änderungen können auf diese Weise erfasst und der Bezug zwischen globalem Klima und Eis als Klimaregulator besser verstanden werden.

Die an der Vorläufermission Cryosat-1 beteiligten Ingenieure und Wissenschaftler hatten am 8. Oktober 2005 einen herben Rückschlag zu verkraften: Der Satellit hatte zwar das Zielgebiet, die Arktis, erreicht, nicht aber den vorgesehenen Orbit. Schuld am Fehlstart war ein Programmierfehler in der Steuer- software, der die Abschaltung der zweiten Antriebsstufe und die anschließende Abkoppelung der Oberstufe von der Träger- rakete verhindert hatte. Nach einigem Ringen der ESA-Mitglied- staaten untereinander wurde ein Neubau beschlossen. Innerhalb von nur vier Jahren wurde der Nachfolger CryoSat-2 gebaut und erfolgreich bei der Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft (IABG) in Ottobrunn auf Herz und Nieren getestet. Am 8. April 2010 startete CryoSat-2 mit einer Dnepr-Trägerrakete vom kasachi- schen Weltraumbahnhof Baikonur in seine Umlaufbahn.

### Examining the polar ice caps by remote sensing

Orbiting the Earth in an almost polar orbit, CryoSat-2 uses innovative technology embodied in a very special radar altimeter (SIRAL – SAR Interferometric Radar Altimeter). SIRAL continuously measures the surface elevation of ice shields and the thickness of the sea ice with a high degree of precision and spatial resolution. Throughout its expected lifetime of five years, it will enable us to identify annual changes in the centimetre range. This combination of ice thickness and elevation data will enhance the validity of existing models and enable scientists to improve their forecasts about the impact of the ice shields on sea level changes.

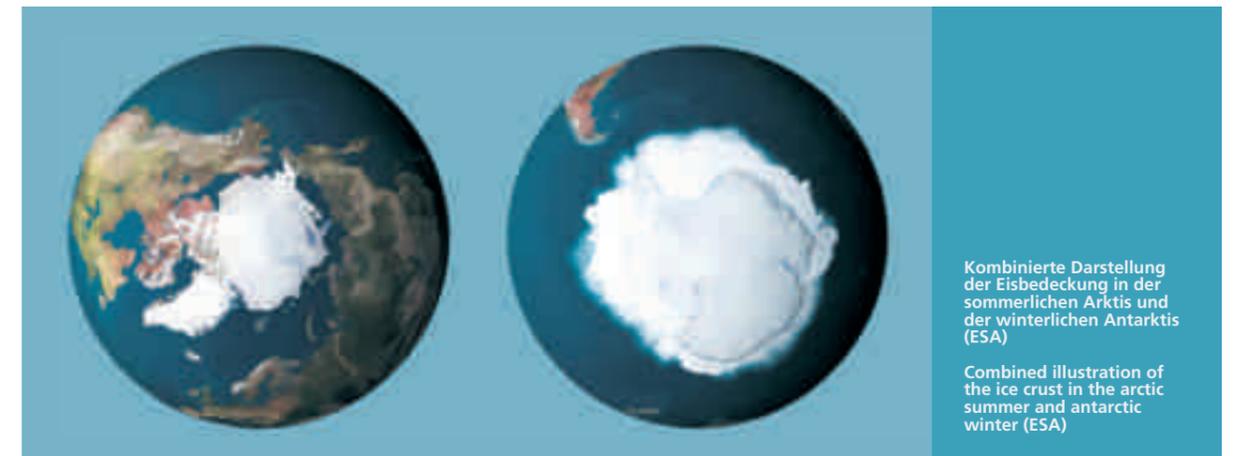
The general warming we are currently observing in the Arctic influences sea ice in a way that is tremendously significant: acting as a kind of cap or insulation layer, sea ice keeps water layers close to the surface from being heated by solar irradiation and prevents any exchange of heat between the cold polar air and the ocean. Moreover, the temperature, the salinity and, consequently, the density of sea water changes whenever ice melts or fresh ice forms. This affects what is called thermohaline circulation ('thermo' stands for heat, 'haline' for salt): after fresh ice has formed, the water left behind in the vicinity will have a relatively high salinity and density; it will sink at first and then begin to flow towards the equator. In return, warm and less dense surface water will flow northward. The reverse is also true: whenever polar ice is melted by intensifying solar irradiation, it will not only cause the sea level to rise; the influx of melt water will also reduce the salinity and, consequently, the density of the water in the North Atlantic. This will reduce the process of thermohaline circulation, one of the essential factors influencing the global cycle. CryoSat-2 will be the first satellite to provide direct sea-ice thickness measurements on a large scale, enabling us to identify seasonal changes and improve our understanding of the relationship between the global climate and ice as a regulating factor.

On October 8, 2005, the engineers and scientists involved in the precursor mission, CryoSat-1, had to stomach a severe setback: although the satellite had reached its target area, the Arctic, it was not in its proper orbit. The failure was due to a programming error in the control software which had prevented both the shutdown of the second stage and the separation of the upper stage from the launcher. Following some negotiations among the ESA member states it was decided to build another satellite. Within no more than four years, the successor, CryoSat-2, was built and exhaustively tested at the Industrial Systems Operating Company (IABG) in Ottobrunn. CryoSat-2 was launched on a Dnepr rocket from the Baikonur space centre in Kazakhstan on April 8, 2010.



Seit dem 8. April 2010 in einer niedrigen Erdumlaufbahn: CryoSat-2 (künstlerische Darstellung, ESA)

In Low Earth Orbit since April 8, 2010: Cryosat-2 (Artist's impression, ESA)



Kombinierte Darstellung der Eisbedeckung in der sommerlichen Arktis und der winterlichen Antarktis (ESA)

Combined illustration of the ice crust in the arctic summer and antarctic winter (ESA)

### Neue Wege in der Satelliten-Altimetrie

Die Vermessung der Oberflächenbeschaffenheit der Erde mittels Höhenmessung aus dem Weltraum begann Anfang der siebziger Jahre. Satelliten wurden damals erstmals mit Radar-Höhenmessern, sogenannten Altimetern, ausgestattet. Im Fokus standen seitdem die großskalige Vermessung und Beobachtung des Meeresspiegels sowie die Ozeantopographie. Neue Kenntnisse über globale Zirkulationsmuster, Gezeiten- und Wellenbewegungen, Windgeschwindigkeiten, Wärmetransport und Änderung des Meeresspiegels sind wesentliche Ergebnisse dieser Missionen.

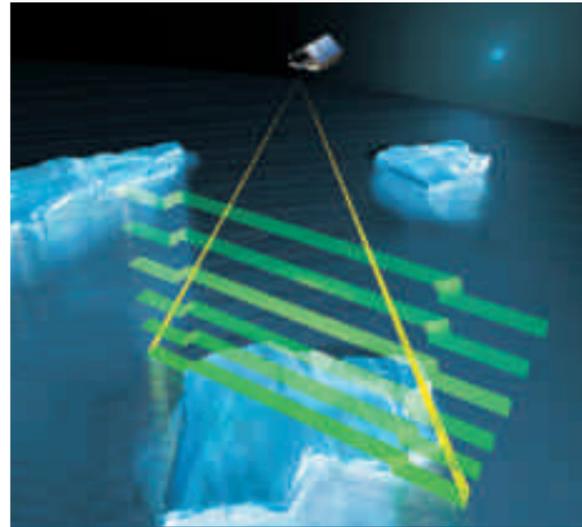
Die Funktionsweise eines **Radaraltimeters** beruht auf der Laufzeitmessung einer Mikrowelle. Diese wird von der Antenne eines Satelliten ausgesandt, von der Erdoberfläche reflektiert und von derselben Antenne wieder empfangen. Mit dem Wissen der genauen Position des Satelliten zu einem bestimmten Zeitpunkt und der Laufzeit der Welle kann auf die Höhe des beleuchteten Bereiches auf der Erdoberfläche geschlossen werden.

Die bisherigen **Radaraltimeter**, angefangen von Geos-3 über ERS1/2 bis hin zu Envisat, beleuchten bei jeder Messung Gebiete mit einem Durchmesser von 15 bis 30 Kilometern. Das rückgestreute Signal enthält demnach die überlagerte Information vieler kleiner Streuzentren innerhalb des Beleuchtungsflecks. Über dem offenen Ozean stellte dies kein Problem dar, da die mittlere Meeresoberfläche innerhalb des Beleuchtungsflecks wenig variiert und die mittlere Höhe der durch Wind geformten Wellen aus der Form des Radarechos ermittelt werden kann.

Die abgeleitete Ozeantopographie ist daher mit circa zehn Zentimetern recht genau. Hingegen wächst an den geneigten, oft rauen Randgebieten der Eisschilde der Fehler leicht auf mehr als 100 Meter. Deformiertes Meereis beziehungsweise einzelne Eisschollen liegen unterhalb des Auflösungsvermögens der bisherigen satellitengestützten Radaraltimeter. Eine Meereisdickenbestimmung ist daher sehr fehlerbehaftet, da nicht zwischen offenen Wasserstellen und den Eisschollen unterschieden werden kann. Auch sind die bestehenden Höhenmodelle Grönlands und der Antarktis insbesondere an deren klimatisch sehr aktiven Rändern noch zu ungenau.

Mit CryoSat-2 beginnt eine neue Ära der Satellitenaltimetrie: Das Hauptinstrument SIRAL macht sich die Synthetic-Aperture-Radar-Technologie (SAR) zu nutze: Rechnerisch wird eine etwa 50 Meter lange Antenne erzeugt, die wiederum eine stark verbesserte Auflösung am Boden zur Folge hat. Der Beleuchtungsfleck schrumpft von 20 Kilometer auf 250 Meter. So können einzelne Eisschollen von offenen Wasserstellen unterschieden und ihre Dicke bestimmt werden. Die Verbesserung des Auflösungsvermögens mittels SAR funktioniert allerdings nur in Flugrichtung. Quer hierzu geneigte Oberflächen verursachen nach wie vor Fehler. SIRAL besteht deswegen aus zwei quer zur Flugrichtung angeordneten Antennen, die durch einen absolut formstabilen Antennenrahmen aus Kohlenfaser miteinander verbunden sind. Dies ermöglicht die Verwendung der Phasendifferenz zwischen beiden Antennen. Damit lässt sich der Ort der Radarrückstreuung exakt bestimmen, so wie auch die Oberflächenneigung quer zur Flugrichtung. Dieses Verfahren ist als Interferometrie (SARIn) bekannt und findet bald auch in der deutschen TanDEM-X-Mission Anwendung.

Um die Kontinuität zu den Vorgängermissionen zu gewährleisten und die Datenrate zu reduzieren, wird CryoSat-2 über den Ozeanen und dem „flachen“ Inneren der Antarktis und Grönlands im konventionellen Altimetermodus operieren. Der SAR-Modus wird über dem Meereis, der SARIn-Modus über den rauen Randgebieten der Eisschilde zugeschaltet. Durch die Kombination von SAR und Interferometrie sowie dem fast polaren



Schematische Darstellung des Messprinzips: Der Cryosat-Sensor kann zwischen Wasser- und Eisoberflächen unterscheiden und dadurch zum Beispiel die Dicke von Eisschollen erfassen. (ESA)

Measuring principle diagram: The sensor used on Cryosat is able to differentiate between water and ice surfaces and thus to capture for example the thickness of ice freeboards. (ESA)

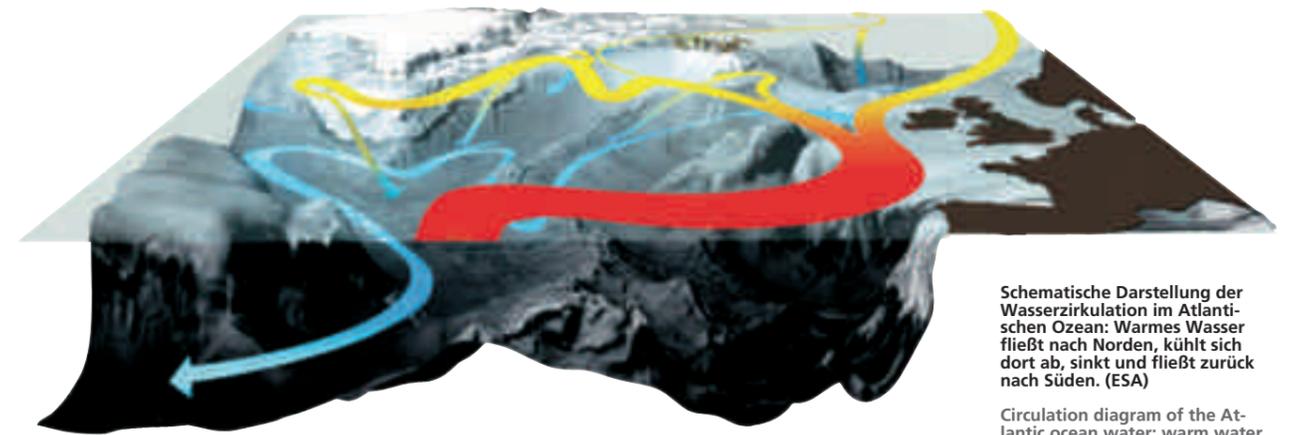
### New approaches in satellite altimetry

The surface of the Earth was first surveyed by space-based altimeters in the early seventies, when the first satellites were equipped with radar altimeters. Since that time, the focus has been on large-scale surveys and observations of the sea level as well as on ocean topography. Essentially, these missions greatly enhanced our knowledge about global circulation patterns, tide and wave movements, wind velocities, heat transport and sea level changes.

A **radar altimeter** works by measuring the travel time of a microwave. Emitted by the aerial of a satellite, it is backscattered by the Earth's surface and bounced back to the same aerial. If the satellite's position at a given time is known precisely, the elevation of the area illuminated on the surface of the Earth can be derived from the travel time of the wave.

Conventional **radar altimeters** from Geos-3 to ERS1/2 to Envisat illuminate areas measuring 15 to 30 kilometres in diameter in each measurement. Accordingly, the backscattered signal contains superimposed information generated by many small scatter points within the illuminated area. Above the open sea, this is not a problem because the mean surface of the sea tends to vary little within the illuminated area, and the mean height of the wind-formed waves can be determined from the shape of the radar echo.

This being so, derived ocean topographies are precise down to about a few centimetres, which is fairly exact. At the inclined and often rough margins of an ice shield, however, errors may quickly increase to more than 100 metres. Deformations in the sea ice and individual ice floes are beyond the resolution capability of the satellite-based radar altimeters employed so far. For this reason, sea-ice thickness measurements are highly error-prone because open leads cannot be distinguished from ice floes. Moreover, the elevation models now existing of Greenland and the Antarctic are too imprecise especially at the shelf margins, where climatic activity is very high.



Schematische Darstellung der Wasserzirkulation im Atlantischen Ozean: Warmes Wasser fließt nach Norden, kühlt sich dort ab, sinkt und fließt zurück nach Süden. (ESA)

Circulation diagram of the Atlantic ocean water: warm water is flowing northward, cooling down, sinking and flowing back southward. (ESA)

Orbit wird CryoSat-2 bestehende Datenlöcher nahe der Pole schließen und die Höhenmodelle der großen und mittleren Eisschilde und Eiskappen entscheidend verbessern.

### Entwicklung und Missionsablauf

Sowohl Entwicklung und Bau des Satelliten als auch Start und Missionsdurchführung sind europäische Gemeinschaftsunternehmungen. An Design und Konstruktion von CryoSat-2 wirkten mehr als 20 europäische Unternehmen mit, darunter auch mehrere deutsche Firmen wie EADS Astrium (Friedrichshafen) als Hauptauftragnehmer, das Satellitentestzentrum IABG (Otto-brunn), TESAT Spacecom (Backnang) sowie das Zentrum für angewandte Raumfahrt-Technologien und Mikrogravitation (ZARM) der Universität Bremen. Die Führung zur Entwicklung des SIRAL-Instrumentes lag bei Thales Alenia Space Industries (Frankreich).

Die zentrale Leitstelle, die für Steuerung und Kontrolle des Satelliten zuständig ist, befindet sich in Darmstadt. Sie wird vom Europäischen Raumflugkontrollzentrum (ESOC) der ESA betrieben und kommuniziert mit dem Satelliten über die ESA-Bodenstation im schwedischen Kiruna. Die wöchentliche Planung der Aufnahmemaske und der zugehörigen Kommandoabfolge für CryoSat-2 erfolgt am European Space Research Centre (ESRIN) der ESA in Frascati bei Rom. Verarbeitung und Prozessierung der Rohdaten zu CryoSat-2-Produkten und deren Verteilung an Wissenschaftler weltweit wird direkt durch die Bodenstation Kiruna durchgeführt. Datenarchivierung, Reprozessierung sowie die Berechnung des genauen Orbits erfolgen am Centre National d'Études Spatiales (CNES) in Toulouse.

### Deutscher Anteil an CryoSat-2

Die Mission CryoSat-2 wurde im Rahmen des ESA-Programms „Living Planet“ realisiert. Deutschland ist mit einem Finanzierungsanteil von 24 Prozent führend an diesem Programm beteiligt. Die Gesamtkosten von CryoSat-2 belaufen sich auf circa 140 Millionen Euro. Durch die umfangreiche finanzielle Beteiligung und Befürwortung des Nachbaus von Cryosat unterstreicht die Bundesregierung ihr großes Engagement für eine nachhaltige Klimaforschung und -politik.

Dies spiegelt sich auch in dem Beitrag Deutschlands an dem CryoSat-Kalibrierungs- und Validierungs-EXperiment (CryoVEx) wider: Mehrere deutsche Wissenschaftler des Bremerhavener Alfred-Wegener-Institutes (AWI) und der Technischen Universität Dresden erhalten im Rahmen dieser Messkampagnen zur Kalibrierung und Validierung von CryoSat-2 Fördermittel von der DLR Raumfahrt-Agentur im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi).

CryoSat-2 will ring in a new era in satellite altimetry: using the synthetic aperture radar (SAR) technology; its main instrument, SIRAL, mathematically generates an aerial about 50 metres in length, which greatly improves resolution on the ground. The illuminated area shrinks from 20 kilometres to 250 metres, enabling the instrument to distinguish between open leads and individual ice floes to measure the ice freeboard and hence the sea ice thickness. However, the SAR offers improved resolution capacity only along the track of the satellite, whereas any surfaces inclined across its track will still cause errors. For this reason, SIRAL consists of two across-track aerials connected by a frame made of carbon fibre that is absolutely non-deformable. Thus, the difference in phase between the two aerials can be used to exactly determine not only the site from which the radar beam was scattered back but also the across-track inclination of the surface. Known as interferometry (SARIn), this method will also be used in the German TanDEM-X mission in the near future.

To maintain continuity with the precursor missions and reduce the data rate, CryoSat-2 will be operating in the conventional altimeter mode above the oceans and the 'flat' interior of the Antarctic and Greenland ice sheets. The SAR and SARIn modes will be activated above sea ice and the rough margins of ice sheets, respectively. Its combination of SAR, interferometry and a nearly polar orbit will enable CryoSat-2 to reduce any data gaps existing near the poles and crucially improve the quality of the elevation models of the large and medium-sized ice sheets and ice caps.

### German share in CryoSat-2

The development and assembly of the satellite as well as its launch and the implementation of its mission all constitute joint European projects. More than 20 European enterprises were involved in the design and construction of CryoSat-2, including several German companies like EADS Astrium of Friedrichshafen as main contractor, the IABG satellite test centre at Ottobrunn, TESAT Spacecom at Backnang, and the Centre for Applied Space Technologies and Microgravitation (ZARM) at Bremen University. The development of the SIRAL instrument was led by Thales Alenia Space Industries (France).

The control centre from which the satellite will be operated and monitored is situated in Darmstadt. Run by ESA's European Space Operations Centre (ESOC), it will communicate with the satellite through the ESA ground station in Kiruna, Sweden. ESA's European Space Research Centre (ESRIN) in Frascati near Rome will be in charge of planning the image masks and the related command sequences for CryoSat-2 at weekly intervals. Incoming raw data will be processed into CryoSat-2 products



Validierungsarbeiten im Rahmen von CryoVEx in Alaska (AWI)  
CryoVEx validation operations in Alaska (AWI)

Bei CryoVEx handelt es sich um glaziologische Untersuchungen und Messungen durch Hubschrauber und Flugzeuge innerhalb ausgewählter Gebiete, die zeitnah zu CryoSat-2-Überflügen koordiniert werden. Diese Experimente sind eine besondere Herausforderung hinsichtlich ihres logistischen Aufwandes und bedürfen der langfristigen abgestimmten Planung auch auf internationaler Ebene. Die seit 2004 regelmäßig untersuchten Testgebiete befinden sich auf Grönland, auf den Eiskappen von Austfonna (Spitzbergen) und Devon (kanadische Arktis), im Dronning-Maud-Land (Antarktis) sowie auf dem Meereis in der Lincoln-See. Hier werden Oberflächenhöhe, Oberflächenrauigkeit, interne Schichtung, Dichte, Eislinsen oder die Meereisdicke erfasst und anschließend deren Einfluss auf das SIRAL-Echo analysiert. Dadurch können räumliche und zeitliche Änderungen des Eindringverhaltens der Radarwellen in die obersten Neuschnee- beziehungsweise darunterliegende, ältere Firn-Schichten abgeschätzt werden. Bei der Bestimmung der Oberflächenhöhe werden auch mögliche Fehlerquellen, die mit dem unterschiedlich tiefen Eindringen der Wellen in unterschiedliche dichte Schichten einhergehen, analysiert.

Das vom Flugzeug getragene Instrument ist ein eigens für CryoVEx von ESA und RST Radarsystemtechnik GmbH entwickeltes Flugzeugradar-Altimeter (ASIRAS), dessen Funktionsweise und Frequenzbereich (Ku-Band, 13,5 Gigahertz) dem SIRAL sehr ähnlich sind. Durch den gleichzeitigen Betrieb eines Laseraltimeters gewannen die beteiligten Wissenschaftler bereits im Vorfeld der Mission wichtige Informationen in punkto Genauigkeit und Eindringverhalten, aber auch die nötige Expertise, um bestmögliche Vergleichsmessungen während der CryoSat-2-Operationsphase zu gewährleisten. Federführend in der Erhebung und der Analyse der luftgestützten Meereisdicken- und ASIRAS-Daten sind Wissenschaftler des AWI. Insbesondere in der Antarktis bewährte sich das Fachwissen der Wissenschaftler von der TU Dresden und dem AWI, als diese um den Jahreswechsel 2008/2009 herum hochgenaue bodengestützte GPS-Messungen zeitnah mit ASIRAS- und Laseraltimetermessungen über Blaueis im Dronning-Maud-Land im Rahmen von CryoVEx durchführten.

In den Gebäuden des AWI ist neben den für CryoVEx zuständigen Wissenschaftlern auch das deutsche CryoSat-Projektbüro angesiedelt. Es fungiert als Bindeglied zwischen Öffentlichkeit und Wissenschaft, informiert die deutsche Nutzergemeinde, akquiriert potenzielle Datennutzer und vertritt die Nutzerinteressen gegenüber der ESA.

and distributed to scientists worldwide by the Kiruna ground station itself. The Centre Nationale d'Etudes Spatiales (CNES) in Toulouse will be responsible for archiving and reprocessing the satellite's data and computing its precise orbit.

#### CryoVEx – validation and calibration

The CryoSat-2 mission was carried out under ESA's Living Planet programme. Providing 24 percent of the requisite funds, Germany plays a leading part in this program. The total cost of CryoSat-2 amounts to c. 140 million Euros. The fact that the federal government is substantially contributing to the funding of CryoSat and endorsed its rebuilding underlines its extensive commitment to a consistent line in climate research and policy.

This commitment is similarly reflected by Germany's contribution to the CryoSat calibration and validation experiment (CryoVEx): several German scientists at the Bremerhaven Alfred Wegener Institute (AWI) and the Technical University of Dresden are financially supported by the DLR Space Agency on behalf of the Federal Ministry of Economics and Technology (BMW).i)

CryoVEx involves glaciological investigations and measurements carried out within selected areas by helicopters and aircraft, coordinated closely with CryoSat-2 flyovers. Posing an unusual challenge because of the logistical effort involved, these experiments need to be planned a long way ahead and coordinated on the national as well as on the international plane. Regularly examined since 2004, the test areas are located on Greenland, the ice caps of Austfonna (Spitsbergen) and Devon (Canadian Arctic), in Dronning Maud Land (Antarctic) and on the sea ice of the Lincoln Sea. All these areas are surveyed for surface elevation and roughness, internal stratification, density, ice lenses and sea-ice thickness, factors whose influence on the SIRAL echo is analysed afterwards. This permits assessing spatial and temporal changes in the way in which radar waves penetrate the uppermost layers of fresh snow and the older firn layers below. When surface elevations are determined, potential errors caused by the variation in the depth to which radar waves penetrate layers of different density are analysed at the same time.

The airborne instrument is an aircraft radar altimeter (ASIRAS) developed specifically for CryoVEx by ESA and RST Radarsystemtechnik GmbH, whose functions and frequency range (Ku band, 13.5 gigahertz) closely resemble those of SIRAL. As a laser altimeter was used in parallel, the scientists involved were able to obtain important information about accuracy and penetration behaviour in the run-up to the mission. At the same time, they acquired the expertise needed to ensure optimum quality for the benchmark measurements during the operational phase of CryoSat-2. The acquisition and analysis of sea-ice thickness and ASIRAS data are coordinated by AWI scientists. The expertise of the scientists from TU-Dresden and the AWI came into its own when, around the turn of the year 2008, they conducted high-precision ground-based GPS measurements in conjunction with ASIRAS and laser altimeter measurements above blue ice in Dronning Maud Land under the CryoVEx project.

Besides the scientists in charge of CryoVEx, the AWI premises also accommodate the German CryoSat office. It acts as a link between scientific research and the general public, provides information to the German user community, acquires potential data users and represents their interests vis-à-vis ESA.

#### CryoSat-2 Technische Daten

<b>Geplante Missionsdauer</b>	5 Jahre (+ 6 Monate Inbetriebnahme-Phase)
<b>Umlaufbahn</b>	nicht sonnensynchron
<b>Neigung</b>	92 Grad
<b>Wiederholrate</b>	369 Tage (30 Tage Subzyklus)
<b>Bahnhöhe</b>	717 Kilometer
<b>Gewicht</b>	720 Kilogramm (einschließlich 37 Kilogramm Treibstoff)
<b>Größe</b>	4,6 Meter x 2,4 Meter x 2,2 Meter
<b>Nutzlast</b>	SIRAL (SAR/Interferometric Radar Altimeter) Star Tracker Orientierung der interferometrischen Basislinie DORIS Bestimmung des genauen Orbits Laser Retroreflector Positionierungsverfolgung durch Laser auf der Erdoberfläche
<b>Räumliche Auflösung (SAR-Mode)</b>	250 Meter in Flugrichtung
<b>Flugkontrolle</b>	European Space Operations Centre (ESOC), Darmstadt
<b>Bodenstation</b>	Kiruna Bodenstation, Schweden
<b>Datenprozessierung/ Archivierung</b>	Dnepr. Start am 8. April 2010 von Baikonur, Kasachstan
<b>Trägerrakete</b>	Konventioneller Mode:
<b>Datenaufkommen</b>	51 Kilobyte pro Sekunde SAR-Mode: 11,3 Megabyte pro Sekunde SARIn-Mode: 2 x 11,3 Megabyte pro Sekunde = 250 Gigabyte pro Tag
<b>Datenprodukte</b>	Level_1 (Full Bit Rate): 50 Gigabyte pro Tag Level_1b (SAR prozessierte Echos): 4 Megabyte pro Tag Level_2 (Höhen bzw. Meereisdicken): 50 Megabyte pro Tag
<b>Frequenz</b>	Ku-Band: 13,575 GigaHertz
<b>Pulswiederholrate</b>	LRM Low Resolution Mode: 1,97 Kilohertz SAR(In): 17,8 Kilohertz
<b>Aufnahmefenster</b>	LRM: 60 Meter SAR: 60 Meter SARIn: 240 Meter
<b>Samplingintervall</b>	0,47 Meter

#### Internetlinks:

<http://www.cryosat.de/>  
<http://www.esa.int/esaMI/Cryosat/index.html>  
[http://www.esa.int/esaCP/SEMJE8NEG5G\\_Germany\\_0.html?source=lyris](http://www.esa.int/esaCP/SEMJE8NEG5G_Germany_0.html?source=lyris)  
(großes Special in deutscher Sprache)

*Dr. Veit Helm ist als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Glaziologie des Alfred-Wegener-Institutes an den Validierungsarbeiten der Cryosat-2-Mission beteiligt.*

#### Technical data CryoSat-2

<b>Scheduled mission</b>	5 years duration (+ 6 months commissioning phase)
<b>Orbit</b>	not sun-synchronous
<b>Inclination</b>	92 degrees
<b>Repeat rate</b>	369 days (30-day subcycle)
<b>Orbital height</b>	717 kilometres
<b>Weight</b>	720 kilogrammes (including 37 kilograms of fuel)
<b>Dimensions</b>	4.6 metres x 2.4 metres x 2.2 metres
<b>Payload</b>	SIRAL (SAR interferometric radar altimeter) Star tracker interferometric baseline orientation DORIS precise orbit determination Laser retroreflector position tracking by ground-based lasers
<b>Spatial resolution (SAR mode)</b>	250 metres along track
<b>Flight control</b>	European Space Operations Centre (ESOC), Darmstadt
<b>Ground station</b>	Kiruna ground station, Sweden
<b>Data processing/archiving launcher</b>	Dnepr. Launch on April 8, 2010 from Baikonur, Kazakhstan
<b>Data rates</b>	Conventional mode: 51 kilobits per second SAR mode: 11.3 megabits per second SARIn mode: 2 x 11.3 megabits per second = 250 gigabits per day
<b>Data products</b>	Level_1 (full bit rate): 50 gigabits per day Level_1b (processed SAR echos): 4 gigabits per day Level_2 (elevation and/or sea ice thickness): 50 megabits per day
<b>Frequency</b>	Ku band: 13.575 gigahertz
<b>Pulse repeat rate</b>	LRM (low resolution mode): 1.97 kilohertz SAR(In): 17.8 kilohertz
<b>Image width</b>	LRM: 60 metres SAR: 60 metres SARIn: 240 metres
<b>Sampling interval</b>	0.47 metres

#### Internet links:

<http://www.cryosat.de/>  
<http://www.esa.int/esaMI/Cryosat/index.html>  
[http://www.esa.int/esaCP/SEMJE8NEG5G\\_Germany\\_0.html?source=lyris](http://www.esa.int/esaCP/SEMJE8NEG5G_Germany_0.html?source=lyris)  
(detailed German-language special)

*A scientific assistant with the glaciology department of the Alfred Wegener Institute, Dr. Veit Helm is involved in the validation activities of the CryoSat-2 mission.*

# Sonne und Erde im Visier von STEREO

Zwischenbilanz vor dem nächsten Sonnenmaximum

Von Dr. Volker Bothmer und Dr. Roland Gräve

Nach einer langen Phase ungewöhnlich niedriger Sonnenaktivität mehrten sich derzeit die Anzeichen, dass die stürmische Phase eines neuen Sonnenzyklus begonnen hat. Unter anderem ist dies erkennbar an vermehrt auftretenden Flecken an der Oberfläche unseres Zentralgestirns. Elf Jahre dauert im Durchschnitt der Zyklus zwischen zwei Hoch-Zeiten. Bei der Untersuchung der Sonnenstürme und den damit verbundenen Böen des Sonnenwindes, die Wasserstoff- und Heliumteilchen bis zur Erde und darüber hinaus ins Sonnensystem schießen, greifen Wissenschaftler auf Daten der US-Raumsonden STEREO A und STEREO B zurück. Beide beobachten seit über drei Jahren die äußere Atmosphäre der Sonne, die Korona, aus völlig neuen Perspektiven. Von ihren aktuellen Positionen weit draußen im All können die Zwillingssonden das Sonne-Erde-System erstmals dreidimensional abbilden. An der Entwicklung der SECCHI-Teleskope und verschiedener Teilcheninstrumente der IMPACT-Instrumentensuite, die dabei zum Einsatz kommen, waren auch deutsche Forschungseinrichtungen und Universitäten beteiligt, gefördert durch die DLR Raumfahrt-Agentur.

## Sun and Earth in STEREO focus

Taking stock before the next solar maximum

By Dr. Volker Bothmer and Dr. Roland Gräve

Following a long period of unusually low solar activity, we currently witness increasing evidence for the onset of the stormy phase of a new solar activity cycle, e.g., as seen by the growing number of spots on the surface of our central star. Eleven years is the average length of a solar activity cycle between two sunspot maxima. Investigating solar storms where gusts of solar wind eject hydrogen and helium particles into the Solar System as far as Earth and beyond, scientists use data from STEREO A and STEREO B, two US-operated space probes. For more than three years these two have been observing the Sun's outer atmosphere, the corona, from some entirely new perspectives. From their current positions far away in deep space the twin probes are producing the first ever three-dimensional images of the Sun-Earth System. Sponsored by the DLR Space Agency, a number of German research institutions and universities took part in the development of the satellites' SECCHI telescopes and several particle instruments of the IMPACT instrument suite.

Ein koronaler Materieausstoß, beobachtet mit dem STEREO-Instrument SECCHI EUVI A am 25. März 2008 (V. Bothmer, STEREO/SECCHI-Konsortium).

Coronary mass ejection, observed by the STEREO instrument SECCHI EUVI A on March 25, 2008 (V. Bothmer, STEREO/SECCHI syndicate)

## Sonnenaktivität und Weltraumwetter

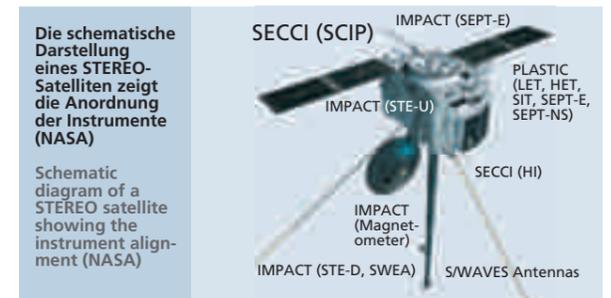
Die Sonnenkorona ist die Quelle eines kontinuierlichen Stroms ionisierter Wasserstoff- und Heliumteilchen mit den zugehörigen Elektronen. Dieser Teilchenstrom wird auch „Sonnenwind“ genannt. Er transportiert das Magnetfeld der Sonne in den Weltraum und erzeugt elektrische Felder gegenüber den um die Sonne kreisenden Kometen und Planeten. Die Variabilität des Sonnenwindes ist daher ein wesentlicher Bestandteil des Weltraumwetters. Besonders heftige Böen des Sonnenwindes entstehen bei starken Gasausbrüchen in der Korona. Heftige koronale Massenauswürfe, die oft zusammen mit solaren Strahlungsblitzen auftreten, können mit Geschwindigkeiten von bis zu zehn Millionen Kilometern pro Stunde die 150 Millionen Kilometer entfernte Erde in weniger als einem Tag erreichen. Koronale Materieausstöße führen zu starken „Stürmen“ im Weltall. Neben den Polarlichtern können sie auf der Erde und im irdnahen Raum eine Vielzahl unerwünschter Effekte auslösen wie zum Beispiel Störungen des Funkverkehrs sowie der Satellitennavigation und -kommunikation, Korrosion in Öl-Leitungen und mitunter auch Stromausfälle.

## STEREO – zwei Augen im All

Beobachtungen der Korona, die im Vergleich zur Sonnenscheibe etwa eine Million Mal lichtschwächer ist, und ihrer Strahlung im ultravioletten Wellenlängenbereich sind äußerst schwierig umsetzbar und nur vom Weltraum aus detailliert möglich. Bislang wurden solche Messungen von einzelnen Weltraumsonden aus durchgeführt. Noch nie konnte die Sonnenkorona aber aus zwei Blickrichtungen gleichzeitig, das heißt räumlich, beobachtet werden. Auch konnte vorher noch nie die Ausbreitung der extrem lichtschwachen Materieausstöße, deren Intensität nur etwa  $10^{-12}$  bis  $10^{-14}$  der Intensität der sichtbaren Sonnenscheibe beträgt, im interplanetaren Raum verfolgt werden.

Diese Lücke schloss die NASA, als sie die beiden weitgehend baugleichen Sonden des „Solar TERrestrial Relations Observatory“ (STEREO) ins All brachte. Am 25. Oktober 2006 wurden die Zwillingssonden mit einer Boeing Delta II-Rakete von Cape Canaveral gestartet. In den darauffolgenden Monaten nutzte die NASA nach einer Reihe ausgeklügelter Bahnmanöver die Schwerkraft des Erdmondes, um die Sonden in ihre geplanten Umlaufbahnen um die Sonne zu katapultieren. Die Sonde STEREO A („Ahead“) kreist seitdem, unserer Erde etwas voraus, auf einer geringfügig näheren Bahn im Abstand von etwa 0,96 astronomischen Einheiten (1 AE = 150 Millionen Kilometer), um die Sonne. STEREO B („Behind“) dagegen folgt der Erde auf einer leicht sonnenferneren Bahn im Abstand von etwa 1,04 AE. Durch diese speziellen Orbits wächst der Winkelabstand der Sonden gegenüber der Sonne-Erde-Linie um etwa 23 Grad pro Jahr an, das heißt um etwa 46 Grad gegeneinander. Ende Mai 2010 hatten beide Sonden Winkelabstände relativ zur Erde von 72 Grad (STEREO A) und 70 Grad (STEREO B) erreicht.

Das Konzept der langsam variierenden Positionen beider STEREO-Sonden wurde vom NASA STEREO Science Definition Team (SDT) unter deutscher Beteiligung entwickelt. Je nach Winkelabstand der Sonden zueinander und entsprechend der vom Abstand zur Erde abhängigen Telemetrierate des Daten-



## Solar activity and space weather

The corona of the Sun is the source of a continuous flow of ionised hydrogen and helium particles and corresponding electrons. This particle flow is referred to as 'solar wind'. It carries the Sun's magnetic field into space, generating electric fields affecting the comets and planets revolving around the Sun. The variability of the solar wind constitutes a major part of what is called space weather. Particularly strong gusts of solar wind are caused by intense eruptions of coronal gas. Powerful coronal mass ejections, often associated with flashes of solar radiation, moving at speeds of up to ten million kilometres per hour, reach the Earth within less than a day at its distance of 150 million kilometres from the Sun. Coronal mass ejections cause strong storms in space. Besides producing polar lights they can lead to a wide variety of unwanted effects on Earth and its vicinity, such as disturbances of radio traffic, satellite navigation and communication, corrosion of oil pipelines and sometimes electric power outages.

## STEREO – two eyes in space

Observing the corona, which is about one million times weaker in intensity than the visible solar disc, and its radiation at ultraviolet wavelengths is extremely difficult and can only be done in detail from space. So far such measurements have only been conducted by single space probes. Never before has the corona been studied from two perspectives simultaneously, i.e. in a stereoscopic view. And never before has it been possible to track the path of the extremely faint ejections of coronal matter in interplanetary space, the brightness of which drops to only  $10^{-12}$  –  $10^{-14}$  of that of the visible Sun.

NASA closed this gap by deploying two almost identical probes into space which make up the Solar TERrestrial Relations Observatory (STEREO). On October 25, 2006 the twin probes were launched on a Boeing Delta II rocket from Cape Canaveral. In the following months, NASA performed a number of sophisticated orbital manoeuvres, using the Moon's gravity to catapult the probes into their planned orbits around the Sun. Since then probe STEREO A ('Ahead') is revolving around the Sun, ahead of Earth, in an orbit slightly closer to the Sun, at a distance of about 0.96 astronomical units (1 AU = 150 million kilometres). In contrast, STEREO B ('Behind') is trailing behind the Earth in a slightly more distant orbit at about 1.04 AU. As a result of these special orbits, the angular distance of the probes relative to the Sun-Earth line increases by about 23 degrees per year, i.e. by about 46 degrees relative to each other. At the end of May 2010 the two probes had separated to angular distances of 72 degrees (STEREO A) and 70 degrees (STEREO B) relative to the Earth.

The concept of the gradually varying angular separation of the two STEREO probes has been developed by NASA's STEREO Science Definition Team (SDT) with German involvement. As a function of the angular distance of the two probes relative to each other and of the telemetric rate of data reception, which

empfangs ermöglicht es die Umsetzung unterschiedlicher wissenschaftlicher Zielsetzungen:

varies with the distance to Earth, the system facilitates several distinct research objectives:

Winkelabstand von STEREO A zu STEREO B	Zielsetzung
5° bis 10°	3-D Detailaufnahmen der Sonnenkorona und ihrer Dynamik.
Ab etwa 10°	Stereoskopische Aufnahmen von Sonneneruptionen, insbesondere von koronalen Materieausstößen.
Ab etwa 30°	Beobachtungen der Auswirkungen der Sonnenaktivität im Weltraum durch Korrelation von Sonnenaufnahmen mit interplanetaren Messungen.
Ab etwa 60°	Beobachtung von Materieausstößen über den gesamten Bereich von der Sonne bis hin zur Erde, einschließlich ihrer Weltraumwettereffekte. Beobachtung der von der Erde aus gesehen hinter dem sichtbaren Sonnenrand liegenden Korona und ihrer Dynamik. Erstellung zuverlässiger Weltraumwettervorhersagen.
Bei etwa 120°	Durchflug der Lagrange-Punkte L4 und L5 des Sonne-Erde-Systems und Messungen der interplanetaren Bedingungen in diesen Raumgebieten.
Um etwa 180°	Optimale Position zur Beobachtung koronaler Materieausstöße und ihrer Auswirkungen auf die Erde und für Weltraumwettervorhersagen.
Größer als 180°	Beobachtungen der erdabgewandten Seite der Sonne und Wiederholung der obigen Messungen.

Angular separation between STEREO A and STEREO B	Objective
5° to 10°	Detailed 3-D views of the solar corona and its dynamics.
From c. 10°	Stereoscopic imaging of solar eruptions, especially of coronal mass ejections.
From c. 30°	Observations of the impact of solar activity in space through correlation of solar images with interplanetary measurements.
From c. 60°	Direct tracking of coronal mass ejections all the way from Sun to Earth and investigations of their space weather effects. Observations of far coronal dynamics on the Sun's back side as viewed from Earth. Provision of reliable space weather forecasts.
At c. 120°	Passage through Lagrangian points L4 and L5 of the Sun-Earth System and measurements of the interplanetary conditions in these regions of space.
At around 180°	Optimum position to record earthward directed coronal mass ejections and their space weather effects.
Greater than 180°	Observations of the far side of the Sun and repetition of the measurements listed above.

**Wissenschaftliche Instrumente und deutsche Beiträge zu STEREO**

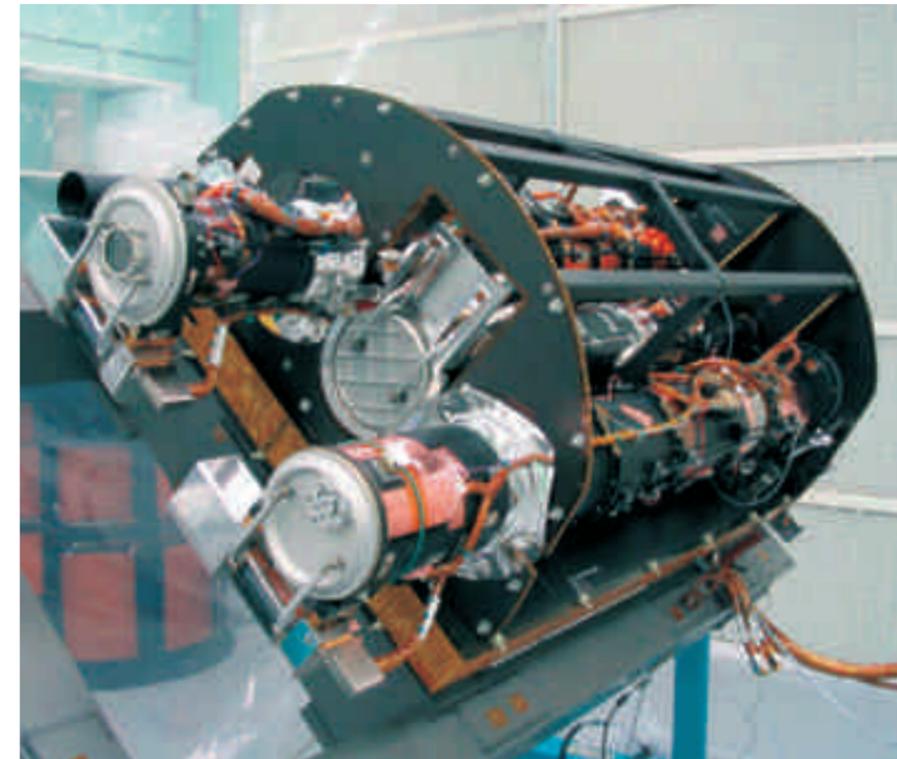
An Bord beider Satelliten befinden sich speziell entwickelte Instrumente zur optischen Erfassung der Sonne und von Plasmastrukturen (Materieausstöße, Sonnenwind, Kometenschweife) im interplanetaren Raum, zur Erfassung von der Sonne ausgehender Teilchenströme und Magnetfelder sowie zur Messung solarer Radiostrahlung.

**Scientific instruments and German contributions to the STEREO mission**

The two satellites carry instruments specifically developed for imaging the Sun and plasma structures (CMEs, solar wind, cometary tails of comets) in interplanetary space, for measuring solar particle flows and magnetic fields and for recording solar radio emission.

Instrumenten-Suite	Name	Details	Messbereich
Sun-Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation	SECCHI	2 Koronographen,	1,4-15 Sonnenradien
		1 Extrem-Ultraviolett-Imager,	< 1,7 Sonnenradien
		2 interplanetare Kameras	ca. 15-318 Sonnenradien (für ein Blickfeld senkrecht zum Sonnenrand)
In-situ Measurements of PArticles und CME Transients	IMPACT	Teilchendetektoren und Magnetometer	In-situ (gemessen am jeweiligen Ort der Sonde)
PLAsma und Supra-Thermal Ion Composition	PLASTIC	Plasmadetektoren	In-situ (gemessen am jeweiligen Ort der Sonde)
STEREOWAVES	SWAVES	Radiowellenantennen	2,5 Kilohertz bis 34 Megahertz

Instrument Suite	Name	Details	Measurement Range
Sun-Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation	SECCHI	2 coronagraphs,	1.4-15 solar radii
		1 extreme ultraviolet imager,	< 1.7 solar radii
		2 interplanetary cameras	15-318 solar radii (for a field of view normal to the Sun's limb)
In-situ Measurements of PArticles and CME Transients	IMPACT	Particle detectors and magnetometers	In-situ (measured at the position of the probe itself)
PLAsma and Supra-Thermal Ion Composition	PLASTIC	Plasma detectors	In-situ (measured at the position of the probe itself)
STEREOWAVES	SWAVES	Radiowave antenna	2.5 kilohertz to 34 megahertz



Die STEREO/SECCHI-Sonnen-teleskope in den Testräumen (NRL, STEREO/SECCHI Konsortium)  
The STEREO/SECCHI solar telescopes in the test facilities (NRL, STEREO/SECCHI Consortium)

**Experimente auf STEREO**

Die SECCHI-Teleskope sind nach dem italienischen Astronomen Angelo Secchi (1818-1878) benannt, dem erste optische Beobachtungen der Korona gelangen. Die Helligkeit der Korona beträgt nahe der Sonne nur etwa ein Millionstel der Intensität der sichtbaren Sonnenscheibe. SECCHI besteht aus jeweils fünf Spezialkameras, die das wissenschaftliche Herzstück der Mission bilden. Mit den interplanetaren Kameras können erstmals sogar Objekte mit einer um 10-14 fach geringeren Intensität der sichtbaren Sonnenscheibe beobachtet werden.

**STEREO Experiments**

The SECCHI telescopes were named after the Italian astronomer Angelo Secchi (1818-1878), who obtained the first optical observations of the solar corona. The brightness of the corona near the Sun is only about a millionth of the intensity of the Sun's visible disc. The scientific centrepiece of the mission, the SECCHI telescope suite, is made up of five special cameras. The two interplanetary cameras are the first which can record objects to a brightness of only 10-14 times the intensity of the visible disc of the Sun.

Wichtige Komponenten der SECCHI-Instrumente wurden unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung (MPS) in Katlenburg-Lindau in Zusammenarbeit mit dem Institut für Astrophysik der Universität Göttingen (IAG) und dem Institut für Extraterrestrische und Angewandte Physik der Universität Kiel (IEAP) entwickelt und gefertigt. Die Eintrittsaperturen der SECCHI-Teleskope besitzen spezielle Kalibrationsmechanismen, die exzellente Beobachtungen der Sonne im gesamten Missionsverlauf gewährleisten. MPS und IAG entwickeln Software-Routinen und Visualisierungen für die 3-D-Analyse der STEREO-Messdaten sowie Weltraumwetter-Frühwarnsysteme. Am MPS wurde auch die Flugzeitelektronik des IMPACT-SIT Sensors entwickelt und gefertigt. Der Teilchen-Detektor IMPACT/SEPT wurde im IEAP entwickelt und gebaut. Als Co-Investigatoren sind das IEAP und das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching an den IMPACT- und PLASTIC-Instrumenten beteiligt.

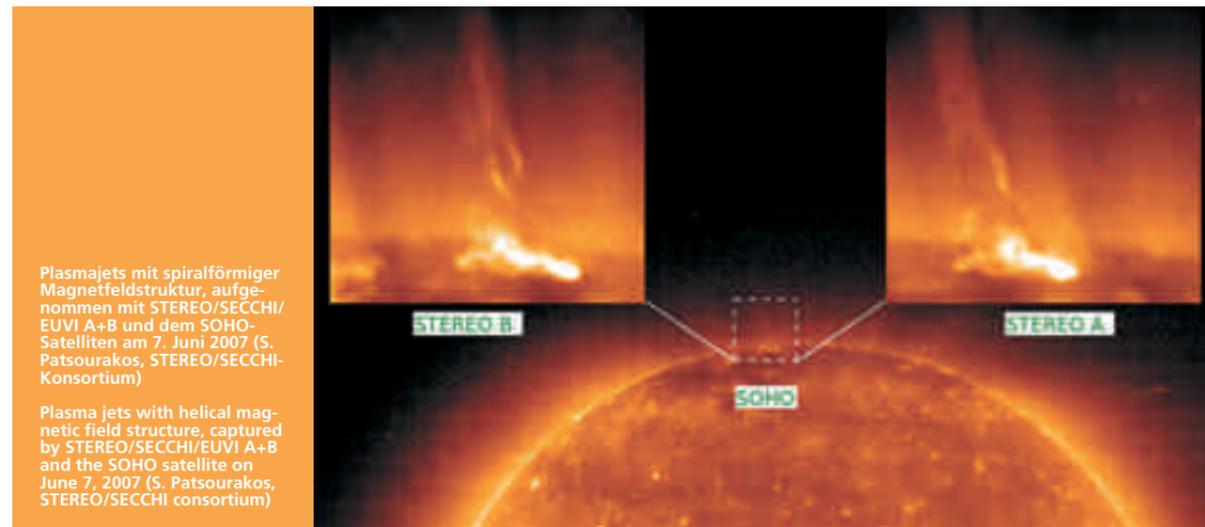
Several important components of the SECCHI instruments were developed and manufactured under the leadership of the Max Planck Institute for Solar System Research (MPS) based in Katlenburg-Lindau in collaboration with the Institute for Astrophysics at Göttingen University (IAG) and the Institute for Extraterrestrial and Applied Physics of Kiel University (IEAP). The design of the SECCHI telescopes' front apertures includes a special calibration mechanism permitting excellent observations of the Sun for the entire duration of the mission. MPS and IAG developed software routines and data visualisation techniques for the 3-D analysis of the STEREO data and space weather early warning systems. MPS also developed and manufactured the time-of-flight mass spectrometers of the IMPACT-SIT sensors. The particle detector IMPACT/SEPT was developed and built at IEAP. Furthermore, IEAP and the Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics in Garching are co-investigators of the IMPACT and PLASTIC instrument suites.

**Erste Bilder des Sonne-Erde-Systems**

Das Einschalten der STEREO-Instrumente gelang kurz nach dem Start wie geplant. Die Funktion der SECCHI-Kameras übertraf die Erwartungen der Forscher bei weitem. Seit dem Start der Mission funktionieren alle Instrumente und technischen Systeme einwandfrei. Insgesamt wurden bisher über fünf Millionen Aufnahmen der Sonne und des interplanetaren Raumes durch beide STEREO-Sonden gemacht. Aktuelle Bilder und eine Galerie der Highlights findet man auf der Internet-Seite <http://stereo.gsfc.nasa.gov/>.

**First images of the Sun-Earth System**

The STEREO instruments were successfully switched on shortly after launch, as planned. The performance of the SECCHI cameras by far exceeded the scientists' expectations. All instruments and technical systems have been performing flawlessly since the start of the mission. So far the two STEREO probes have recorded more than five million images of the sun and of interplanetary space. For current images and a gallery of mission highlights, please visit <http://stereo.gsfc.nasa.gov/>



Plasmajets mit spiralförmiger Magnetfeldstruktur, aufgenommen mit STEREO/SECCHI/EUVI A+B und dem SOHO-Satelliten am 7. Juni 2007 (S. Patsourakos, STEREO/SECCHI-Konsortium)

Plasma jets with helical magnetic field structure, captured by STEREO/SECCHI/EUVI A+B and the SOHO satellite on June 7, 2007 (S. Patsourakos, STEREO/SECCHI consortium)

#### Seit dem Start hat STEREO bereits eine Fülle neuer Erkenntnisse geliefert:

- die erstmalig beobachtete komplexe 3D-Struktur und unerwartete Dynamik der Sonnenaktivität in Verbindung mit der Variabilität der Magnetfelder auf der Sonnenoberfläche auf verschiedensten räumlichen und zeitlichen Skalen,
- unerreicht genaue Beobachtungen der Struktur von Kometenschweiften,
- detaillierte Beobachtungen der Entstehung und Entwicklung von Materieausstößen in der Sonnenkorona,
- erstmalige direkte Beobachtungen von Materieausstößen im interplanetaren Raum und ihrer vollständigen Entwicklung von der Sonne hin bis zur Erde, einschließlich des Studiums ihrer Weltraumwettereffekte und Auswirkungen auf die verschiedenen Objekte des Sonnensystems.

#### Sonnenstürme im Fokus

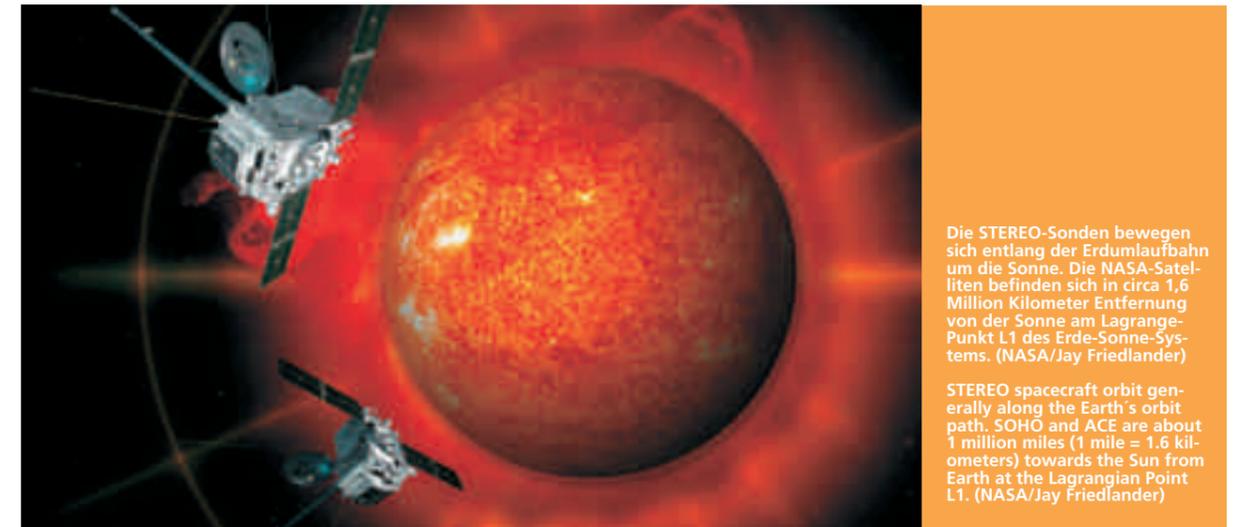
Obwohl die Sonnenaktivität im zu Ende gegangenen solaren Minimum in den Jahren 2006 bis 2009 unerwartet niedrig ausfiel, konnten mit STEREO bereits über 300 koronale Materieausstöße unter verschiedensten Blickwinkeln beobachtet und analysiert werden. Der zurzeit registrierte Anstieg ihrer Häufigkeit deutet auf ein solares Maximum um das Jahr 2012 herum hin. Der Orbit der beiden STEREO-Sonden bietet über die nächsten Jahre daher die einzigartige Gelegenheit, die bald zu erwartenden starken Sonnenstürme von der Sonne bis hin zur Erde direkt zu verfolgen und ihre Weltraumwettereffekte quantitativ zu erfassen. Durch die SECCHI-Kameras können sogar erstmals zuverlässige Weltraumwetterfrüherkennungen gegeben werden. Die Beobachtungen der STEREO-Mission werden unser Verständnis um die plasmaphysikalischen Prozesse im System Sonne-Erde in den nächsten Jahren tiefgreifend verändern.

#### Since its launch, STEREO has already delivered a wealth of new scientific results:

- For the first time the complex 3-D structure and unexpected dynamics of solar activity could be observed in connection with the variability of magnetic fields on the surface of the Sun, varying on wide spatial and time scales.
- The structures of comets' tails have been imaged in unprecedented detail.
- The onset and development of coronal mass ejections has been observed in detail.
- For the first time coronal mass ejections could directly be tracked all the way from Sun to Earth and their effects on space weather and on the different celestial bodies in the solar system could be studied.

#### Solar storms in focus

Despite the unexpected low level of solar activity during the past solar minimum in the years from 2006 to 2009, with STEREO more than 300 mass ejections could already be observed and analysed for a variety of perspectives. Their currently rising frequency suggests that the next solar maximum can be expected to occur around the year 2012. In the next few years the orbit of the two STEREO probes will provide the unique opportunity to directly track the soon to be expected powerful sun storms all the way from Sun to Earth, and to quantitatively study their space weather effects. The SECCHI cameras will for the first time even provide reliable early space weather warnings. Thus, over the next few years the observations from STEREO will provide us with a fundamentally new understanding of the physical plasma processes in the Sun-Earth System.



Die STEREO-Sonden bewegen sich entlang der Erdumlaufbahn um die Sonne. Die NASA-Satelliten befinden sich in circa 1,6 Million Kilometer Entfernung von der Sonne am Lagrange-Punkt L1 des Erde-Sonne-Systems. (NASA/Jay Friedlander)

STEREO spacecraft orbit generally along the Earth's orbit path. SOHO and ACE are about 1 million miles (1 mile = 1.6 kilometers) towards the Sun from Earth at the Lagrangian Point L1. (NASA/Jay Friedlander)

#### Überblick: Mission STEREO

<b>Start</b>	25. Oktober 2006, 20:52 Uhr Ortszeit von Cape Canaveral, Florida, USA (26. Oktober, 02:52 Uhr MESZ)
<b>Trägerrakete</b>	dreistufige Delta II 7925
<b>Masse einer Sonde</b>	620 Kilogramm
<b>Äußere Abmessungen der Sonden</b>	Höhe: 1,14 Meter, Breite: 1,22 Meter (Startkonfiguration) bzw. 6,47 Meter (Solargenerator ausgefahren), Tiefe: 2,03 Meter
<b>Datenübertragungsrate</b>	720 Kilobit pro Sekunde (downlink)
<b>Massenspeicher an Bord</b>	1 Gigabyte
<b>Lageregelung</b>	< 7 Bogensekunden (Kontrolle) < 1 Bogensekunde (Erfassung)
<b>Bodenstationen</b>	NASA Deep Space Network
<b>Missionsbetriebszentrum</b>	STEREO Mission Operations Center am Applied Physics Laboratory (APL) der Johns Hopkins University in Laurel, Maryland, USA
<b>Wissenschaftliches Datenzentrum</b>	NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA
<b>Wissenschaftlicher Betrieb</b>	getrennt für die vier Experimente in eigenen „Science Operations“

#### The STEREO mission at a glance

<b>Launch date</b>	October 25, 2006, 20:52 hrs local time, Cape Canaveral, Florida, USA (October 26, 02:52 hrs CEST)
<b>Launch vehicle</b>	Three-stage Delta II 7925
<b>Mass of each satellite</b>	620 kilogrammes
<b>Outside dimensions</b>	Height: 1.14 metres Width: 1.22 metres (launch configuration), or 6.47 metres (solar generator fully extended), Depth: 2.03 metres
<b>Data transmission rate</b>	720 kilobits per second (downlink)
<b>On-board mass storage device</b>	1 gigabyte
<b>Attitude control system</b>	< 7 arc seconds (attitude adjustment) < 1 arc second (attitude determination)
<b>Ground stations</b>	NASA Deep Space Network
<b>Mission control</b>	STEREO Mission Operations Center at the Applied Physics Laboratory (APL) of the Johns Hopkins University in Laurel, Maryland, USA
<b>Scientific data centre</b>	NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA
<b>Operation of the science missions</b>	The four experiments are controlled separately from their dedicated 'Science Operations'

Dr. Volker Bothmer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Astrophysik der Universität Göttingen und Co-Investigator der Instrument Suites SECCHI und IMPACT auf STEREO. Er war im STEREO Science Definition Team der NASA an der Missionsplanung beteiligt.

Dr. Roland Gräve ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Extraterrestrick der DLR Raumfahrt-Agentur.

Dr. Volker Bothmer is a member of the scientific research staff at the Astrophysics Institute of Göttingen University and a co-investigator on the SECCHI and IMPACT instrument suites on STEREO. He has participated in the mission development as member of NASA's STEREO Science Definition Team (SDT).

Dr. Roland Gräve is a scientific assistant at the Space Science Department of the DLR Space Agency.

# „Sayonara Kaguya“ – gute Reise, Kaguya!

Japanische Mondmission liefert spektakuläre Bilder

Von Professor Jürgen Oberst und Ulrich Köhler

Am 20. Juni 2009 endete die japanische Erkundungsmission Kaguya mit dem kontrollierten Absturz der Sonde am Südpol des Mondes. Begonnen hatte die Reise am 13. September 2007 im japanischen Raumfahrtzentrum Tanegashima an Bord einer H-IIa-Trägerrakete. Die japanische Weltraumorganisation JAXA schlug mit dem Orbiter ein neues Kapitel der Mondforschung auf: Seit den amerikanischen Apollo-Missionen hatte die Erkundung des Erdenbegleiters in der Planetenforschung nur noch eine untergeordnete Rolle gespielt. Kaguya war die erste wissenschaftlich bedeutende Mission zur Erforschung des Erdtrabanten seit dreieinhalb Jahrzehnten. Fast 20 Monate umrundete die Sonde den Mond und lieferte wesentliche neue Erkenntnisse. Das DLR war über Professor Jürgen Oberst vom Institut für Planetenforschung in die Mission eingebunden.

'Sayonara Kaguya' – have a good trip, Kaguya!

Japanese Moon mission delivers spectacular results

By Professor Jürgen Oberst and Ulrich Köhler

On June 20, 2009, the Japanese exploratory mission Kaguya ended in the controlled crash of the probe near the south pole of the Moon. The journey had begun on September 13, 2007, when an H-IIa launcher took off from the Japanese spaceport Tanegashima. The Japanese space agency JAXA opened up a new chapter in lunar research when it launched its orbiter: since the end of the US Apollo missions, exploring the Earth's satellite had been taking a front rank in planetary research. After three decades and a half, Kaguya was the first mission of scientific importance to explore the Moon. Orbiting around the Moon for almost twenty months, the probe has added substantially to our knowledge. DLR was involved in the mission through Professor Jürgen Oberst of the Institute of Planetary Research.

Erdaufgang am Mondhorizont, aufgenommen von der Fernsehkamera an Bord von Kaguya/SELENE (JAXA)

Earthrise at the Moon horizon, captured by Kaguya's TV camera (JAXA)

Neben Kaguya, dem Namen einer japanischen Märchenprinzessin, trägt die Sonde auch die etwas nüchterne Bezeichnung SELENE (SELenological and ENgineering Explorer). Der japanischen Raumfahrt gelang damit eine beeindruckende Demonstration ihrer Leistungsfähigkeit. Sämtliche Missionsphasen, die vom JAXA-Weltraumzentrum in Tsukuba koordiniert und kontrolliert wurden, verliefen problemlos, fast alle Experimente funktionierten wie vorgesehen. Damit ist die JAXA die erste asiatische Raumfahrtagentur, der es gelungen ist, eine Raumsonde in eine Mondumlaufbahn zu befördern – noch vor China, das mit Chang'e-1 einen Monat später am Mond ankam, und den Indern, die mit Chandrayaan 1 im Oktober 2008 den Erdtrabanten erreichten. Alle drei asiatischen Raumfahrtationen haben auch für die Zukunft ehrgeizige Ideen hinsichtlich der Exploration des Mondes und planen nach den erfolgreichen Orbiter-Missionen Projekte für robotische Landungen. Als Nachfolgemission für Kaguya reifen bei der JAXA gegenwärtig Pläne für das Sondengespann SELENE 2, das aus einem Relais-Satelliten, einem Landemodul und möglicherweise auch einem Rover bestehen soll.

Die Ergebnisse von Kaguya sind beeindruckend: Japan katapultierte sich hiermit in die vorderste Reihe der Mondforschung. Hauptziel der Mission war es, neben umfangreichen geophysikalischen Messungen neue Bilddatensätze und Karten der Mondoberfläche zu erzeugen. Denn ein Großteil der aktuellen fotogeologischen Forschungsarbeiten wird immer noch auf der Grundlage von Bilddaten durchgeführt, die in den Sechzigerjahren von den fünf Lunar Orbiter-Sonden der NASA aufgenommen worden waren. Von den modernen Messungen versprechen sich Wissenschaftler Fortschritte bei der Beantwortung von Fragen nach dem Ursprung und der frühen Entwicklung des Mondes. Insgesamt sammelten 15 Instrumente Daten zu unterschiedlichen Aspekten der Mondforschung. Die Erprobung technologischer Konzepte und neuartiger Raumflugkomponenten für zukünftige Vorhaben der Mondforschung bildeten einen weiteren Schwerpunkt.

## Ein wissenschaftliches Schwergewicht

Seit 1972 die bemannten Apollo-Flüge eingestellt wurden, gab es nur zwei wissenschaftliche Mondmissionen, die amerikanischen Sonden Clementine und Lunar Prospector. Die Mondsonde SMART-1 der Europäischen Weltraumorganisation ESA konnte als Technologie-Experiment zudem zeigen, dass für robotische Sonden Ionentriebwerke eine Alternative bei interplanetaren Reisen darstellen. Trotz dieser Missionen blieb unser Wissen um den Erdenbegleiter lückenhaft. So ist nach wie vor die mineralogische und geochemische Zusammensetzung der Mondkruste nur unzureichend bekannt. Auch der innere Aufbau des Mondes ist zu großen Teilen unerforscht. Nicht einmal sein Ursprung und seine frühe Geschichte sind zweifelsfrei geklärt. Mit Wiederaufnahme der wissenschaftlichen Erforschung des Mondes rücken auch diese Fragen wieder stärker in den Brennpunkt der Forschung.

Besides Kaguya, the name of a Japanese fairy-tale princess, the probe was also given the somewhat less romantic name of SELENE (SELenological and ENgineering Explorer). Japanese astronautics impressively demonstrated its capabilities through it. Controlled and coordinated by JAXA's space operations centre at Tsukuba, all of the mission's phases passed without incident, and nearly all experiments worked out as planned. This makes JAXA the first Asian space agency to succeed in steering a space probe into an orbit around the Moon – ahead of China, whose Chang'e-1 arrived at the Moon one month later, and ahead of India, whose Chandrayaan 1 reached the Earth's satellite in October 2008. All three Asian space nations are pursuing ambitious ideas regarding the exploration of the Moon also for the future, planning automated landings to follow up their successful orbiter missions. JAXA, for one, is currently hatching plans to carry out a SELENE 2 mission, a multi-module probe that will consist of a relay satellite, a lander and possibly even a rover.

Kaguya's results are impressive. With Kaguya, Japan propelled itself to the front ranks in lunar research. Besides large volumes of geophysical measurements, the mission focused on generating new image data records and maps of the lunar surface. After all, current geological research is still largely based on image data recorded by NASA's five Lunar Orbiter probes in the 60s. Scientists hope that recent measurements will assist them in answering questions about the origin and early development of the Moon. Using a total of fifteen instruments, Kaguya gathered data about various aspects of lunar research. Another focus of the mission was on validating technological concepts and innovative space-flight components for future lunar research projects.

## A scientific heavyweight

After the end of the manned Apollo flights in 1972 there have been only two scientific missions to the Moon – two US probes called Clementine and Lunar Prospector. SMART-1, another Moon probe launched by the European Space Agency (ESA), was a technology demonstrator, which proved that the ion drive is indeed an alternative for robotic probes on interplanetary journeys. Yet our knowledge about the Earth's satellite remained patchy in spite of these missions. So, for example, we still do not know enough about the mineralogical and geochemical composition of the Moon's outer crust, and its inner structure remains largely unexplored as well. There are even doubts about its origin and its early history. Now that the scientific exploration of the Moon has been resumed, these questions are moving into the focus of research once again.

Kaguya consisted of a three-ton orbiter which started exploring the Moon from a circular 100-kilometer circumpolar orbit. A solar panel generated the c. 3.5 kilowatts of electricity consumed by the probe, the experiments and the communication systems.

Kaguya bestand aus einem drei Tonnen schweren Orbiter, der den Mond zunächst aus einer 100 Kilometer hohen, kreisförmigen polaren Umlaufbahn erkundete. Für die Stromversorgung von Sonde, Experimenten und Kommunikationssystemen wurden mit einem Solarpanel etwa 3,5 Kilowatt Strom erzeugt. Beim Start mit an Bord befanden sich zwei kleine Subsatelliten, Rstar (bzw. Okina) und Vstar (bzw. Ouna), die im Oktober 2007 in elliptische, polare Umlaufbahnen zwischen 100 und 800 Kilometer über der Mondoberfläche ausgesetzt wurden. Diese dienten als Relaisatelliten und führten im Zusammenspiel mit der Hauptsonde eine genaue Vermessung des Schwerefeldes durch.

Durch die Auswertung von Dopplereffekten der zwischen Orbiter, Subsatelliten und Bodenstationen laufenden Funksignale konnten die relativen Positionen der drei Satelliten zueinander im Raum mit einer Genauigkeit von zehn Zentimetern bestimmt werden. Mit Einbindung der Subsatelliten, die sich gleichzeitig in Sichtkontakt mit Kaguya und der Bodenstation befanden, waren erstmalig auch Bahnverfolgungen und genaue Schwerefeldbestimmungen auf der Mondrückseite möglich.

#### Mondfernsehen mit gestochen scharfen Bildern

Nach einer ersten Testphase begann am 21. Dezember 2007 ein systematisches Beobachtungsprogramm, das sich über 15 Monate erstreckte. Gegen Ende der Mission senkte die JAXA die Umlaufbahn der Sonde auf 50 Kilometer, um höhere Auflösungen bei Bilddaten und physikalischen Messungen zu erzielen. Wegen der regional stark schwankenden Anziehungskraft des Mondes konnte diese Bahn nur mit erheblichem Aufwand an Treibstoff aufrecht erhalten werden. Im April 2009 wurde Kaguya in eine elliptische Umlaufbahn gebracht, in der die Raumsonde noch tiefer, bis zu zehn Kilometer, an den Mond herangeführt wurde.

When the probe took off, it had two small sub-satellites on board, Rstar (or Okina) and Vstar (or Ouna), which were released in October 2007 into elliptical circumpolar orbits which varied in altitude between 100 and 800 kilometres. Serving as relay satellites, they interacted with the main probe to precisely map the Moon's gravitational field.

By evaluating Doppler effects in the exchange of radio signals between the orbiter, the sub-satellites and the ground stations, the positions of the three satellites relative to each other could be determined with a precision of ten centimetres. Moreover, the presence of sub-satellites in direct visual contact with both Kaguya and the ground station enabled tracking of the flight path and precise mapping of the gravitational field on the far side of the Moon for the first time.

#### The Moon on television in pin-sharp images

After an initial test phase, a 15-month programme of systematic observation commenced on December 21, 2007. Towards the end of the mission, JAXA reduced the altitude of the probe to 50 kilometres in order to improve the resolution of both image data and physical measurements. As the gravitational force of the Moon fluctuates widely between regions, the orbit could be maintained only by expending considerable amounts of fuel. In April 2009, Kaguya was put into an elliptical orbit that brought the probe down to no more than ten kilometres from the surface.

What attracted particular attention at first, however, was an 'experiment' that was in no way related to lunar research: NHK (Nippon Hoso Kyokai), Japan's public broadcasting company, had equipped Kaguya with a camera to record live 'TV clips'. Conforming to the state-of-the-art high-resolution HDTV standard, the images showed impressions of the Moon's surface that had so far been seen only by the astronauts in the Apollo command modules during their orbital flights between 1968 and 1972.

Besondere Aufmerksamkeit erzeugte jedoch zunächst ein „Experiment“, das eigentlich gar nicht der Mondforschung diente: NHK (Nippon Hoso Kyokai), die öffentlich-rechtliche japanische Rundfunkgesellschaft, lieferte für Kaguya eine Kamera, die in der Lage war, bewegte „Fernsehbilder“ aufzuzeichnen. Die Bilder im neuesten, hochauflösenden HDTV-Standard zeigen Eindrücke der Mondoberfläche, wie sie bisher nur die Astronauten der Apollo-Kommandomodule während ihrer Orbitalflüge zwischen 1968 und 1972 hatten.

#### Erster Blick in dunkle Krater am Südpol

Von wissenschaftlich hoher Bedeutung sind Aufnahmen mit der Stereokamera TC (Terrain Camera). Bei einer Bodenauflösung von etwa zehn Metern pro Pixel sind diese Bilddaten ein großer Schritt nach vorn bei der Interpretation von Oberflächenphänomenen auf dem Mond. Beeindruckend sind aus den Stereo-Bilddaten errechnete perspektivische Ansichten der Umgebungen der Landeplätze der sechs Apollo-Missionen oder von Strukturen komplexer Einschlagskrater. Besondere Aufmerksamkeit widmete das TC-Team einer genauen Bildkartierung der Südpolregion – die bei allen aktuellen Überlegungen für zukünftige Mondmissionen eine besondere Rolle spielt. Dort gibt es Gebiete, die sich dauerhaften Sonnenlichts erfreuen. Weil die Rotationsachse des Mondes, anders als bei der Erde, fast senkrecht auf der Ebene der Ekliptik steht, sind hoch gelegene topographische Punkte an den Polen fast permanent dem Sonnenlicht ausgesetzt. Dies ermöglicht eine ununterbrochene Versorgung mit Solarstrom.

Dagegen kennt man an den Polen Krater, die dauerhaft in Dunkelheit getaucht sind. Ende der Neunzigerjahre fand die amerikanische Sonde Lunar Prospector in einigen tiefen Kratern Hinweise auf Wassereis, das dort entweder an der Oberfläche oder vermischt mit dem Mondstaub vorhanden sein könnte. Die potenzielle Verfügbarkeit der Ressource Wasser könnte für zukünftige bemannte Mondmissionen oder Mondstationen von essenzieller Wichtigkeit sein.

#### A first glance into dark craters at the south pole

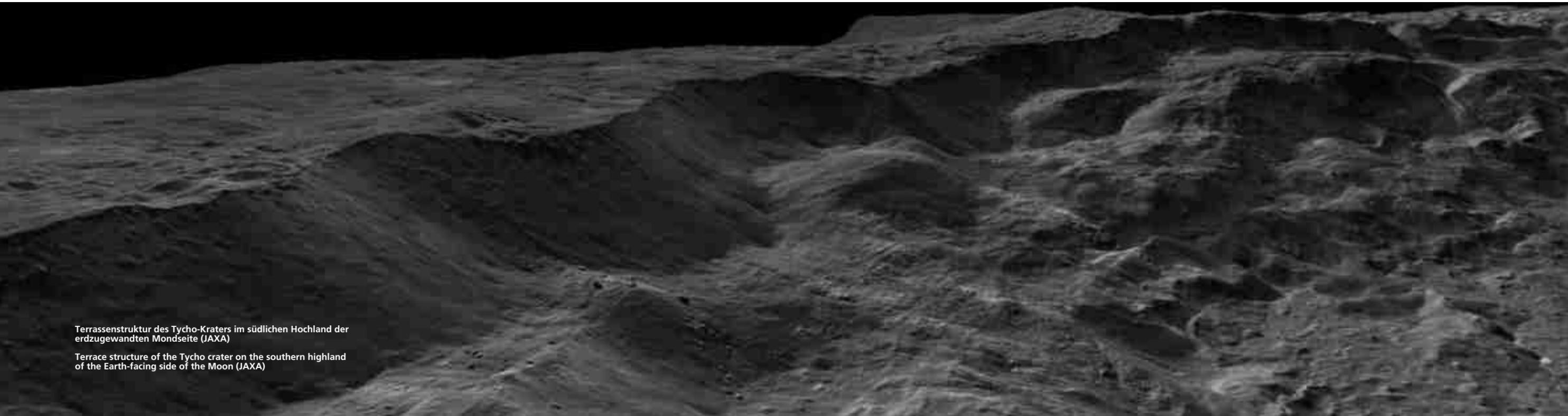
Great scientific importance is attached to images taken by the stereo terrain camera (TC). With their resolution of about ten meters per pixel, these pictures are great progress, when it comes to interpreting phenomena on the surface of the Moon. Derived from stereo image data, the perspective views showing the landing sites of the six Apollo missions or the structures of complex impact craters are particularly impressive. The TC team devoted special attention to generating a precise photographic map of the south polar region which plays an eminent part in all current plans for future missions to the Moon. Certain areas within that region enjoy permanent sunlight. As the spin axis of the Moon, unlike that of the Earth, is almost perpendicular to the plane of the ecliptic, high topographic elevations at the poles are almost permanently exposed to sunlight, so that solar power can be generated there without interruption.

In contrast, we know of craters at the poles that are permanently immersed in darkness. At the end of the nineties, the US Lunar Prospector probe detected evidence of water ice in some craters, where it might exist either on the surface or intermixed with Moon dust. The potential availability of water as a resource might be of essential importance for future manned Moon missions or Moon stations.

Kaguya's terrain camera also succeeded for the first time in photographing structures at the dark bottom of Shackleton Crater near the south pole. Its sensors were sensitive enough to clearly identify details in the interior of the crater by the light scattered back from its upper rim. Although no ice was detected at the time, a US experiment has conclusively demonstrated its presence in October 2009 in a nearby impact structure with a crater floor in permanent shadow.

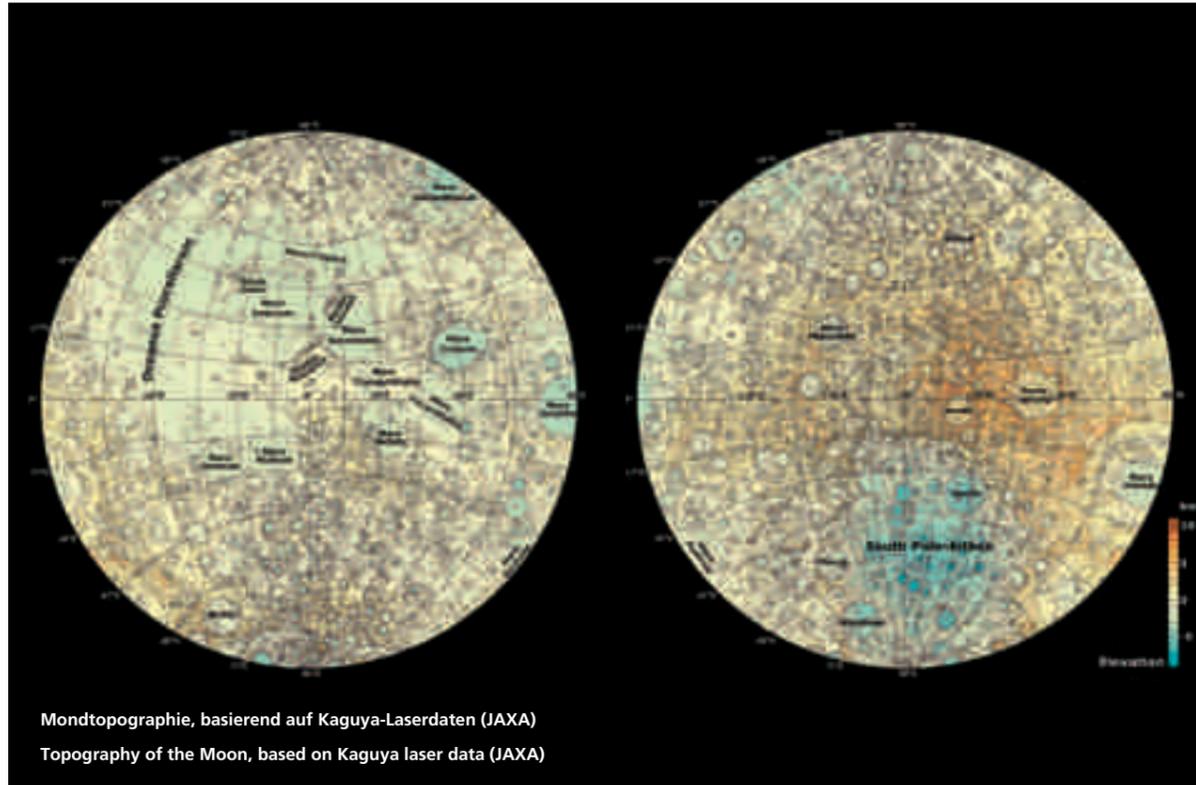
Terrassenstruktur des Tycho-Kraters im südlichen Hochland der erdzugewandten Mondseite (JAXA)

Terrace structure of the Tycho crater on the southern highland of the Earth-facing side of the Moon (JAXA)



Mit der Terrain Camera von Kaguya gelang es erstmals, Strukturen auf dem dunklen Boden des Kraters Shackleton am Südpol zu fotografieren. Für die empfindlichen Sensoren war das Streulicht von den oberen Kraterwänden ausreichend, um Einzelheiten im Innern des Kraters deutlich erkennen zu können. Eis konnte nicht entdeckt werden. Ein amerikanisches Experiment im Oktober 2009 konnte den Nachweis von Wassereis jedoch nun in einem nahe gelegenen Krater erbringen.

Technically called a monochrome line-scan camera, the TC uses light-sensitive sensors to scan the surface from two different angles crosswise the flight course. On the one hand, the image data were used to generate a nearly global, three-dimensional digital elevation model of the Moon. On the other hand, the 3-D data permitted drawing conclusions regarding the condition of the surface of the Moon which, in the course of its 4.5-billion-year history, was ploughed by millions and millions



Die TC ist ein so genannter Schwarzweiß-Zeilenscanner, der die Oberfläche quer zur Flugrichtung unter zwei verschiedenen Winkeln mit lichtempfindlichen Sensoren abtastet. Mit den Bild- und Daten ließ sich zum einen ein nahezu globales dreidimensionales, digitales Geländemodell des Mondes erstellen. Zum anderen konnten mit den 3D-Daten Abschätzungen zur Beschaffenheit der Mondoberfläche getroffen werden, die im Laufe ihrer vier- bis fünf Milliarden Jahre langen Geschichte von Abermillionen Meteoriteneinschlägen umgepflügt und zum Teil von Vulkanausbrüchen überprägt wurde. Solche Daten lassen bessere Aussagen über die Schichtung der Mondkruste zu, sind aber auch eine wichtige Grundlage für die Suche nach geeigneten zukünftigen Landestellen.

#### Der höchste und der tiefste Punkt des Mondes

Mit Kaguya wurde erstmals für den Mond ein vollständiges globales Höhenmodell erstellt. An dem Laser-Altimeter-Experiment (LALT) war auch das DLR durch einen Co-Investigator und sein Team beteiligt. Das Altimeter funktioniert nach einem einfachen Prinzip: Der Orbiter schickt Laserpulse zur Oberfläche – diese reflektiert das Signal. Vom Empfänger des Altimeters wird der zurück gestreute Strahl aufgezeichnet. Aus der Messung der Signal-Laufzeit lassen sich auf fünf bis zehn Meter genaue Höhenprofile der Mondoberfläche gewinnen. So entstand auf der Grundlage von vielen Millionen Lasermessungen eine topo-

graphische Karte in deutlich verbesserter Qualität gegenüber bisherigen Modellen. Dies trifft insbesondere für die beiden Polregionen des Mondes zu, die zum ersten Mal lückenlos kartiert werden konnten. In Verbindung mit den Kameradaten wurden hier neue Möglichkeiten zur Charakterisierung der Mondoberfläche geschaffen.

#### The highest and the lowest spot on the Moon

Kaguya was instrumental in generating the first-ever global elevation model of the entire Moon. Among others, DLR was involved with a co-investigator and his team in the laser altimeter experiment (LALT). The working principle of the altimeter is simple: the orbiter sends a laser pulse to the surface, where it is reflected. The backscattered beam is recorded by the altimeter receiver. Signal run-time measurements yield elevation profiles of the Moon's surface that are accurate to between five and ten metres. From many millions of such laser measurements, a topographical map was developed whose quality was markedly superior to that of former models. This is true particularly for the Moon's two polar regions which were mapped for the first time without any gaps. Together with the TC data, this achievement opens up new options for characterising the surface of the Moon.

graphische Karte in deutlich verbesserter Qualität gegenüber bisherigen Modellen. Dies trifft insbesondere für die beiden Polregionen des Mondes zu, die zum ersten Mal lückenlos kartiert werden konnten. In Verbindung mit den Kameradaten wurden hier neue Möglichkeiten zur Charakterisierung der Mondoberfläche geschaffen.

Mit den Messungen von LALT gelang es, den höchsten und den tiefsten Punkt auf dem Mond neu zu bestimmen. Beide Extrema liegen auf der von der Erde aus nicht sichtbaren Mondrückseite. Der höchste Punkt auf dem Mond, 10.700 Meter über dem Referenzniveau (einer gedachten Kugelfläche von 1.737,3 Kilometern Durchmesser), befindet sich auf den Rändern der Einschlagsbecken Korolev und Dirichlet-Jackson nördlich des Mond-Äquators bei etwa 159 Grad östlicher Länge. Der tiefste Punkt auf dem Mond ist mit -9.600 Metern im Inneren des Kraters Antoniadi, der sich auf dem Grund des Südpol-Aitken-Beckens auf der südlichen Mondrückseite befindet. Damit sind die Höhenunterschiede etwa so groß wie auf der Erde. Auf dem Mond sind sie jedoch das Ergebnis der gewaltigen Asteroideneinschläge vor Milliarden von Jahren und nicht etwa eines Gebirgsbildungsprozesses, der auf der Erde aus dem Innern des planetaren Körpers angetrieben wird.

Andere Experimente auf Kaguya befassten sich mit der Bestimmung von Elementhäufigkeiten, der Mineralogie, der Schichtung des Mondbodens sowie der Kartierung des schwachen, durch magnetisierte Minerale erzeugten Magnetfeldes und der Plasma-Umgebung des Erdtrabanten. Die Auswertung der Experimentdaten dauert noch an. Schon heute ist jedoch klar, dass die JAXA mit Kaguya/SELENE einen großen wissenschaftlichen Erfolg verbuchen kann.

Der nächste Schritt bei der für die Planetologie so wichtigen Erkundung des Mondes ist bereits gemacht: Mit dem „Lunar Reconnaissance Orbiter“ der NASA werden weitere wichtige wissenschaftliche Arbeiten auf dem Mond geleistet. Nicht zuletzt zielt auch das vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) vorgeschlagene Projekt eines Lunaren Explorations-Orbiters („LEO“) darauf, in nahezu allen Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums Verbesserungen der globalen Mondkarten um eine weitere Größenordnung zu erzielen.

*Prof. Dr. Jürgen Oberst, Geophysiker am DLR-Institut für Planetenforschung in Berlin-Adlershof und an der Technischen Universität Berlin, ist als einziger deutscher Wissenschaftler an der Mission Kaguya/SELENE beteiligt. Als Co-Investigator des von Dr. Hiroshi Araki geleiteten Laser Altimeter-Teams wertet er gemeinsam mit japanischen Kollegen die Daten des Laser-Höhenmessgeräts (LALT) aus. Prof. Oberst ist ebenso an der NASA-Mission LRO beteiligt.*

*Dipl.-Geol. Ulrich Köhler arbeitet als Planetengeologe an Themen der Mondgeologie am DLR-Institut für Planetenforschung. Er ist Mitautor des Buchs „Der Mond: Entstehung – Erforschung – Raumfahrt“, das 2009 gemeinsam vom DLR und dem Fackelträger-Verlag herausgegeben wurde.*

LALT measurements also permitted re-defining the highest and the lowest spot on the Moon. Both extremes are situated on the far side, which is not visible from the Earth. The highest elevation on the Moon, 10,700 metres above reference level (the surface of an imaginary sphere measuring 1,737.3 kilometres in diameter), is on the rims of two impact craters, Korolev and Dirichlet-Jackson, at about 159 degrees eastern longitude north of the lunar equator. The lowest elevation on the Moon, minus 9,600 metres, is situated in the interior of Antoniadi Crater at the bottom of the Aitken basin near the south pole on the far side of the Moon. The elevation differences are about the same as on Earth. On the Moon, though, they are the result of tremendous asteroid impacts billions of years ago, and not of mountain-building processes triggered from inside of the planetary body.

Other experiments installed on Kaguya served to determine element incidences, to investigate the mineralogy and stratification of the lunar soil, and to map our satellite's plasma environment as well as its weak magnetic field that is generated by magnetised minerals. The data from these experiments are still being evaluated. However, it is clear even today that JAXA may take pride in Kaguya/SELENE's great scientific success.

The next step in exploring the Moon, a highly important subject in planetology, has already been taken: NASA's Lunar Reconnaissance Orbiter is currently gathering important scientific data on the Moon. Moreover, the Lunar Exploration Orbiter (LEO) project proposed by the German Aerospace Center (DLR) aims to enhance the precision of global lunar maps by another order of magnitude in almost all wavebands of the electromagnetic spectrum.

*Prof. Dr. Jürgen Oberst, a geophysicist, works both at the DLR Institute of Planetary Research in Berlin-Adlershof and at the Technical University of Berlin. He is the only German scientist involved in the Kaguya/SELENE mission. Together with his Japanese colleagues, he is currently evaluating the data supplied by the laser altimeter (LALT) as a member of the LALT team headed by Dr. Hiroshi Araki. Prof. Oberst is also involved in NASA's LRO mission.*

*A planetary geologist, Dipl.-Geol. Ulrich Köhler investigates issues of lunar geology at the DLR Institute of Planetary Research. He co-authored 'Der Mond: Entstehung – Erforschung – Raumfahrt' (The Moon: 'Origin – Research – Spaceflight'), a book jointly published by DLR and the Fackelträger publishing house in 2009.*

Der Start des Satelliten Helios 2B am 18. Dezember 2009 war gleichzeitig die 35. erfolgreiche Startkampagne in Folge in der siebenjährigen Betriebsphase von Ariane 5 (Arianespace).

The launch of Ariane 5 carrying the Helios 2B satellite on December 18, 2009, marked 35 consecutive on-target missions during seven years of operation (Arianespace).

## Das Raumfahrtzentrum Guayana

Europas Weltraumbahnhof im südamerikanischen Dschungel

Von Thomas Ruwwe

**Kourou, Französisch-Guayana am 1. Oktober 2009 um 21:59:04 UTC. Der Countdown für den Ariane-5 Start verläuft planmäßig: Das Vulcain-2-Triebwerk der Zentralstufe wird gezündet, etwa sieben Sekunden später folgen die beiden Feststoff-Booster. Die etwa 780 Tonnen schwere Trägerrakete hebt vom Starttisch ab. Erst langsam, dann immer schneller schießt sie auf einer Feuersäule in den Himmel. Auf diesem Flug wird die Ariane zwei Telekommunikationssatelliten, darunter den ersten für die Bundeswehr (Comsat BW1), in die Erdumlaufbahn bringen. Eine gute halbe Stunde später wird der Satellit präzise im Orbit ausgesetzt. Der fünfte Flug einer Ariane-5 im Jahr 2009 ist erfolgreich beendet. Gleichzeitig war dies der 200. Orbitalstart einer Trägerrakete vom Centre Spatial Guyanais (CSG), das seit mehr als 40 Jahren in Betrieb ist.**

### The Guiana Space Centre

Europe's spaceport in the South American jungle

By Thomas Ruwwe

**Kourou, French Guiana, on October 1, 2009 at 21:59:04 UTC. After the countdown has been completed according to schedule, the Vulcain-2 engine of the Ariane-5 main stage is ignited, followed about seven seconds later by the two solid-fuel boosters. The 780-ton rocket lifts off the launch pad. Slowly at first, then quickly picking up the pace, the rocket is racing into the sky on a column of fire. On this flight, the Ariane launcher carries two telecommunications satellites into orbit, including the first ever for the German Armed Forces (Comsat BW1). Somewhat more than half an hour later, the satellite is released precisely where it should be. This is not only the fifth flight of an Ariane-5 to be completed successfully in 2009, it is also the 200th launch vehicle to lift off from the Centre Spatial Guyanais (CSG) in its more than 40 years of operation.**

Der europäische Weltraumbahnhof ist eine der leistungsfähigsten Startbasen der Welt und ein wichtiges Element für Europas unabhängigen Zugang zum Weltall. Schon deshalb lohnt ein Blick hinter die Kulissen. Seit Jahren werden alle Startkampagnen planmäßig und unter optimalen Bedingungen durchgeführt. Neben dem Schwerlastträger Ariane-5, der bis zu neun Tonnen Nutzlast in einen geostationären Transferorbit bringen kann, wird ab Ende 2010 auch die russische Sojus von Kourou aus gestartet. Die mit 1.750 Starts erfolgreichste Trägerrakete der Welt kann von dort etwa drei Tonnen Nutzlast in dieselbe Umlaufbahn wie von Baikonur aus transportieren. Sojus ersetzt die Ariane-5 künftig, wenn nur ein einzelner Kommunikations- oder Wettersatellit gestartet werden soll. Hauptsächlich wird Sojus bei dem Aufbau des europäischen Navigationssystems Galileo oder bei dem Start von größeren Erdbeobachtungssatelliten zum Einsatz kommen. Komplettiert wird die Trägerfamilie ab 2011 durch den von der Europäischen Raumfahrtorganisation ESA entwickelten Kleinlastträger VEGA, der etwa 1,5 Tonnen in eine erdnahe Umlaufbahn bringen kann und beispielsweise kleinere Erdbeobachtungssatelliten starten soll.

#### Äquatornah und dünn besiedelt

Mit der sich abzeichnenden Unabhängigkeit Algeriens im Jahre 1962 musste die französische Regierung einen Ersatz für ihren Raketenstartplatz in Hammaguir suchen. Sie beauftragte damit die französische Raumfahrtagentur CNES. Unter 14 Kandidaten wurde die Region um das damalige Dorf Kourou im dünn besiedelten französischen Übersee-Département Guayana ausgewählt. 1964 fiel unter Präsident De Gaulle der Beschluss, die Startbasis dort zu errichten. Noch im selben Jahr wurde vom CSG eine Höhenforschungsrakete vom Typ Veronique gestartet.

Nachdem Frankreich den Startplatz für europäische Organisationen und Staaten öffnete, beschloss die ELDO (European Launcher Development Organisation), eine Vorgängerorganisation der ESA, im Juli 1966 das Startzentrum für die Europa-2-Trägerrakete auszubauen. Am 5. November 1971 wurde der einzige Startversuch mit dieser Rakete außerhalb Australiens durchgeführt. Zwischen 1975 und 1978 wurde an gleicher Stelle die Startanlage ELA-1 (l'Ensemble de Lancement Ariane-1) für die europäische Trägerrakete Ariane-1 gebaut, deren Erststart am 24. Dezember 1979 stattfand. Dieser Startplatz konnte auch für die Ariane-2 und Ariane-3 genutzt werden. Nach insgesamt 28 Starts wurde er im Juli 1989 stillgelegt. Ende 2004 wurde ELA-1 mit dem Umbau für Starts der europäischen Trägerrakete VEGA reaktiviert. Der Startplatz wird nun ELV (l'Ensemble de Lancement VEGA) genannt. Für die Ariane-4 wurde eine neue Startanlage (ELA-2) errichtet, von der 1988 der erste Start erfolgte. Im Februar 2003 wurde die Anlage nach 116 Starts stillgelegt.

In den Jahren 1992 bis 1996 wurde für die Ariane-5 ein komplett neuer Startkomplex (ELA-3) und eine Produktionsanlage für die großen Feststoff-Booster gebaut. Der erste Start fand im Juni 1996 statt. Insgesamt wurde die Ariane-5 bislang 50 mal gestartet. Die Frequenz wurde in den letzten Jahren kontinuierlich erhöht: 2009 gingen erstmals sieben Starts über die Bühne. Anfang 2004 wurde mit dem Bau der Startanlage ELS (l'Ensemble de Lancement Soyouz) für die russische Sojus-Rakete begonnen.

The European spaceport is one of the world's most efficient launch bases and forms an important element in Europe's autonomous access to space, which makes it worthwhile to take a look behind the scenes. For years, its launch campaigns have been running according to plan under optimum conditions. In addition to the Ariane-5 heavy launcher which can carry up to nine tons of payload into a geostationary transfer orbit, Russian Soyuz rockets will also be taking off from Kourou as from late-2010. Soyuz rockets have completed more than 1,750 flights which makes them the world's most successful launchers. They are capable of lifting about three tons of payload into the same orbit as from Baikonur. Soyuz will be replacing Ariane-5 whenever there is no more than one communications or weather satellite to be launched at a time. Its main task will be to set up the European navigation system Galileo and to launch large Earth-observation satellites. VEGA, a light launcher developed by the European Space Agency (ESA) and designed to carry about 1.5 tons into a near-Earth orbit – the same type of Earth-observation satellite for example – will be joining the launcher family in 2011.

#### Close to the equator and sparsely populated

When Algeria's independence began to take shape in 1962, the French government had to look for a replacement for its rocket launch site at Hammaguir. The task was assigned to the French space agency CNES. The area finally selected from among 14 candidates was that of Kourou, at that time a small village located in the sparsely populated French overseas department of Guiana. In 1964, the De Gaulle government decided to build a launch base there. In the very same year, a high-altitude research rocket of the Veronique type took off from the CSG.

After France had opened the launch site to European organisations and states, the European Launcher Development Organisation (ELDO), one of ESA's predecessors, decided in July 1966 to upgrade the centre to accommodate the Europa-2 launcher. On November 5, 1971, the only launch of this rocket attempted outside Australia was carried out. From 1975 to 1978, the ELA-1 (Ensemble de Lancement Ariane-1) launch pad was built on the same site for the European Ariane-1 launcher whose first flight took place on December 24, 1979. The same launch site was also used for Ariane-2 and Ariane-3. In July 1989, it was shut down after a total of 28 launches. Late in 2004, it was reactivated and converted for the European launch vehicle VEGA. The site is now called ELV (Ensemble de Lancement VEGA). For Ariane-4, a new launch pad (ELA-2) was built, from which the first launch took place in 1988. In February 2003, the facility was put out of operation after 116 launches.

In preparation for Ariane-5, an entirely new launch complex (ELA-3) and a facility for producing large solid-fuel boosters was built between 1992 and 1996. The first rocket took off in June 1996. A total of 50 Ariane-5 rockets have been launched so far. Launch frequencies have been increasing continuously in recent years: 2009 was the first year with a total of seven lift-offs. Construction work on the ELS (Ensemble de Lancement Soyouz) launch site for the Russian Soyuz rockets began early in 2004.

links: Sojus-Startplatz im Bau (CNES)  
rechts: Sojus-Startkomplex, künstlerische  
Darstellung (CNES)

on the left: Soyuz launch site under  
construction (CNES)  
on the right: Soyuz launch complex,  
artist's view (CNES)



### Überblick: CSG (Centre Spatial Guyanais)

Der europäische Weltraumbahnhof CSG liegt auf einem circa 15 Kilometer breiten Küstenstreifen zwischen den Städten Kourou und Sinnamary und umfasst eine Fläche von etwa 690 Quadratkilometern; das ist etwas weniger als der Großraum Hamburg. Das CSG ist einer der am günstigsten gelegenen Startplätze der Welt: Es ist nur etwa 500 Kilometer vom Äquator entfernt (5°14' nördliche Breite), so dass die Erdrotation einer von dort aus startenden Rakete eine fast maximale Geschwindigkeitskomponente verleiht. So kann zum Beispiel die Sojus 300 Kilogramm mehr Nutzlast mitnehmen als von ihrem Startplatz im kasachischen Baikonur. Ein weiterer Vorteil ist, dass die bevorzugten Startrichtungen nach Norden und Westen direkt zum Meer hinaus führen. Zudem ist in Französisch-Guayana die Wahrscheinlichkeit von Naturkatastrophen wie tropischen Wirbelstürmen, Erdbeben oder Vulkanismus sehr gering bis nicht-existent. Das tropische Klima sorgt jedoch für hohe Kosten bei der Instandhaltung der Gebäude und der Wartung der technischen Anlagen. Insgesamt sind fast 1.400 Personen am CSG beschäftigt.

Hauptakteure auf der Startbasis sind CNES und die Firma Ariespace. Sie sind für die Betriebsbereitschaft des Zentrums und die Durchführung der Startkampagnen direkt verantwortlich. Daneben spielt die ESA als Hauptfinanzier der CSG Betriebs- und Investitionskosten eine wesentliche Rolle.

Die ESA finanziert die für den Start notwendige Infrastruktur und ist dadurch Eigentümer aller Start- und Produktionsanlagen auf dem CSG-Gelände. In den letzten 20 Jahren hat die ESA dort über zwei Milliarden Euro investiert. Die festen Betriebskosten des Startzentrums liegen bei etwa 125 Millionen Euro pro Jahr, von denen zwei Drittel die ESA und ein Drittel Frankreich finanziert. Zu dem ESA-Anteil tragen alle Mitgliedsländer bei. Deutschland beteiligt sich mit etwa 16 Millionen Euro pro Jahr.

### The CSG (Center Spatial Guyanais) at a glance

Situated on a strip of land about 15 kilometres wide that extends along the coast between the two towns of Kourou and Sinnamary, the European spaceport CSG encloses a territory of about 690 square kilometres, slightly less than the Hamburg metropolitan area. One of the world's best-positioned launch sites, the CSG, is only about 500 kilometres away from the Equator (5°14' northern latitude) so that the velocity of a rocket launched from there receives nearly the full benefit of the Earth's rotation. Thus, for example, the payload of a Soyuz rocket launched from Kourou can be 300 kilograms heavier than if it took off from Baikonur in Kazakhstan. Another advantage is that rockets are generally launched towards the north and west directly across the open sea. Moreover, in French Guiana the likelihood of natural disasters such as hurricanes, earthquakes or volcanism is low to non-existent. On the other hand, the cost of keeping buildings and technical facilities in good repair is high because of the tropical climate. The CSG employs a workforce of almost 1,400.

The CNES and the Ariespace company are the two key players on site. They are directly responsible for keeping the centre operational and implementing launch campaigns. Moreover, ESA plays a major role as the main source of the CSG's operating and investment funding. Having financed the requisite infrastructure, ESA owns all launch and production facilities on the CSG's premises in which it has invested more than two billion euros in the course of the last 20 years. The fixed cost of operating the launch centre ranges around 125 million euros per year, of which ESA provides two thirds and France one third. ESA's share is funded by all member countries, with Germany contributing about 16 million euros per year.

Die französische Firma Ariespace vermarktet die Startdienstleistung für die Ariane-5, Sojus und VEGA-Trägerraketen. Ariespace nutzt die Startanlagen und trägt im Gegenzug die Kosten, die am CSG für die Startkampagnen anfallen. Zudem hat Ariespace auch in die Infrastruktur des CSG investiert und so zu großen Teilen das Lagergebäude für die Booster und den Nutzlastkomplex S5 finanziert.

Während einer Startkampagne ist die Firma Astrium ST (Bremen) für die Integration der Ariane-5-Oberstufe zuständig. Darüber hinaus sind in Kourou zwei deutsche Firmen mit Niederlassungen vertreten. Die MT-Aerospace Guyane hat etwa 80 Mitarbeiter, die hauptsächlich den Betrieb und die Wartung der mechanischen Anlagen des Ariane-5-Startplatz durchführen. Die Firma RMT Guyane mit 28 Mitarbeitern ist eine Tochter der RMT Industrie- und Elektrotechnik GmbH aus Kehl am Rhein und engagiert sich überwiegend in den Bereichen Brandschutz, Zugangskontrolle und Energieversorgung.

### Kurz vor Fertigstellung: die Startplätze für Sojus und Vega

Der Sojus-Startplatz liegt etwa 12 Kilometer nördlich der Ariane- und VEGA-Startplätze. Die Anlagen und Systeme auf dem 120 Hektar großen Gelände sind bis auf die mobile Montagehalle fertig gestellt. Der erste Start kann aber erst nach dem Aufbau der Halle und den Qualifikationstests stattfinden. Falls es dabei keine Verzögerungen gibt, kann es voraussichtlich im Dezember 2010 losgehen. Die ersten beiden Raketen befinden sich bereits vor Ort.

Im Zentrum des Sojus-Startplatzes befindet sich das „MIK“ genannte Integrationsgebäude. Noch in der Horizontalen wird hier der Träger vorbereitet. Das MIK ist durch einen 625 Meter langen Schienenstrang, über den die Sojus mit einem Waggon transportiert wird, mit dem Startplatz ZLS (Ensemble de Lancement Soyouz) verbunden. In diesem Betonmassiv befinden sich, auf mehrere Etagen verteilt, alle notwendigen Einrichtungen wie zum Beispiel der Starttisch mit seinen Versorgungsmasten, die Technikräume und das Abgasleitsystem für den Start des Trägers.

The French company Ariespace markets launch services for Ariane-5, Soyuz and VEGA. In return for the use of the launch facilities, Ariespace bears the cost of the launch campaigns at the CSG. Moreover, the company has been investing in CSG's infrastructure, largely financing the building for storing the boosters as well as the S5 payload complex.

During a launch campaign, Astrium ST of Bremen is responsible for the integration of the Ariane-5 upper stage. There are two other German companies with branches in Kourou: MT-Aerospace Guyane employs about 80 people mainly to operate and service the mechanical equipment at the Ariane-5 launch site. A subsidiary of RMT Industrie- und Elektrotechnik GmbH of Kehl, RMT Guyane, employs a workforce of 28 mainly in fire protection, security, and energy supply.

### Nearly complete: the Soyuz and VEGA launch sites

The launch site for Soyuz is situated about 12 kilometres north of those for Ariane and VEGA. All facilities and systems on the 120-hectare premises have been completed except for the mobile service tower. However, the first launch can not take place until the tower is complete and the qualification tests have been carried out. If there are no further delays, the launch will be presumably in December 2010. The first two rockets have already arrived.

At the centre of the Soyuz launch facility stands the integration building called MIK, where the final integration of the launcher takes place while it is still horizontal. A 625-metre rail track, along which the rocket is transported on a rail car, connects the MIK to the ELS (Ensemble de Lancement Soyouz) launch facility. Distributed over several levels, this massive concrete structure houses all necessary facilities, such as the launch pad, the umbilical masts, the machine rooms and the pipe system for conducting the rocket exhaust during a launch.

Während der letzten Vorbereitungsphase auf dem Startplatz wird innerhalb der mobilen Montagehalle die Fregat-Oberstufe mit dem verkapselten Satelliten auf die mittlerweile senkrechte Sojus gesetzt. Diese letzte Etappe in der Vorbereitung und der Startablauf des Trägers werden vom Kontrollzentrum CDL S aus gesteuert und überwacht. Etwa zwei Kilometer vom Startplatz entfernt befinden sich Tanks für den flüssigen Sauerstoff, den Treibstoff Kerosin und das Wasserstoffperoxyd. Stickstoff, Helium und Druckluft werden über eine zwölf Kilometer lange Pipeline zum Startplatz geführt.

Die Bauarbeiten für den VEGA-Startplatz betrafen im Wesentlichen die Startplattform und den Flammenkanal des alten ELA-1-Startplatzes (Umbau) sowie den Starttisch mit Versorgungsmast und mobilem Montageturm. Der Startplatz befindet sich zurzeit in der Endphase des Ausbaus. 2011 soll die VEGA erstmals starten.

#### Ablauf einer Startkampagne

Eine Ariane-5-Startkampagne dauert in der Regel 35-40 Arbeitstage und läuft nach einem festgelegten Muster ab: Sie beginnt mit Öffnung der Transportcontainer der auf dem Seeweg transportierten Raketenteile im Integrationsgebäude (BIL). Dort werden die Unterstufe, die beiden Feststoff-Booster und die Oberstufe auf dem Starttisch zusammengesetzt. Parallel werden die auf dem Luftweg gelieferten Satelliten für den Start vorbereitet. Je nach Komplexität der Nutzlasten und Plattformen dauert die Vorbereitung eines Satelliten auf den Start rund 20 Tage und umfasst im wesentlichen Funktionstests, die Anpassung der Adapter und die Betankung.

Etwa 18 Tage vor dem Start wird die Ariane-5 in das Endmontagegebäude (BAF) gebracht. Dort werden die Satelliten und die Nutzlastverkleidung auf den Träger montiert. Im BAF wird auch die EPS-Oberstufe mit lagerfähigen Treibstoffen betankt, während die kryogene ECA-Oberstufe erst am Startplatz befüllt wird. Nach erfolgter Startfreigabe wird die Ariane-5 etwa 30 Stunden vor dem Start auf Schienen zum Startplatz gerollt, wo die letzten Vorbereitungen getroffen werden. Der Start selbst wird aus dem CDL-3-Startkontrollzentrum gesteuert. Auf der obersten Managementebene trifft der Flugdirektor von Arianespace die Entscheidung zum Start, dessen Freigabe wiederum durch den CSG-Direktor erfolgt.

In the last preparatory phase, the Fregat upper stage bearing the encapsulated satellite is put on the now vertical Soyuz rocket in the mobile service tower. This last preparatory stage as well as the launch sequence are controlled and monitored by the CDL S control centre. Tanks holding liquid oxygen, kerosene and hydrogen peroxide are located about two kilometres away from the facility. A twelve-kilometre pipeline carries nitrogen, helium and compressed air to the launch site.

Construction work on the VEGA launch facility was mainly concerned with the launch platform and the exhaust gas channel of the ELV site as well as with the launch pad, the umbilical mast and the mobile assembly tower. Work on upgrading the launch pad is nearly completed. The maiden flight of the VEGA rocket is scheduled for early 2011.

#### A launch campaign sequence

A typical launch campaign of an Ariane-5 normally comprises 35 to 40 working days and follows a defined pattern: the first operation is to open the containers holding the rocket components that have arrived by sea in the integration building (BIL). This is where the lower stage, the two solid-fuel boosters and the upper stage are assembled on the launch pad. Simultaneously, the satellites, which have arrived by air, are prepared for launch. Depending on the complexity of the payloads and platforms involved, getting a satellite ready for launch takes about 20 days that are essentially spent conducting functional tests, fitting adapters and filling fuel tanks.

About 18 days before lift-off, the rocket is transferred to the final assembly building (BAF) where satellites and payload fairings are integrated with the launcher. The BAF is also the place where the EPS upper stage is filled up with storable fuels, while the ECA upper stage will receive its cryogenic fuel at the launch pad. Cleared for launch, the Ariane-5 is transported by rail to the launch site where the final preparations are made about 30 hours before lift-off. The launch itself is controlled from the CDL-3 control centre. At the top management level, the decision to launch is made by the Arianespace flight director while the rocket is cleared for launching by the director of the CSG.

Der Countdown beginnt elf Stunden vor dem festgelegten Startzeitpunkt und dient hauptsächlich dazu, die Haupt- und Oberstufe mit insgesamt etwa 190 Tonnen tiefgekühltem flüssigen Wasser- und Sauerstoff zu betanken sowie alle wichtigen Systeme zu prüfen. Sieben Minuten vor dem Start übernimmt der Bordcomputer der Ariane die volle Kontrolle. Wenn der Countdown „Null“ erreicht, zündet das Triebwerk der Hauptstufe und fährt auf maximalen Schub hoch. Dann wird es vom Computersystem auf korrekte Funktion überprüft. Nur wenn alle Werte im grünen Bereich sind, zünden die Feststoff-Booster und erreichen innerhalb von 0,3 Sekunden volle Schubkraft – die Ariane-5 hebt vom Starttisch ab. Mit der Trennung des letzten Satelliten von der Oberstufe ist die Mission der Ariane-5 weniger als eine Stunde nach dem Abschuss von der Startrampe beendet.

Nach der Qualifizierung der beiden neuen Trägersysteme ist die europäische Trägerfamilie vollständig. Ab 2012 werden am CSG dann durchschnittlich zwölf Startkampagnen pro Jahr (sechs Ariane-5, vier Sojus und zwei VEGA) und damit wenigstens 18 Satellitenkampagnen stattfinden. Die Bodenanlagen und Betriebsmannschaften werden dann voll ausgelastet sein. Eine solche hohe Startrate hat es selbst zu den besten Ariane-4 Zeiten nicht gegeben. Der europäische Weltraumbahnhof steht damit in den nächsten Jahren vor der Bewältigung großer Herausforderungen.

*Thomas Ruwwe ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Trägersysteme der DLR Raumfahrt-Agentur.*

The countdown commences eleven hours before the scheduled launch time and mainly serves to fill the first and second stages with about 190 tons of cryogenic liquid oxygen and hydrogen and to check all systems of importance. Seven minutes before launch time, Ariane's on-board computer assumes control. At the count of zero, the main-stage engine ignites and runs up to maximum thrust. The computer system then checks the function of the engine, and only if all indicators are green it will fire the solid-fuel boosters that reach full thrust within 0.3 seconds, lifting Ariane-5 off the launch pad. As the last satellite separates from the upper stage, less than one hour after launch, the mission of Ariane-5 ends.

Once both new launcher systems have been qualified, the European family of launchers will be complete. From 2012 onwards, the CSG will run an average of 12 launch campaigns (six Ariane-5, four Soyuz and two VEGA) and, by the same token, no less than 18 satellite campaigns per year. The facilities as well as the crews on the ground will be fully used to capacity by then. Even in the best days of Ariane-4, the launch rate has never been that high. In the next few years, therefore, the European spaceport will have to cope with great challenges.

*Thomas Ruwwe is a scientific assistant with the launcher systems department of the DLR Space Agency.*

links: Die erste Antriebsstufe für Vega bei dem Transport zum Testgelände (ESA)  
rechts: Vega-Rakete am Startplatz, künstlerische Darstellung (ESA)

on the left: Vega's first stage booster on its way to the test complex (ESA)  
on the right: Vega rocket on the launch pad, artist's view (ESA)



# Chemie-Nobelpreis an Ada Yonath

**Strukturaufklärung organischer Makromoleküle durch Kristallisation im Weltraum**

Von Professor Dr. Günter Ruyters

**Am 7. Oktober 2009 hat das Nobelpreis-Komitee den Nobelpreis für Chemie an die beiden in den USA arbeitenden Wissenschaftler Venkatraman Ramakrishnan und Thomas A. Steitz sowie an die Israelin Ada E. Yonath vergeben. Die drei Forscher wurden für ihre bahnbrechenden Arbeiten zur Struktur und Funktion der Ribosomen geehrt. Am 10. Dezember erhielten die Wissenschaftler den Preis in Stockholm aus der Hand von König Carl XVI Gustaf von Schweden.**

Ada Yonath erhält die Chemie-Nobelpreis-Urkunde von König Carl Gustaf von Schweden. (dpa picture alliance)

Ada Yonath receives the Chemistry Nobel Prize certificate from king Carl Gustaf of Sweden. (dpa picture alliance)

## Nobel Prize in Chemistry Awarded to Ada Yonath

**Structure Determination of Organic Macromolecules by Crystallisation in Space**

By Professor Dr. Günter Ruyters

**On October 7, 2009 the Nobel Prize Committee awarded the Nobel Prize in Chemistry to two scientists working in the USA, Venkatraman Ramakrishnan and Thomas A. Steitz, and to Israel's Ada E. Yonath. The three scientists were honoured for their ground-breaking work on the structure and function of ribosomes. On December 10, they received their prize in Stockholm from the hand of King Carl XVI Gustaf of Sweden.**

Ada Yonath forscht am Weizmann-Institut in Rehovot, Israel. (dpa picture alliance)

Ada Yonath, scientist of the Weizmann Institute at Rehovot/Israel. (dpa picture alliance)

Frau Professor Yonath hat einen großen Teil ihres Forscherlebens in Deutschland verbracht: Von 1979 bis 1983 war sie als Gastprofessorin am Max-Planck-Institut für Molekulare Genetik in Berlin tätig, von 1986 bis 2004 leitete sie eine Forschungsgruppe des Max-Planck-Instituts am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg. Während dieser Zeit war sie mit ihren Experimenten an einer Reihe von Weltraummissionen beteiligt. Hierbei nutzte sie die Schwerelosigkeit zur Verbesserung der Kristallisation von Ribosomen – Grund genug, ihre Forschung und das Thema Proteinkristallisation in Schwerelosigkeit generell näher vorzustellen. Der Einfachheit halber verwenden wir hier den Ausdruck Proteinkristallisation durchgängig, auch wenn es sich um andere organische Makromoleküle wie Nucleinsäuren oder, wie bei den Ribosomen, um Komplexe aus Proteinen und Nucleinsäuren handelt.

### Ribosomen, die Fabriken des Lebens (Ada Yonath, DESY Hamburg)

Mit Hilfe der Ribosomen werden aus der DNA-Erbinformation die für das Leben notwendigen Eiweißmoleküle hergestellt – Ribosomen stellen gewissermaßen die Fabriken des Lebens dar. Um ihre Funktion zu verstehen, muss man ihre Struktur kennen. Bei den Ribosomen sollte dies erst im Jahr 2000 soweit sein. Die ersten Schritte in diese Richtung machte Professor Yonath allerdings bereits Ende der 1970er Jahre: Sie versuchte, Ribosomen-Kristalle herzustellen und deren Struktur mit Hilfe von Röntgenstrahlen zu untersuchen. Für diese Röntgenstruktur-Analyse werden jedoch extrem reine, perfekte Kristalle benötigt. Diese herzustellen erforderte verschiedene Tricks, die Zusammenarbeit der drei Nobelpreisträger und viele Jahre Arbeit.

Die ersten Versuche hatten extrem dünne und zerbrechliche Kristalle der Ribosomen ergeben, die für eine Röntgenstruktur-Analyse nicht geeignet waren. Dann kamen die Schwerelosigkeitsbedingungen des Weltraums ins Spiel: Theoretische Überlegungen hatten schon Ende der Siebzigerjahre zu der Annahme geführt, dass es aufgrund der fehlenden Sedimentation (Ablagerung von Teilchen) und Schwerkraft-getriebenen Konvektion (Übertragung thermischer Energie mittels Teilchentransport) unter Schwerelosigkeit zur Bildung größerer und makelloserer Kristalle kommen müsste. Zwar weiß man heute, dass auch viele andere Faktoren eine Rolle spielen; die prinzipiellen Überlegungen waren aber richtig und wurden von vielen Wissenschaftlern genutzt. Und diese Überlegungen führten auch Yonath dazu, sich Ende der Achtzigerjahre für Experimente in Schwerelosigkeit zu interessieren.

Im Zeitraum von 1988 bis 1995 war sie mit ihren Projekten an insgesamt mehr als zwölf Weltraummissionen beteiligt. Auf den COSIMA-Satelliten-Flügen sowie bei verschiedenen Missionen des amerikanischen Space Shuttle einschließlich der deutschen Spacelab-Mission D-2 im Jahre 1993 mit den Astronauten Ulrich Walter und Hans Schlegel versuchte sie, die Kristallisation der Ribosomen zu verbessern. Erste Fortschritte konnten erzielt werden: die auf den Shuttle/Spacelab-Missionen D-2 (1993), IML-2 (1994) und USML-2 (1995) gewachsenen Kristalle waren größer, runder und gleichmäßiger gestaltet und wiesen so den Weg für weitere Experimente auf der Erde, letztendlich bis hin zur erfolgreichen Strukturaufklärung und zum Nobelpreis.

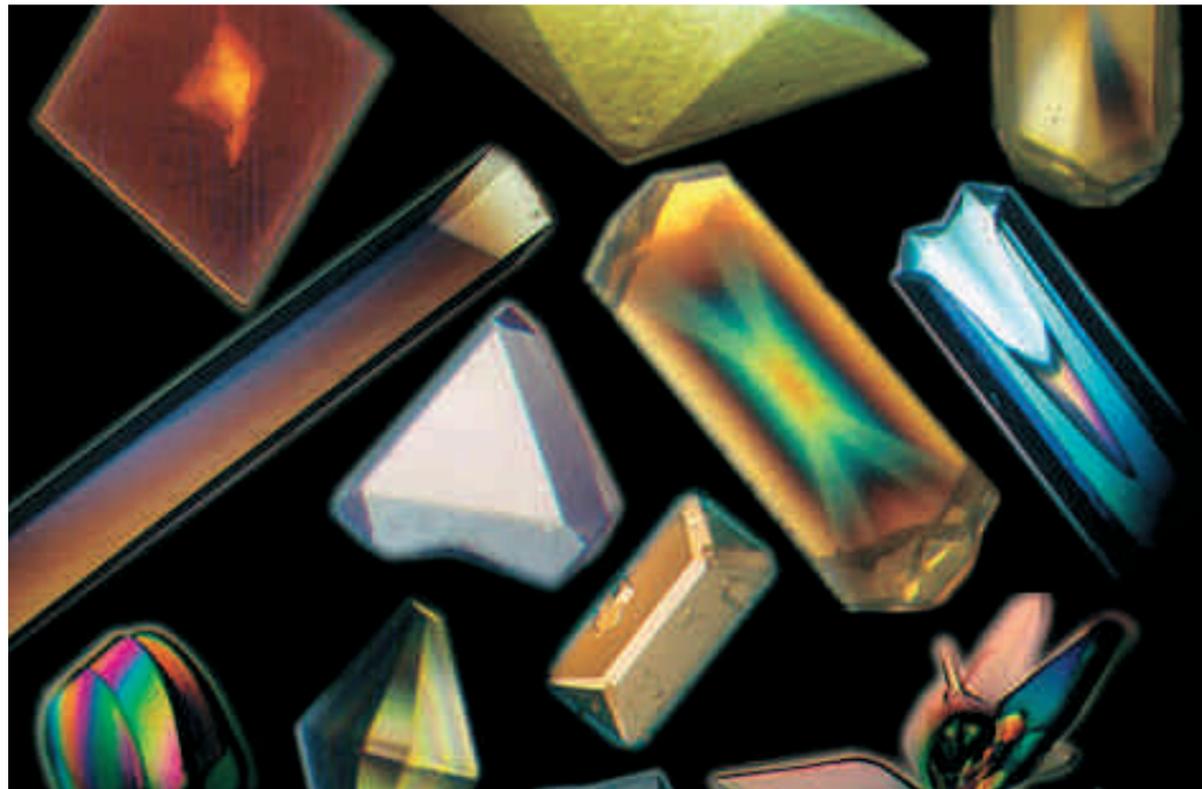
Professor Yonath spent a major part of her working life in Germany. From 1979 until 1983 she was a guest professor at Berlin's Max Planck Institute for Molecular Genetics; from 1986 until 2004 she headed a Max Planck research team at the German Electron Synchrotron (DESY) in Hamburg. During this period she was involved with her experiments in a series of space missions, utilising conditions of weightlessness to improve ribosome crystallisation. This provides us with an excellent reason to present her research and the general theme of protein crystallisation in microgravity in greater detail. For the sake of simplicity we will in this article use the term protein crystallisation consistently to cover other organic macromolecules as well, such as nucleic acids, or protein and nucleic acid complexes such as ribosomes.

### Ribosomes, factories of life (Ada Yonath, DESY, Hamburg)

It is with the help of ribosomes that organisms produce their necessary protein molecules based on the DNA information. This, in a manner of speaking, makes ribosomes the factories of life. To understand their function one has to know their structure. In case of ribosomes, we were not to find that structure until the year 2000, although the first few discoveries came to Professor Yonath as early as the late nineteen-seventies, when she began to produce ribosome crystals and explore their structure with the help of X-rays. What is needed for this X-ray analysis are extremely pure, perfect crystals. Making these has required a number of tricks, the cooperation of the three Nobel Prize laureates and many years of work.

Early attempts had produced extremely thin and fragile ribosome crystals that were unsuitable for X-ray diffraction analysis. Then the option of research in microgravity conditions became available. The theory in the late seventies had been that, given the absence of sedimentation (particles depositing at the bottom of a fluid) and gravity-driven convection (transfer of thermal energy by means of particle transport) in a weightlessness condition, the crystals that would form were likely to be larger and of greater purity. Although as we know today crystal growth is subject to a number of other factors as well, the assumption, on principle, had been correct and has been followed by many scientists ever since. It was these considerations that led Yonath in the late eighties to develop an interest in experiments under microgravity.

In the period from 1988 until 1995 she sent her experiments on more than twelve space missions. By doing so, she attempted to improve ribosome crystallization on COSIMA satellite missions and several American Space Shuttle flights including Germany's Spacelab mission D-2 in 1993 with the German astronauts Ulrich Walter and Hans Schlegel onboard. This was when first signs of progress became apparent. The crystals grown during Shuttle/Spacelab missions D-2 (1993), IML-2 (1994) and USML-2 (1995) were larger, rounder and more evenly shaped, thus pointing the way to further experiments on Earth, which then ultimately ended up in a successful elucidation of ribosome structures, and finally the Nobel Prize.



Kristalle verschiedener in Schwerelosigkeit gewachsener Proteine (NASA/Prof. McPherson)

Various protein crystals grown in weightlessness (NASA/Prof. McPherson)

Für ihre Forschung im Weltraum wurde Frau Yonath von 1986 bis 1996 aus dem Programm „Forschung unter Weltraumbedingungen“ des DLR mit Mitteln des damaligen Bundesministeriums für Forschung und Technologie unterstützt. So hat nicht zuletzt auch das Deutsche Raumfahrt-Programm einen Beitrag zu ihrem Nobelpreis geleistet.

#### Proteinkristallisation im Deutschen Raumfahrt-Programm

Die Idee, die Schwerelosigkeit zur Verbesserung der Kristallisation von organischen Makromolekülen zu nutzen, wurde in Deutschland geboren. Professor Walter Littke (Universität Freiburg) war der Pionier, der 1981 auf dem TEXUS-3-Raketenflug das erste Experiment durchführte. Tatsächlich gelang es, bereits während der kurzen Schwerelosigkeitsdauer von sechs Minuten etwa 100 Mikrometer lange Kristalle des Enzyms Beta-Galactosidase herzustellen. Weitere Experimente auf TEXUS und wenig später auf der ersten Spacelab-Mission im Jahr 1983 erbrachten ermutigende Ergebnisse; dort gewonnene Kristalle von Beta-Galactosidase waren 27 mal so groß wie auf der Erde, die von Lysozym sogar tausendfach größer. Kristallisation unter Schwerelosigkeit schien das Mittel der Wahl zu sein. Doch Rückschläge blieben nicht aus. Eine Reihe von technischen Fehlschlägen und Mängeln in der Vorbereitung der Experimente trugen bald zu der teilweise heftigen Kritik in der wissenschaftlichen Gemeinde bei.

Mit Entwicklung der ESA-Anlage ACPF (Advanced Protein Crystallization Facility) durch die deutsche Industrie und dem erfolgreichen Einsatz des Geräts auf Shuttle-Missionen und der Internationalen Raumstation (ISS) stellten sich seit Beginn der Neunzigerjahre die gewünschten Ergebnisse zahlreicher ein. Bei einer Reihe von Molekülen konnten deutsche Wissenschaftler die Strukturaufklärung deutlich verbessern, in einigen Fällen gelang ihnen sogar zum ersten Mal überhaupt eine Kristallisation.

To fund her space activities in the 1986 – 1996 period, Yonath received grants from the Federal Ministry of Research and Technology under DLR's microgravity research programme. This was how the German space programme also contributed its share to her Nobel Prize.

#### Protein crystallisation in the German space programme

The idea to use microgravity to improve the crystallisation of organic macromolecules was, in fact, born in Germany. Its pioneer was Professor Walter Littke (Freiburg University) who, in 1981, carried out his first experiment on a TEXUS-3 rocket flight. And indeed in a short spell of microgravity lasting barely six minutes he managed to produce 100 micrometer long crystals of the enzyme beta-galactosidase. Further experiments on TEXUS and, a little later, on the first Spacelab mission in the year 1983 produced encouraging results, i.e. beta-galactosidase crystals 27 times larger than those produced on Earth, and crystals of lysozyme that were larger by a factor of 1000. Crystallisation under microgravity appeared to be the method of choice. But setbacks were inevitable. A series of technical failures and mistakes made in the run-up to the experiments soon gave rise to – sometimes harsh – criticism in the science community.

It was the ACPF (Advanced Protein Crystallisation Facility) developed by the German industry and successfully used by ESA on shuttle missions and later on the International Space Station (ISS) that managed to produce the desired results more frequently since the early nineties. German scientists were able to significantly improve their understanding of the structures of a variety of molecules, some of which they managed to crystallise for the first time.

Insgesamt wurden im Rahmen des Deutschen Raumfahrt-Programms zwischen 1988 und Ende 2009 etwa 85 Weltraumprojekte im Bereich der Proteinkristallisation durchgeführt, von den COSIMA-Satellitenflügen (1988-1991) über die US-Shuttle-Missionen (1992-2003) bis hin zur ISS. Insgesamt waren an diesen Projekten rund 20 Wissenschaftler-Teams aus verschiedenen Universitäten und Max-Planck-Instituten in Deutschland beteiligt, die von der DLR Raumfahrt-Agentur beziehungsweise ihren Vorläufer-Organisationen gefördert wurden.

Vier der besonders erfolgreichen Beispiele sollen nun näher vorgestellt werden und damit zeigen, dass nicht nur die Kristallisation von Ribosomen durch die Nobelpreisträgerin Ada Yonath Erwähnung verdient. Interessant dabei: Zwei weitere im Programm „Forschung unter Weltraumbedingungen“ geförderte Arbeitsgruppen haben eng mit Frau Yonath zusammengearbeitet: Professor Christian Betzel vom DESY in Hamburg und Professor Volker Erdmann von der Freien Universität Berlin, Leibniz-Preisträger und langjähriger Sprecher eines Sonderforschungsbereichs der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

#### Struktur und Funktion von Photosystem-I

(Wolfram Saenger, TU Berlin)

Grüne Pflanzen und Algen gewinnen ihre Energie durch Photosynthese. Bei diesem Prozess wandeln sie mit Hilfe des Sonnenlichts Kohlendioxid und Wasser in Zucker und Sauerstoff um. Die chemische Grundgleichung ist sehr einfach, der Mechanismus jedoch äußerst kompliziert und noch nicht vollständig aufgeklärt. Zwei große Protein-Cofaktor-Komplexe, die Photosysteme I und II sind daran maßgeblich beteiligt und sorgen dafür, dass dieser biologische Energieumwandlungsprozess äußerst wirkungsvoll funktioniert – mit einer Energieausbeute von fast 100 Prozent nämlich. Zum Vergleich: Moderne Photozellen erreichen nicht einmal 20 Prozent.

Weltweit arbeiten Forscher intensiv daran, Struktur und Funktion vor allem der beiden Photosysteme zu entschlüsseln. Mit großem Erfolg tun dies seit vielen Jahren Wissenschaftler der Technischen Universität Berlin um Professor Saenger. Auch die Schwerelosigkeit kommt dabei wieder zum Einsatz. Ein erster Durchbruch gelang während der USML-2 Shuttle-Mission (1995). Bei dieser Mission wurden Kristalle gezüchtet, deren Volumen zwanzigmal größer war als die größten jemals auf der Erde hergestellten Kristalle. Auf Basis dieser Kristalle konnte ein verbessertes Strukturmodell des Photosystem I bei 4 Ångström (entspricht  $10^{-4}$  Mikrometer) erarbeitet werden. Erstmals wurden dabei wichtige funktionelle Teile dieses großen Komplexes sichtbar.

Weitere Experimente bei der Shuttle-Mission STS-95 im Jahre 1998 zeigten dann, dass die Keimbildungsrate in Schwerelosigkeit deutlich verlangsamt ist und dadurch die Bildung größerer, nahezu perfekter Kristalle begünstigt. Insgesamt wiesen die in Mikrogravitation gewachsenen Kristalle eine deutlich bessere Auflösung und weniger Fehler auf als die Kristalle der vergleichbaren Bodenkulturen.

Derzeit arbeiten die Wissenschaftler daran, die Strukturaufklärung noch weiter zu verfeinern. Seit einigen Jahren beziehen sie auch das Photosystem II in die Strukturanalyse mit ein. Hier brachten erste Experimente in Schwerelosigkeit bislang noch nicht die erhofften Fortschritte.

#### Kristallisation der Oberflächenproteine von Urbakterien (Tony Debaerdemaeker, Univ. Ulm; Helmut König, Univ. Mainz)

Sie waren wahrscheinlich die ersten Zellwandstrukturen, die im Laufe der Evolution vor rund drei Milliarden Jahren gebildet wurden: S-Layer. Dabei handelt es sich um bestimmte kristalline Oberflächenproteine von Archaeobakterien. Diese Organismen heißen so, weil sie in Lebensräumen vorkommen, die den extremen Bedingungen auf der frühen Erde ähneln. Aufgrund der S-Layer besitzen sie eine enorme Widerstandsfähigkeit gegen

About 85 space-borne projects involving protein crystallisation were carried out as part of the German space programme between 1988 and the end of 2009, from COSIMA satellite flights (1988-1991) to US shuttle missions (1992-2003) to experiments on the ISS. Receiving funds from the DLR Space Agency or its predecessor organisations, these projects brought together about 20 teams of scientists from different universities and Max Planck Institutes in Germany.

In the following, four particularly successful examples will be presented in more detail, showing that Nobel laureate Ada Yonath's crystallisation of ribosomes is not the only achievement that deserves attention. Interestingly, two further scientific teams within DLR's microgravity research programme cooperated closely with Ms Yonath: Professor Christian Betzel from DESY in Hamburg and Professor Volker Erdmann from Berlin Free University, winner of the Leibniz Prize and long-standing spokesman of a collaborative research centre (SFB) at the German Research Foundation (DFG).

#### The structure and function of photo system I (Wolfram Saenger, TU Berlin)

Green plants and algae use photosynthesis to generate their own energy. With the help of sunlight they convert carbon dioxide and water into sugar and oxygen. The basic chemical equation is very simple while the actual mechanism is extremely complex and has not yet been fully understood. Two major protein cofactor complexes, called photo systems I and II, are of major importance to the process as they ensure that the biological energy conversion process runs extremely effectively – with an energy yield amounting to almost 100 per cent. For comparison: modern PV cells do not even reach 20 per cent.

It is these two photo systems whose structure and function researchers worldwide are eager to work out. Among those doing this with great success are research scientists from Berlin's Technical University, headed by Professor Saenger. Here again, microgravity is doing its bit. The team's first breakthrough was achieved during the USML-2 shuttle mission (1995). Crystals were grown on this mission whose volume was twenty times that ever reached in crystals grown on Earth. Based on these crystals an improved structural model of photo system I was developed at 4 Ångström (or  $10^{-4}$  micrometres). This model rendered important functional parts of this large complex visible for the first time.

Further experiments conducted during the 1998 STS-95 shuttle mission showed the nucleation rate to be significantly lower in weightlessness, leading to the formation of larger, almost perfect crystals. Overall, crystals grown under microgravity conditions featured a significantly better resolution and fewer defects than comparable crystals grown on the ground.

Currently, the scientists are working to refine their knowledge on the structure of these crystals. Some years ago they began to include photo system II in their structural analysis. However, early experiments under microgravity have so far failed to bear fruit.

#### The crystallisation of archaea surface proteins (Tony Debaerdemaeker, Ulm University; Helmut König, Mainz University)

Here is what may have been the evolution's first cell wall structures that came into being some three billion years ago: the S-layer. It consists of certain crystalline proteins on the surface of archaeobacteria. The name of these organisms is due to the fact that they occur in hostile habitats similar to that of the early Earth. Thanks to their S-layer they have an enormous resistance to heat, extreme pH values and high salt concentrations.

During shuttle flight STS-95 in October 1998, the teams of Professor Debaerdemaeker (Ulm University) and Professor König (Mainz University) and their Belgian colleagues succeeded for the first time in growing crystals of the S-layer glycoprotein of one of

hohe Temperaturen, extreme pH-Werte und hohe Salzkonzentrationen.

Während des Shuttle-Fluges STS-95 im Oktober 1998 gelang es den Arbeitsgruppen von Professor Debaerdemaeker (Universität Ulm) und Professor König (Universität Mainz) zusammen mit belgischen Kollegen zum ersten Mal, Kristalle des S-Layer-Glycoproteins von einem dieser Archaeobakterien, *Methanothermobacter ferredoxigenes*, zu züchten. Nach der Rückkehr zur Erde wurden diese Kristalle einer Röntgenstrukturanalyse unterzogen. Mit einer Auflösung der Struktur von 3 Ångström war es möglich, viele Einzelheiten, wie zum Beispiel die Gitterkonstanten und die Raumgruppe, eindeutig zu bestimmen. Bei einer Versuchsserie auf der ISS zwischen Juni und Oktober 2002 konnten bei einem anderen Organismus, *Bacillus sphaericus*, sogar Kristalle des S-Layers mit einer Auflösung bis 1,9 Ångström gezüchtet werden.

Die Wissenschaftler sind damit in der Strukturaufklärung der S-Layer ein gutes Stück vorangekommen. Hieraus erhoffen sie sich ein besseres Verständnis der Überlebensstrategien dieser Organismen sowie der zugrundeliegenden molekularen Mechanismen. Dieses Verständnis ist nicht nur wissenschaftlich von Bedeutung, sondern könnte auch den Weg in die Anwendung ebnen. Tatsächlich wurden die Erkenntnisse zur Struktur der S-Layer bereits bei der Entwicklung von Ultrafiltrationsmembranen und anderen technischen Elementen der molekularen Nanotechnologie angewendet.

#### Mistel-Lectin zur Immunstimulierung und Krebsbekämpfung (Christian Betzel, DESY Hamburg)

Fährt man mit dem Zug von Köln nach Paris, fallen an der Bahnstrecke in Frankreich vor allem im Winter viele Bäume auf, die eigenartige kugelförmige Gebilde in den Kronen tragen. Es handelt sich dabei um die Mistel (*Viscum album*), eine immergrüne Pflanze, die in Symbiose auf Bäumen wächst. Schon seit Jahrhunderten wird sie als Heilpflanze eingesetzt. Heute weiß man, dass die Hauptkomponente in den Extrakten der Mistel, die zur Stärkung des Immunsystems und zur Krebstherapie eingesetzt werden, das sogenannte Mistellektin-I ist. Seine Wirkungsweise ist jedoch noch weitgehend unverstanden; die Auflösung der dreidimensionalen Struktur soll weiterhelfen.

Hieran arbeitet seit einigen Jahren die Arbeitsgruppe von Professor Betzel an der Universität Hamburg. Bei Experimenten auf der ISS in den Jahren 2001, 2002 und 2006 gelang es, Kristalle zu züchten, die eine verbesserte Strukturanalyse ermöglichten. Erstmals konnten die chemischen Abläufe im aktiven Zentrum

these archaeobacteria, *Methanothermobacter ferredoxigenes*. Following their return to Earth, the crystals were examined by X-ray crystallography. At a resolution of 3 Ångström it became possible to clearly identify some of the crystals' parameters including their lattice constants and space group. In a series of experiments conducted on the ISS between June and October 2002, researchers were able to grow S-layer crystals of another organism, *Bacillus sphaericus*, at a resolution of 1,9 Ångström.

These experiments have been a great step forward towards understanding the structure of the S-layer. It is hoped that they will open up new insights into the survival strategies of these organisms and the underlying molecular mechanisms. This knowledge is not only important for science but might also open up options for new applications. Actually, the improved knowledge of S-layer structures has already found its way into the development of ultra-filtration membranes and other molecular nanotech applications.

#### Mistletoe lectin as an agent in immune stimulation and cancer treatment (Christian Betzel, DESY, Hamburg)

Bare trees bearing strange globular objects are a common sight along the railway lines as you travel from Cologne to Paris on a winter's day. The globular shapes are mistletoe (*Viscum album*), an evergreen plant living in symbiosis on trees. For many centuries people have used it as a medicinal plant. We now know that the main component in mistletoe extracts, frequently used to strengthen the human immune system and in cancer treatment, is a compound called mistletoe lectin-I. Its precise mode of action is still to a large extent unexplained. A closer investigation of its three-dimensional structure is hoped to provide clarification.

For some years now, this question has been Professor Betzel's area of research at Hamburg University. Experiments carried out on the ISS in 2001, 2002 and 2006 provided crystals that were suitable for an improved structural analysis. Thus it became possible for the first time to explain what goes on in their active centres. The ribosome blocking protein mistletoe lectin-I (ML-I) is built from two separate protein chains, called A and B. Scientists today assume that subunit B is able to recognise certain sugar molecules on the membrane of the cell to be attacked, and thus helps subunit A to penetrate that cell. This process then inhibits the cell's ribosome activity and ultimately leads to the death of what could be a cancer cell.

ISS-borne experiments also gave a clear indication that a wide variety of galactose and lactose sugar chains will adhere to the high-molecular protein complex. This also explains why crystals

erklärt werden. Das ribosom-blockierende Protein Mistellektin-I (ML-I) besteht nämlich aus zwei verschiedenen Eiweißketten A und B. Die Wissenschaftler gehen heute davon aus, dass die Untereinheit B bestimmte Zuckermoleküle der Membran der anzugreifenden Zelle erkennt und der Untereinheit A das Eindringen in die Zelle ermöglicht. Diese hemmt dann die Ribosomen der Zelle und führt dadurch zum Zelltod beispielsweise der Krebszellen.

Die ISS-Experimente wiesen zudem eindeutig darauf hin, dass zahlreiche Zuckerketten aus Galactose und Lactose an den hochmolekularen Proteinkomplex haften. Sie lieferten damit gleichzeitig die Erklärung, weshalb sich unter normalen Laborbedingungen nur mäßig gute Kristalle züchten lassen, die eine genaue Struktur-Funktions-Analyse einschränken. Mit den Weltraumexperimenten und den begleitenden Untersuchungen wurden nun die Grundlagen gelegt, die pharmazeutischen Anwendungen dieses Proteins zu optimieren.

Diese Ergebnisse sind ein gutes Beispiel, wie durch eine detailliertere Strukturaufklärung von organischen Makromolekülen in der medizinischen Grundlagenforschung wichtige molekulare Phänomene besser entschlüsselt und gedeutet werden können. Diese Erkenntnisse können dann genutzt werden, um zum Beispiel Hemmstoffe gezielter zu entwickeln oder Moleküle zu optimieren, die dann mit den Methoden der modernen Molekularbiologie in größeren Mengen produziert werden können.

#### Spiegelbildliche RNA-Moleküle (Volker Erdmann, FU Berlin)

Ribonucleinsäuren, kurz RNA, stellen das Bindeglied zwischen der genetischen Information der DNA und den danach gebildeten Proteinen dar. Die Arbeitsgruppe von Professor Erdmann (FU Berlin) befasst sich seit vielen Jahren mit der Kristallisation und Strukturaufklärung von RNAs und deren Proteinkomplexen. Ausgangspunkt der Studien bildet die ribosomale rRNA, ein wichtiger Bestandteil der Ribosomen, an denen die Proteinsynthese stattfindet. Die Kristalle vom Shuttle-Flug STS-95 sowie aus den viermonatigen Experimenten auf der ISS im Jahre 2001 resultierten in einer detaillierteren Struktur der 5S rRNA Domäne B. Erstmals konnte ein Brechungsmuster des 5S rRNA/L18 Proteinkomplexes erhalten werden.

In weiteren Versuchen auf der ISS im Jahre 2002 wurden in Zusammenarbeit mit der Pharmafirma NOXXON AG zum ersten Mal spiegelbildliche RNA-Moleküle kristallisiert. Der Vorteil spiegelbildlicher Nucleinsäuren gegenüber „natürlichen“ RNA-Molekülen liegt in ihrer großen Beständigkeit im menschlichen

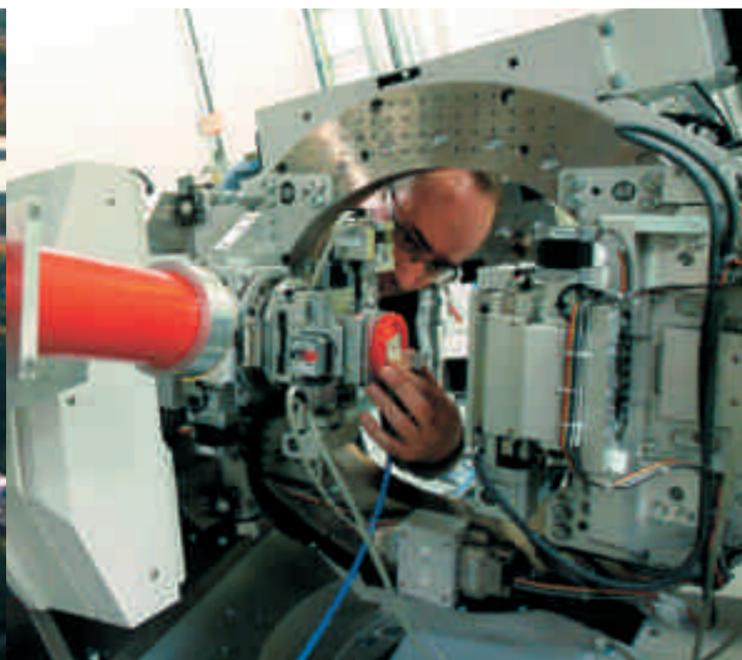


Advanced Protein Crystallization Facility (APCF) auf der Internationalen Raumstation (NASA)

Advanced Protein Crystallization Facility (APCF) on the International Space Station (NASA)

bred under regular laboratory conditions are of only moderate quality, limiting the possibility of an exact structural/functional analysis. Thanks to the space-borne experiments and accompanying investigations the necessary groundwork has now been done to improve the pharmaceutical application of this protein.

These results are a good example of how basic medical research can benefit from a detailed investigation of the structure of organic macromolecules and from understanding important molecular phenomena. The knowledge gained can be put to subsequent use in the development of specific inhibitors or in optimising molecules which can then be fabricated in large quantities using methods of modern molecular biology.



linke Seite: Das deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg (dpa picture alliance)

left page: The DESY research center in Hamburg, Germany (dpa picture alliance)

rechte Seite/right page: Technische Universität Berlin (TU Berlin)



Die D-2 Spacelab Shuttle-Mission STS-55 vom 26. April bis 6. Mai 1993 mit den deutschen Wissenschaftsastronauten Ulrich Walter (zweites Bild von rechts) und Hans Schlegel (zweites Bild von links) (alle Bilder: NASA)

The D-2 Spacelab Shuttle mission STS-55, April 26 to May 6, 1993, with the German mission specialists Ulrich Walter (second picture from the right) and Hans Schlegel (second picture from the left) among the crew members (all pictures: NASA)

Blut. Dadurch erscheinen sie besonders geeignet, Tumore oder Virus-Erkrankungen wie AIDS wirksam zu bekämpfen. Darüber hinaus lassen sie sich aufgrund ihrer hohen Stabilität auch chemisch in großer Menge und hoher Reinheit synthetisieren.

Um allerdings die Funktion dieser Moleküle verstehen zu können, müssen deren Strukturen bekannt sein. Bei den ISS-Experimenten ging es vor allem um die Wechselwirkungen zwischen den Nucleinsäuren und Wasser. Die exakte Anordnung der Wassermoleküle innerhalb der Helix und in deren Umgebung ist wichtig für den Erhalt der räumlichen RNA-Struktur. Das aus diesen Experimenten gewonnene Modell der 5S rRNA eröffnet neue Einsichten in die Interaktion von Antibiotika mit den ribosomalen RNAs und ermöglicht die Entwicklung effektiverer Wirkstoffe.

Weitere Experimente auf der ISS wurden Ende 2008 und im Oktober 2009 auf der ISS durchgeführt. Hier sind die Analysen noch im Gange. Die Forscher erhoffen sich weitere Details der Struktur dieser wichtigen Moleküle. Letztendlich erwarten die Wissenschaftler, dass die Strukturanalyse der RNA-Proben auch zu einem besseren Verständnis der Funktion der Ribosomen beiträgt und die Ergebnisse Eingang in die molekulare Medizin finden. Damit schließt sich gewissermaßen der Kreis, hat doch Professor Erdmann vor mehr als 20 Jahren gemeinsam mit Professor Ada Yonath und Professor Heinz-Günter Wittmann die Grundlagen für die Erforschung der Struktur der Ribosomen gelegt.

#### Was bringt die Zukunft?

Die beschriebenen Beispiele belegen, dass sich – wie so oft in der Forschung – der lange Atem auch bei der Kristallisation organischer Makromoleküle in Schwerelosigkeit gelohnt hat. Nach einem kürzlich erschienenen Übersichtsartikel haben Experimente in Schwerelosigkeit weltweit in etwa 20 Prozent der Fälle zu verbesserten Kristallen geführt. Lässt man bei dieser Bilanz allerdings die Substanzen unberücksichtigt, die nur ein einziges Mal im Weltraum geflogen sind, steigt die Erfolgsquote bereits auf rund 35 Prozent. Und zählt man nur die Makromoleküle, die mehr als viermal im All waren, beträgt die Erfolgsquote mehr als 60 Prozent. Auch hier zeigt sich die Notwendigkeit von Geduld und Ausdauer in der Forschung.

#### Mirror-image RNA molecules (Volker Erdmann, FU Berlin)

Ribonucleic acid, or RNA for short, provides the link between the DNA's genetic information and the proteins assembled as a result. Professor Erdmann and his team at Berlin Free University (FU Berlin) have worked for many years to investigate the structure and crystallisation of RNAs and their protein complexes. The starting point of their investigation is ribosomal rRNA, an important component of the ribosomes at which protein synthesis takes place. Crystals produced on shuttle flight STS-95 and on a four months' worth of experiments on board the ISS in 2001 have resulted in a detailed structure of domain B of the 5S rRNA. For the first time a diffraction pattern of the 5S rRNA/L18 protein complex was obtained.

Further experiments conducted in cooperation with the pharmaceutical company NOXXON AG on the ISS in 2002 led to the first successful crystallisation of mirror-image RNA. The advantage of mirror-image nucleic acid compared to 'natural' RNA molecules lies in their long life in the human blood. This makes them particularly suitable for an effective treatment of tumors or viral infections such as AIDS. In addition, thanks to their great stability they can be chemically synthesised in large quantities and high levels of purity.

However, in order to understand the function of these molecules one has to understand their structure. The main focus of the ISS experiments was on the interaction between nucleic acids and water. The exact array of water molecules within the helix and its surroundings is important for the maintenance of the spatial structure of RNA. The model of 5S rRNA obtained as a result of these experiments opens up new insights into the interaction between antibiotics and ribosomal RNAs, thus permitting the development of more effective drugs.

Further experiments were conducted on the ISS in late 2008 and in October 2009. Analyses are still in progress. Researchers are hoping for further structural details of these important molecules. They ultimately expect the structural analysis of RNA samples to provide a better understanding of ribosomal functions, hoping that the results will find their way into molecular medicine. This is

Aufgrund dieser insgesamt positiven Entwicklung ist verständlich, dass das Thema der Kristallisation organischer Makromoleküle unter Schwerelosigkeit auch im Deutschen Raumfahrt-Programm weiterhin seinen Platz finden wird. Dabei muss man sich von den übertriebenen Erwartungen und sicherlich zu simplen Vorstellungen der Anfangszeit über den Nutzen der Schwerelosigkeit verabschieden – schließlich ist dieser Parameter nur einer von rund 20 Faktoren, die Einfluss auf den Kristallisationsprozess nehmen. Doch im Wechselspiel mit der Forschung auf der Erde werden Weltraumexperimente weiterhin die gewünschten Fortschritte bringen.

Zudem wird die Nutzung der für die Raumstation entwickelten PCDF (Protein Crystallization Diagnostics Facility) die Kenntnisse über den Prozess der Kristallisation im Allgemeinen erweitern. Damit sollte die Grundlage für weitere erfolgreiche Kristallisationsexperimente zur Strukturaufklärung wichtiger organischer Moleküle geschaffen sein – und auch die Advanced Protein Crystallization Facility könnte, stimuliert durch die Vergabe des Nobelpreises an Ada Yonath, vielleicht wieder zum Einsatz auf der ISS kommen.

*Professor Hans-Günter Ruyters leitet das Programm Biowissenschaften in der Abteilung Forschung unter Weltraumbedingungen der DLR Raumfahrt-Agentur.*

where we have come full circle: more than 20 years ago Professor Erdmann together with Professor Ada Yonath and Professor Heinz-Günter Wittmann laid the groundwork for the investigation of ribosomal structures.

#### What does the future hold in store?

As these examples demonstrate, the crystallisation of organic macromolecules in microgravity is yet another example of how, in research, patience will usually pay off in the end. According to a recently published scientific review, experiments under microgravity have produced better crystals in about 20 per cent of cases worldwide. If we leave out the substances that have been in space only once, the success rate rises to about 35 per cent. If we include only those macromolecules that have been investigated in space more than four times, the success rate jumps to more than 60 per cent. This again demonstrates that research needs patience and some staying power.

It is obvious that, as things have been going so well, the crystallisation of organic macromolecules under microgravity conditions will continue to be part of Germany's space programme, too. It would be wrong, though, to count on easy answers and to place excessive expectations in the benefit of weightlessness, as people did in the programme's early days. After all, gravity is only one of about 20 factors influencing the crystallisation process. Yet, as part of a combined effort with Earth-based research, experiments in space will continue to deliver the desired progress.

What is more, the use of the PCDF (Protein Crystallisation Diagnostics Facility) developed for the ISS will lead to a better understanding of the crystallisation process per se. This is more than likely to prepare the ground for further successful crystallisation experiments, improving our insights into the structure of important organic molecules – and, stimulated by Ada Yonath's Nobel Prize, the Advanced Protein Crystallisation Facility could perhaps once again figure among experiments aboard the ISS.

*Professor Günter Ruyters heads the Space Life Sciences Division within the DLR Space Agency's Microgravity Research Programme.*

Der erste deutsche Forschungssatellit Azur auf seiner Umlaufbahn (künstlerische Darstellung)  
The first German research satellite, Azur, on its orbit (artist's view)

# Deutsche Raumfahrt-Missionen

## Teil 1: Forschungssatellit Azur

Von Dr. Niklas Reinke

**Deutschland hat sich in den letzten 50 Jahren zu einer anerkannten Raumfahrtnation entwickelt. Seine Kompetenzen bringt es in allen Bereichen der Raumfahrt ein: Deutschland ist maßgeblich an der Erforschung des Weltraums und der Forschung im Weltraum beteiligt. Innovative Anwendungen für die Verbesserung des Lebens auf der Erde werden in den Bereichen Kommunikation, Erdbeobachtung und Navigation erzielt. Und deutsche Ingenieure sind an Entwicklung und Konstruktion modernster Trägerraketen und Weltraumsysteme beteiligt. Hierbei engagiert sich Deutschland national, europäisch und international. Diese neue Artikelserie stellt wegweisende Missionen der deutschen Raumfahrt-Geschichte vor.**

## German Space Missions

### Part 1: The Azur research satellite

By Dr. Niklas Reinke

**In the course of the last 50 years, Germany has become an acknowledged spaceflight nation. The nation's competence extends to all spheres of the discipline: Germany plays a key role in the exploration of space as well as in space research. Innovative applications in communication, Earth observation and navigation serve to improve living conditions on Earth. Moreover, German engineers are involved in the development and construction of leading-edge launchers and space systems. In all these fields, Germany is engaged not only on the national but also on the European and international plane. This new series of articles presents landmark missions in the history of German space flight.**

Es war Samstag, der 8. November 1969, als um 2.52 Uhr MEZ auf dem kalifornischen Raketenstartplatz Vandenberg eine Scout-Rakete die Erde verließ. Sie trug den 81,7 Kilogramm schweren deutschen Forschungssatelliten Azur ins All – den ersten deutschen Erdtrabanten überhaupt.

Dieser erfolgreiche Start war der Höhepunkte einer mehr als neunjährigen Vorbereitungszeit. Spätestens seit dem Jahreswechsel 1960/61 plante die Bundesregierung, neben den angestrebten europäischen Raumfahrtprojekten die Kooperation mit den USA zu suchen. Dies war wichtig, um den technologischen und wissenschaftlichen Anschluss im internationalen Umfeld nicht zu verlieren. Im Februar 1961 fanden Vorbesprechungen mit der US-amerikanischen Weltraumbehörde (National Aeronautics and Space Administration) statt. Die NASA betonte, dass sie kein Interesse an einer Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Raketenentwicklung hege – immerhin begann sie 1961 bereits mit dem Saturn-Programm. Gegenüber einer Kooperation bei der Weltraumforschung zeigte sie sich jedoch aufgeschlossen.

Für die Bundesrepublik Deutschland war dies eine große Chance: Während Westeuropa 1962 mit der Konzeption erster Forschungsprojekte begann, hatten die USA bereits Satelliten zur Erforschung der Erdatmosphäre und des nahen Weltraums sowie den weltweit ersten meteorologischen Satelliten, Tiros 1, gestartet (April 1960). Weiterhin nahmen die USA Satellitenbeobachtungen der Sonne vor (OSO 1, März 1962) und führten die ersten Missionen zum Mond (Ranger 3, Januar 1962) und zur Venus (Mariner 2, August 1962) durch.

Auf einer Reise in die USA Mitte April 1962 sondierte Siegfried Balke, der damals für wissenschaftliche Forschung zuständige Bundesminister die Kooperations-Bereitschaft der amerikanischen Politik, Wissenschaft und Industrie. Tatsächlich versprachen sich auch die USA Vorteile von einer Zusammenarbeit mit der bundesdeutschen Industrie und Forschung, die als besonders zuverlässig galten. Durch die Förderung internationaler Vorhaben erhoffte sich die NASA eine breitere Basis für die eigene weltraumgestützte Forschung. Politisch sollte die Kooperation das positive, offene Image der Amerikaner im Gegensatz zur Sowjetunion in den Zeiten des Kalten Krieges stützen und den europäischen Einigungsprozess durch neue Felder für innere Zusammenarbeit stärken. Folglich instrumentalisierten die USA auch Weltraumtechnologie, wie den gesamten Bereich der Hochtechnologie, für dieses erweiterte Verständnis von staatlicher Diplomatie. Außerdem wollten sie durch Kooperationen die Kosten der eigenen Weltraum-Forschung senken. Spezifisches Interesse an einer Kooperation mit der Bundesrepublik zeigten die USA bei der Ausstattung von Satelliten mit wissenschaftlichen Instrumenten, der Verbesserung der Satellitensteuerung (die im Wesentlichen noch auf der für die A4 in Deutschland entwickelten Technik beruhte) und im Bereich der Mikroelektronik.

Trotz dem im Verhältnis zu den USA geringen deutschen Raumfahrt-Budget wurden Bereiche gefunden, in denen sich die USA Unterstützung durch die in Deutschland vorhandene wissenschaftliche Exzellenz erhofften. Dies ermöglichte etwa der Exobiologie, Raumflugmedizin und der Sonnenforschung den Zugang zum amerikanischen Weltraumprogramm. Ein wichtiger Schritt war die Vereinbarung des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg mit der NASA zur Entwicklung von Auffangflächen für Mikrometeoriten im Mai 1964.

It was on Saturday, November 8, 1969, at 2:52h CET that a Scout rocket launched from the Californian rocket base of Vandenberg left Earth behind. Its payload was Azur, a research satellite weighing 81.7 kilogrammes, the first satellite ever launched by Germany.

The successful launch marked the culminating point of more than nine years of preparation. Ever since the turn of the year 1960, the Federal Government had been seeking to cooperate with the USA in addition to its engagement in European space projects. The overall objective was to keep in touch with scientific and technological developments in the international environment. Preliminary talks with the American space agency NASA (National Aeronautics and Space Administration) took place in February 1961. While NASA emphasised that it was not interested in cooperating on rocket development – after all, its Saturn programme had already been launched in 1961 – it was open-minded as regards cooperation on space research.

To the Federal Republic of Germany this was a splendid opportunity: whereas Western Europe did not begin formulating its first research project concepts until 1962, the US had already launched satellites to explore the Earth's atmosphere and near-Earth space. Moreover, it had launched the world's first meteorological satellite, Tiros 1, in April 1960, and it was about to launch a satellite to observe the Sun (OSO 1, March 1962) and send probes to the Moon (Ranger 3, January 1962) and Venus (Mariner 2, August 1962).

In mid-April 1962, Siegfried Balke, the federal minister in charge of scientific research at that time, visited the United States in order to establish the extent to which American politics, science and industry were prepared to cooperate. In point of fact, the Americans themselves thought they would stand to benefit from cooperating with Germany's industry and research, which were regarded as particularly reliable. NASA was hoping to enlarge its basis for its own space-based research by promoting international projects. Politicians thought that cooperation would enhance America's positive image of receptiveness in contrast to that presented by the Soviet Union at the time of the Cold War, reinforcing at the same time the process of European integration by opening up new fields for internal cooperation. In pursuit of this wider interpretation of state diplomacy, the US used not only space technology but its entire high-tech industry. Furthermore, it intended to lower the cost of its own space research through cooperation. Specifically, the US showed interest in cooperating with the Federal Republic on the equipment of satellites with scientific instruments, improvements in satellite control (which was still essentially based on the technology developed in Germany for the A4) and in the field of microtechnology.

Although Germany's space budget was small compared to that of the USA, fields were identified in which even the US was hoping that it might be assisted by Germany's scientific excellence. German research disciplines which thus gained access to the American space programme included exobiology, space medicine and solar research. One important step in that direction was the agreement on the development of micrometeorite traps concluded in May 1964 between NASA and the Max Planck Institute for Nuclear Physics.

Im Oktober 1964 waren die transatlantischen Gespräche soweit gediehen, dass man über die gemeinsame Ausführung eines Satellitenprogramms beraten konnte. Die Konzentration der deutschen Politik auf ein Satellitenprogramm war in mehrfacher Hinsicht wichtig: Deutsche Wissenschaftler hätten anders keine Chance erhalten, an Untersuchungen im Weltraum teilzunehmen, und der deutschen Industrie wäre es anders kaum möglich gewesen, später im europäischen Verbund an Projekten der Raumfahrt maßgeblich mitzuwirken. Nach Abstimmung der wissenschaftlichen Aufgabenstellung sollte der Satellit von der deutschen Industrie in Zusammenarbeit mit amerikanischen Firmen entwickelt werden. Die wissenschaftliche Ausrüstung würden deutsche Forschungsgruppen entwickeln. Der Start war mit einer amerikanischen Scout-Rakete geplant.

Zwar war man auf die Startkapazität der Amerikaner angewiesen, dennoch kann man sagen, dass mit dem am 17. Juli 1965 zwischen dem Bundesministerium für wissenschaftliche Forschung (BMwF) und der NASA unterzeichneten „Memorandum of Understanding“ (MoU) das erste selbstständige Satellitenprojekt Deutschlands initiiert wurde. Jeder der beiden Partner trug dabei seine eigenen Kosten: die Bundesrepublik für die Entwicklung des Satelliten und des dazugehörigen Bodensegments, die USA für die Träger Rakete, die Startdurchführung und die Bahnverfolgung. Die deutschen Kosten waren mit 66,3 Millionen DM veranschlagt

In October 1964, transatlantic talks had matured enough to permit discussing the joint implementation of a satellite programme. There were several reasons why it was important for German politics to concentrate on such a programme: there was no other opportunity for German scientists to participate in space experiments, and there was hardly another way for Germany's industry to prepare itself for playing a major role in joint European space projects later on. Once the scope of related scientific tasks had been agreed, the satellite was to be developed by the German industry in cooperation with American companies. The satellite's scientific equipment was to be developed by German research groups, and it was to be launched on an American Scout rocket.

Despite the need to rely on American capacities for launching, it may be said that the memorandum of understanding (MoU) signed on July 17, 1965 by the Federal Ministry of Scientific Research (BMwF) and NASA initiated Germany's first autonomous satellite project programme. Both partners were to bear their own expenses: the Federal Republic would pay for the development of the satellite and its ground segments while the USA would pay for the launcher, the launch and the tracking of the satellite in orbit. Originally estimated at DM 66.3 million, Germany's share in the cost amounted to c. DM 80 million in the end. At first, the eminent project was given the somewhat cryptic designation of 'Project 625 A-1', but a more attractive name was soon found: 'Azur'.

Gürtel, die Polarlichter sowie die zeitlichen Änderungen der Solarpartikelströme (Sonnenwind) bei Sonneneruptionen.

Neben dem vornehmlichen Interesse an neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen verfolgte das BMwF noch ein zweites Ziel, nämlich durch die Erprobung neuer Techniken die technologischen Fähigkeiten der deutschen Industrie auszubauen. Ebenso galt es, neuartige Managementmethoden zu entwickeln beziehungsweise von der NASA abzuschauen, um einen reibungslosen Ablauf der komplexen Projektorganisation zu gewährleisten. Diplom-Ingenieur Ants Kutzer, Projektleiter Azur bei der Gesellschaft für Weltraumforschung (GfW), resümierte im Dezember 1969: "Die gewonnene Erfahrung ist abhängig von dem Schwierigkeitsgrad der Aufgabenstellung. Das Projekt Azur ist technisch komplexer als vergleichbare Projekte, das Management-System ebenso an Komplexität kaum zu übertreffen."

Industrieller Hauptauftragnehmer wurde der Flugzeugbauer Bölkow im oberbayerischen Ottobrunn, in dessen Aufgabenbereich die Koordination, Integration, Erprobung und Startunterstützung fiel. Industrielle Unterauftragnehmer waren ERNO (Struktur, Ausleger, Entdrallungssystem), Dornier-System (Lagestabilisierung, Wärmehaushalt), AEG-Telefunken (Sender, Empfänger, Bandaufzeichnungsanlage), AEG-Hamburg (Sonnenzellenanlage, Energieversorgung), SEL (Kommando-Entschlüssler, Datenver-

try. Yet another objective was to develop, or copy from NASA, innovative management methods which would ensure that the complex organisation of the project proceeded without a hitch. Summing up, Dipl.-Ing. Ants Kutzer, manager of the Azur project with the Society for Space Research (GfW), said in December 1969, 'What experience you acquire depends on the difficulty of the problem. The technical complexity of the Azur project exceeds that of similar undertakings, and the complexity of the management system can hardly be surpassed.'

Bölkow, an aircraft company domiciled in Ottobrunn in Bavaria, was appointed prime industrial contractor with the task of coordinating, integrating and testing the satellite and supporting its launch. Industrial subcontractors included ERNO (structure, boom, despinning system), Dornier System (gyroscope, heat balance), AEG-Telefunken (transmitter, receiver, tape-recording equipment), AEG Hamburg (solar cell system, power supply), SEL (command decoder, data processing unit, remote monitoring system), and Siemens (coupler, aerial diplexer, aerial, electronic ground auxiliaries). Responsibility for the scientific payload rested with the Max Planck Institutes for Extraterrestrial Physics (Garching) and Stratospheric Physics (Lindau/Harz), the Institute for Atmospheric Physics (Oberpfaffenhofen) of the German Aerospace Research and Development Institute (DFVLR, today: DLR) and the Institute for Geophysics and Meteorology at Technische Universität



von links nach rechts:  
Auswahl der Solarzellen für Azur im DFVLR-Institut für Raumsimulation in Köln, dem heutigen DLR-Hauptstütz

Azur wird in die Weltraum-Simulationskammer des DFVLR eingebracht

Azur im schalltoten Raum zur Ermittlung der Bordantennen-Kenndaten sowie des Reflexionsverhalten des Satelliten (MBB)

from left to right:  
Selection of photovoltaic cells designed for Azur at the DFVLR institute for space simulation in Cologne, today's DLR headquarters

Azur being inserted into the DFVLR space simulation chamber

Determination of Azur's aerial parameters and reflexion performance inside the anechoic chamber (MBB)

worden und beliefen sich im Endeffekt auf circa 80 Millionen DM. Das herausragende Vorhaben erhielt zunächst die kryptische Bezeichnung „Projekt 625 A-1“, bald aber schon fand man mit „Azur“ einen ansprechenderen Namen.

Das Interesse der deutschen Forschung war verständlicherweise groß. Über 100 Experimentieranschläge waren bis Anfang 1965 von Hochschulinstituten, freien Forschungseinrichtungen und der Industrie beim BMwF eingereicht worden. Sieben hiervon wurden schließlich nach Maßgabe der technischen Möglichkeiten (maximale Ausmaße und Masse des Satelliten, notwendige technische Übertragungsinstrumente, verfügbare Sendeleistung) ausgewählt. Ihre Zielsetzung konzentrierte sich auf die Erforschung der kosmischen Strahlung und ihrer Wechselwirkung mit der Magnetosphäre, spezifisch auf den inneren Van-Allen-

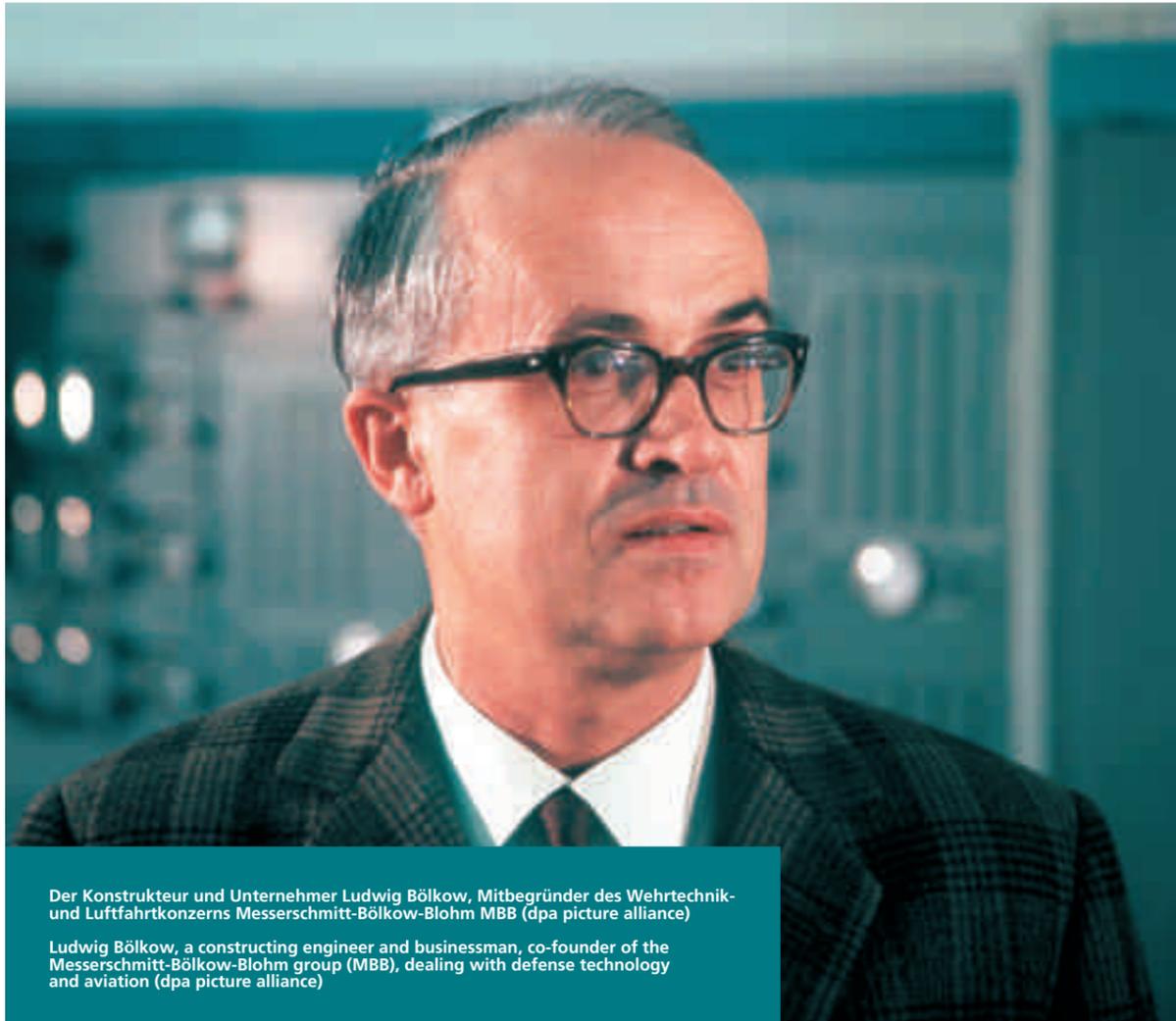
Understandably enough, German researchers showed great interest. By the beginning of 1965, the BMwF had received more than one hundred proposals for experiments from university institutes, independent research facilities and industrial companies. Of these, seven were finally selected on the basis of technical constraints (maximum satellite dimensions and mass, requisite technical transmission equipment, available transmitting power). Their main purposes were to investigate cosmic radiation and its interaction with the magnetosphere and specifically the inner Van Allen Belt, polar lights, and changes in the flow of solar particles (also referred to as solar wind) over time during solar eruptions.

Besides its preponderant interest in new scientific insights, the BMwF pursued another goal, which was to test new technologies in order to enhance the related capabilities of Germany's indus-

arbeitungseinrichtung, Fernüberwachungssystem) und Siemens (Koppler, Antennenweiche, Antenne, elektronische Bodenhilfseinrichtungen). Für die wissenschaftliche Nutzlast zeichneten die Max-Planck-Institute für Extraterrestrische Physik in Garching und für Stratosphärenphysik in Lindau/Harz, das Institut für Reine und Angewandte Kernphysik der Universität Kiel, die Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR, heute: DLR) mit ihrem Institut für Physik der Atmosphäre in Oberpfaffenhofen sowie das Institut für Geophysik und Meteorologie der TH Braunschweig verantwortlich. Die Erprobung des Satelliten wurde bei der Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft (IABG) und der DFVLR vorgenommen, mit der technischen Gesamtleitung die GfW betraut.

Braunschweig. The satellite was tested at the facilities of IABG, a testing company, and the DFVLR. The general technical management was entrusted to GfW.

To the German companies, the tasks they were now facing represented an immense technological challenge for which they were 'hardly prepared', as Ludwig Bölkow remarked. After all, the vehicles and payloads employed in astronautics need to withstand the extreme conditions prevailing during both take-off and flight. They have to resist mechanical stresses as well as exposure to heat, cold, radiation and hard vacuum. Consequently, it is necessary to keep these considerations constantly in mind when selecting materials and designing equipment. The drastic restrictions applying to the volume and weight of satellites represent an additional challenge to their design. Because of these restrictions,



Der Konstrukteur und Unternehmer Ludwig Bölkow, Mitbegründer des Wehrtechnik- und Luftfahrtkonzerns Messerschmitt-Bölkow-Blohm MBB (dpa picture alliance)

Ludwig Bölkow, a constructing engineer and businessman, co-founder of the Messerschmitt-Bölkow-Blohm group (MBB), dealing with defense technology and aviation (dpa picture alliance)

Für die deutschen Firmen bedeuteten die an sie gestellten Aufgaben eine immense technologische Herausforderung, auf die sie nach den Worten Ludwig Bölkows „kaum vorbereitet“ waren. Denn Fluggeräte und Nutzlastkörper für die Raumfahrt müssen während Start und Flug extremen Belastungen und Umweltbedingungen standhalten. Dies gilt für die Mechanik in gleichem Maße wie für die Wärme- und Kältebelastung, die Strahleneinwirkungen oder die Auswirkungen des Vakuums. Insofern müssen diese Überlegungen bei der Auswahl der eingesetzten Materialien und der Konstruktion der Geräte ständig berücksichtigt werden. Eine zusätzliche Herausforderung bei der Konstruktion von Satelliten stellen die drastischen Beschränkungen für Volumen und Gewicht dar. Diese bedingen, dass alle Komponenten möglichst gedrängt auf kleinstem Raum unter Verwendung leichtester Werkstoffe ausgeführt werden müssen, die trotzdem extreme Beanspruchungen aushalten können. Daraus resultieren die hohen Ausgaben der Weltraumforschung, denn eine Amortisation der Entwicklungskosten über eine Serienproduktion gibt es selten. Weltraumforschung verlangt aber auch ein großes schöpferisches Potenzial.

all components must be packed as closely as possible and made of the lightest materials available which nevertheless need to be able to endure extreme stresses. This is why such great sums are being spent on space research, for cases in which the cost of development can be recovered through serial production are rare. Moreover, space research calls for great creative potential.

All these requirements were new to the companies involved in planning Azur. After repeated requests by the project management, the US company TRW was finally assigned to support the system leader, Bölkow, although the satellite concept ultimately selected was developed by Ernst Theunissen, a German project manager, and Wladimir Maydell, a physicist. On the other hand, virtually all electronic components were purchased in the USA, where some of the German companies involved set up branch offices in order to facilitate contacts with American suppliers.

Diese Anforderungen waren neu für die an der Azur-Planung beteiligten Unternehmen. Auf wiederholten Wunsch der Projektleitung wurde dem Systemführer Bölkow daher die amerikanische Firma TRW unterstützend zugeteilt, obgleich im Ergebnis der Satelliten-Entwurf des deutschen Projektleiters Ernst Theunissen und des Physikers Wladimir Maydell ausgewählt wurde. Doch praktisch alle elektronischen Bauteile wurden in den USA beschafft, wo die beteiligten Firmen zum Teil Büros eingerichtet hatten, um Kontakte zu amerikanischen Firmen aufzubauen.

Mit dem Start des Satelliten in seine fast polare Umlaufbahn am 8. November 1969 gesellte sich die Bundesrepublik Deutschland zu den Staaten, die bereits über künstliche Erdtrabanten verfügten: Sowjetunion, USA, Großbritannien, Italien, Frankreich, Kanada, Japan und Australien. Während der Start und die anfängliche Flugphase von der NASA überwacht wurden, übernahm das eigens errichtete deutsche Satellitenkontrollzentrum (GSOC) der DFVLR in Oberpfaffenhofen am 15. November die Betriebsverantwortung, wobei im Laufe der Zeit 21 Bodenstationen der NASA, der ESRO, der französischen Raumfahrtagentur CNES und des deutschen Bodenbetriebssystems beteiligt waren. Fünf Wochen nach dem Start fiel das Magnetband-Speichergerät aus, so dass von diesem Zeitpunkt an die Messwerte und Kontrolldaten nur noch als Echtzeit-Informationen empfangen werden konnten, was den Datenstrom auf circa 80 Prozent der erhofften Menge reduzierte.

#### Kerndaten Azur

<b>Beschluss</b>	17. Juli 1964 (MoU BMwF-NASA)
<b>Start</b>	8. November 1969
<b>Startbasis</b>	Vandenberg (USA)
<b>Träger</b>	Scout-B
<b>Masse</b>	72 Kilogramm
<b>Experimente</b>	7
<b>Orbit-Neigung</b>	103 Grad gegen den Äquator (fast polar)
<b>Orbit-Höhe</b>	zwischen 380 und 3.150 Kilometer
<b>Missionsende</b>	29. Juni 1970
<b>Kosten</b>	80 Millionen DM (deutscher Anteil)

Als am 29. Juni 1970 die Verbindung zu Azur aus ungeklärten Gründen abbrach, hatte der Satellit seine erwartete Lebenszeit von mindestens einem Jahr zwar nicht erreicht, dennoch werteten Politik, Forschung und Industrie die Durchführung des ersten deutschen Langzeitunternehmens im All als großen Erfolg. Zehn Jahre später verglühte Azur in der Erdatmosphäre.

Wenn Azur auch nicht allen wissenschaftlichen Erwartungen gerecht wurde - die politische Hoffnung jedenfalls erfüllte sich: Durch die Mitarbeit vieler Firmen am Projekt Azur erweiterte sich das raumfahrtspezifische Know-how sowohl der deutschen Industrie als auch der Wissenschaft gehörig und bereitete beide auf künftige Aufgaben vor. Deutschlands Gesellenstück in der Weltraumforschung war geglückt. Bald schon würde man sich auf den Meisterbrief vorbereiten: Azur war der Ausgangspunkt für bis heute über einhundert wissenschaftlichen Satelliten-Missionen mit maßgeblicher Beteiligung Deutschlands.

*Dr. Niklas Reinke ist Politologe und Historiker. Er arbeitet in der Abteilung Raumfahrt-Strategie der DLR Raumfahrt-Agentur.*

When Azur entered its near-circumpolar orbit on November 8, 1969, the Federal Republic of Germany joined the club of those states that already had their own satellites: the Soviet Union, the USA, Great Britain, Italy, France, Canada, Japan, and Australia. While the take-off and the initial flight phase were monitored by NASA, the German Satellite Operations Centre (GSOC) that had been set up by the DFVLR at Oberpfaffenhofen specifically for the purpose assumed responsibility for operations on November 15. 21 ground stations run by NASA, ESRO, the French space agency CNES and the German ground operation system were involved in the course of time. Five weeks after take-off, the magnetic tape storage device broke down; from that time onwards, measurements and control data could be received only in real time, the consequence being that the flow of data shrank to c. 80 per cent of the volume that had been hoped for.

#### Azur key data

<b>Decision</b>	July 17, 1964 (MoU BMwF-NASA)
<b>Launch</b>	November 8, 1969
<b>Base</b>	Vandenberg (USA)
<b>Launcher</b>	Scout B
<b>Mass</b>	72 kilogrammes
<b>Experiments</b>	7
<b>Orbital inclination</b>	103 degrees against the equator (nearly circumpolar)
<b>Orbital height</b>	between 380 and 3.150 kilometres
<b>End of mission</b>	June 29, 1970
<b>Cost</b>	DM 80 million (German share)

When Azur stopped responding on June 29, 1970 for reasons that never became clear, the satellite had not completed its expected lifetime of at least one year. Nevertheless, Germany's first long-term mission in space was regarded as a great success in political, scientific and industrial circles. Ten years later, Azur burned up in the Earth's atmosphere.

Even though Azur did not meet all scientific expectations, it did meet the political hopes that had been pinned to it: the involvement of many companies in the project was instrumental in considerably enlarging the astronomical know-how of Germany's industry and science, putting both on track for meeting the problems of the future. In a manner of speaking, Germany had successfully obtained its journeyman's certificate in space research. The master craftsman's diploma would not be a long time coming: Azur was the starting point for more than one hundred scientific satellite missions in which Germany has played a major role to this day.

*Dr. Niklas Reinke is a politologist and historian. He works with the Space Strategy Department of the DLR Space Agency.*

# Raumfahrkalender

Termin Ereignis

## 2010

Anfang Mai	Erstflug des SpaceX-Trägers Falcon 9 (Demo 1) von Cape Canaveral (Florida/USA)
14. Mai	Start STS 132, Space Shuttle Atlantis von Cape Canaveral
21. Mai	Start Ariane 5 ECA mit den Satelliten Astra-3B und COMSATBW-2 von Kourou (Französisch-Guayana)
25. Mai	<b>First-Light-Flug</b> des Stratosphären-Observatoriums SOFIA mit US-amerikanischem Instrument FORCAST
Juni	Start des Teleskops Spektr R von Baikonur (Kasachstan) mit dem Space Debris Detektor des Fraunhofer-Instituts für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut in Freiburg
Juni	Start Ariane 5 ECA mit den Satelliten Arabsat-5A und COMS-1 von Kourou
3. Juni	Start der Mars500-Simulation (520 Tage) in Moskau (Russland)
8.-13. Juni	ILA 2010, Internationale Luft- und Raumfahrtausstellung in Berlin
15. Juni	Start Sojus 23S von Baikonur (Versorgung ISS)
21. Juni	Start Erdbeobachtungssatellit TanDEM-X mit Dnepr von Baikonur
28. Juni	Start Progress 38P von Baikonur (Versorgung ISS)
Juli	Start Ariane 5 ECA mit den Satelliten Rascom-QAF 1R und Nilesat-201 von Kourou
10. Juli	Vorbeiflug der Raumsonde Rosetta am Asteroiden Lutetia
21. Juli	Start SpaceX-Träger Falcon 9 (Demo 1) von Cape Canaveral
18.-25. Juli	COSPAR 2010 (Kongress des Committee on Space Research) in Bremen
31. August	Start Progress 39P von Baikonur (Versorgung ISS)
Herbst	<b>Erste Wissenschaftsflüge</b> des Stratosphären-Observatoriums SOFIA mit US-amerikanischem Instrument FORCAST
16. September	Start STS-133, Space Shuttle Discovery von Cape Canaveral
27. Sept.-1. Okt.	61. International Astronautical Congress in Prag (Tschechien)
30. September	Start Sojus 24S von Baikonur (Versorgung ISS)
Oktober	Erster Start einer Sojus 2-1a Fregat von Kourou mit dem Satelliten HYLAS-1
3.-15. Oktober	Studenten-Ballon-Kampagne BEXUS 10/11 in Esrange (Schweden)
27. Oktober	Start Progress 40P von Baikonur (Versorgung ISS)
12. November	Start SpaceX-Träger Falcon 9 (Demo 2) von Cape Canaveral
Mitte November	Start STS-134, Space Shuttle Endeavour von Cape Canaveral mit dem Alpha Magnetic Spectrometer (AMS), Beteiligung RWTH Aachen und Uni Karlsruhe (voraussichtlich letzter Flug eines Space Shuttle)
15.-28. November	16. DLR Parabelflug in Bordeaux (Frankreich)
Dezember	Start ATV-2 "Johannes Kepler" mit Ariane 5 von Kourou
Dezember	Start von zwei ECOMA-Höhenforschungsraketen von Andenes (Norwegen)
Dezember	Start Sojus von Baikonur mit dem deutschen Test-Satelliten TET-1
Dezember	Start Sojus von Baikonur mit russischem Satelliten MKA-FKI mit dem deutschen ADSB Empfänger; Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
10. Dezember	Start Sojus 25S von Baikonur (Versorgung ISS)
27. Dezember	Start Progress 41P von Baikonur (Versorgung ISS)

## 2011

20. Januar	Start HTV-2 vom japanischen Raumfahrtzentrum Tanegashima
Frühjahr	Start Sojus 2-1b Fregat von Kourou mit zwei Galileo IOV-Satelliten
18. März	Start Forschungsrakete TEXUS 48 (DLR/ESA) von Esrange mit drei Experimenten, davon eines aus Deutschland
27. März	Start Forschungsrakete TEXUS 50 (DLR) von Esrange mit vier deutschen Experimenten

# Space Calendar

Date Event

## 2010

Early May	First flight of SpaceX launcher Falcon 9 (Demo 1) from Cape Canaveral (Florida/USA)
May 14	Launch of STS 132, Space Shuttle Atlantis from Cape Canaveral
May 21	Launch of Ariane 5 ECA, carrying the satellites Astra-3B and COMSATBW-2 from Kourou (French Guiana)
May 25	<b>First-light flight</b> of the stratosphere observatory SOFIA, carrying the US-American instrument FORCAST
June	Launch of the telescope Spektr R from Baikonur (Kazakhstan) carrying the Space Debris Detector of the Fraunhofer Institute for High-Speed Dynamics, Ernst Mach Institute in Fribourg
June	Launch of Ariane 5 ECA carrying the satellites Arabsat-5A and COMS-1 from Kourou
June 3	Start of Mars500 simulation (520 days) in Moscow (Russia)
June 8-13	ILA 2010, International Aerospace Exhibition in Berlin (Germany)
June 15	Launch of Sojus 23S from Baikonur (ISS logistics)
June 21	Launch of Earth observation satellite TanDEM-X on Dnepr from Baikonur
June 28	Launch of Progress 38P from Baikonur (ISS logistics)
July	Launch of Ariane 5 ECA carrying the satellites Rascom-QAF 1R and Nilesat-201 from Kourou
July 10	Flyby of the Rosetta space probe at Lutetia asteroid
July 21	Launch of SpaceX launcher Falcon 9 (Demo 1) from Cape Canaveral
July 18-25	COSPAR 2010 (Congress of the Committee on Space Research) in Bremen (Germany)
August 31	Launch of Progress 39P from Baikonur (ISS logistics)
Autumn	<b>First scientific flights</b> of the stratosphere observatory SOFIA, carrying the US-American instrument FORCAST
September 16	Launch of STS-133, Space Shuttle Discovery from Cape Canaveral
Sept. 27-Oct. 1	61 <sup>st</sup> International Astronautical Congress in Prague (Czech Republic)
September 30	Launch of Sojus 24S from Baikonur (ISS logistics)
October	First launch of a Sojus 2-1a Fregat from Kourou, carrying the satellite HYLAS-1
October 3-15	Students' balloon campaign BEXUS 10/11 in Esrange (Sweden)
October 27	Launch of Progress 40P from Baikonur (ISS logistics)
November 12	Launch of SpaceX launcher Falcon 9 (Demo 2) from Cape Canaveral
Mid-November	Launch of STS-134, Space Shuttle Endeavour from Cape Canaveral carrying the Alpha Magnetic Spectrometer (AMS), with contributions from RWTH Aachen and University of Karlsruhe (presumably last flight of a Space Shuttle)
November 15-28	16 <sup>th</sup> DLR parabolic flight in Bordeaux (France)
December	Launch of ATV-2 'Johannes Kepler' on Ariane 5 from Kourou
December	Launch of two ECOMA sounding rockets from Andenes (Norway)
December	Launch of Sojus from Baikonur, carrying the German test satellite TET-1
December	Launch of Sojus from Baikonur, carrying the Russian satellite MKA-FKI with German ADSB receiver; University for Applied Sciences, Hamburg (Germany)
December 10	Launch of Sojus 25S from Baikonur (ISS logistics)
December 27	Launch of Progress 41P from Baikonur (ISS logistics)

## 2011

January 20	Launch of HTV-2 from the Japanese spaceport of Tanegashima
Spring	Launch of Sojus 2-1b Fregat from Kourou, carrying two Galileo IOV satellites
March 18	Launch of research rocket TEXUS 48 (DLR/ESA) from Esrange, carrying three experiments, one of which from Germany
March 27	Launch of research rocket TEXUS 50 (DLR) from Esrange, carrying four German experiments



**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.**

## Das DLR im Überblick

Das DLR ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Seine umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Luftfahrt, Raumfahrt, Verkehr und Energie sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden. Über die eigene Forschung hinaus ist das DLR als Raumfahrt-Agentur im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten sowie für die internationale Interessenswahrnehmung zuständig. Das DLR fungiert als Dachorganisation für den national größten Projektträger.

In den 13 Standorten Köln (Sitz des Vorstands), Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Göttingen, Hamburg, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Stuttgart, Trauen und Weilheim beschäftigt das DLR circa 6.500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Das DLR unterhält Büros in Brüssel, Paris und Washington D.C.

## Impressum

Newsletter COUNTDOWN – Aktuelles aus der DLR  
Raumfahrt-Agentur  
Herausgeber: Deutsches Zentrum für Luft- und  
Raumfahrt e.V. (DLR)

Redaktion: Sabine Göge (ViSdP),  
Michael Müller (Redaktionsleitung),  
Diana Gonzalez

Hausanschrift:  
Königswinterer Straße 522–524,  
53227 Bonn  
Telefon: +49 (0) 228 447-385  
Telefax: +49 (0) 228 447-386  
E-Mail: [m.mueller@dlr.de](mailto:m.mueller@dlr.de)  
[www.DLR.de/rd](http://www.DLR.de/rd)

Druck: Druckerei Thierbach,  
45478 Mülheim an der Ruhr

Gestaltung: CD Werbeagentur GmbH,  
53842 Troisdorf  
[www.cdonline.de](http://www.cdonline.de)

ISSN 1864-6123

Nachdruck nur mit Zustimmung des Herausgebers  
und Quellenangabe. Gedruckt auf umwelt-  
freundlichem, chlorfrei gebleichtem Papier. Alle  
Bilder DLR, soweit nicht anders angegeben.  
Namentlich gekennzeichnete Artikel geben nicht  
unbedingt die Meinung der Redaktion wieder.  
Erscheinungsweise vierteljährlich, Abgabe kostenlos.

Gefördert durch das  Funded by



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie**

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.  
based on a decision of the German Federal Parliament.

## DLR at a glance

DLR is Germany's national research center for aeronautics and space. Its extensive research and development work in Aeronautics, Space, Transportation and Energy is integrated into national and international cooperative ventures. As Germany's space agency, DLR has been given responsibility for the forward planning and the implementation of the German space program by the German federal government as well as for the international representation of German interests. Furthermore, Germany's largest project-management agency is also part of DLR.

Approximately 6,500 people are employed at thirteen locations in Germany: Koeln (headquarters), Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Goettingen, Hamburg, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Stuttgart, Trauen and Weilheim. DLR also operates offices in Brussels, Paris, and Washington D.C.

## Imprint

Newsletter COUNTDOWN – Topics from the DLR  
Space Agency  
Publisher: Deutsches Zentrum für Luft- und  
Raumfahrt e.V. (DLR)

Editorial office: Sabine Göge (ViSdP),  
Michael Müller (Chief Editor),  
Diana Gonzalez

Postal Address:  
Königswinterer Straße 522–524,  
53227 Bonn  
Telephone: +49 (0) 228 447-385  
Telefax: +49 (0) 228 447-386  
E-mail: [m.mueller@dlr.de](mailto:m.mueller@dlr.de)  
[www.DLR.de/rd](http://www.DLR.de/rd)

Print: Druckerei Thierbach,  
45478 Mülheim an der Ruhr, Germany

Layout: CD Werbeagentur GmbH,  
53842 Troisdorf, Germany  
[www.cdonline.de](http://www.cdonline.de)

ISSN 1864-6123

Reprint with approval of publisher and with  
reference to source only. Printed on environ-  
ment-friendly, chlorine-free bleached paper. Copyright  
DLR for all imagery, unless otherwise noted.  
Articles marked by name do not necessarily reflect  
the opinion of the editorial staff. Published quar-  
terly, release free of charge.