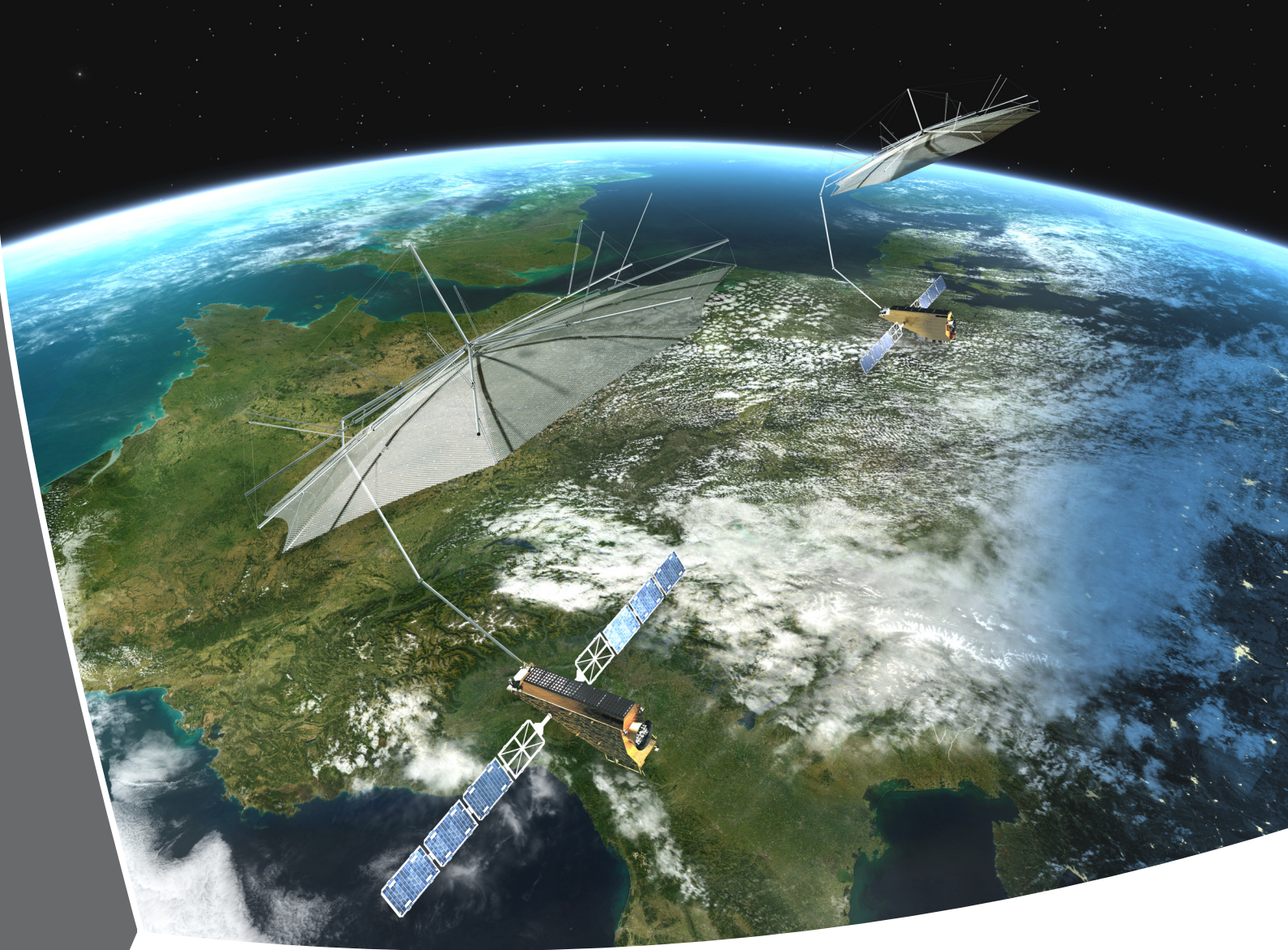




Tandem-L

Vorschlag für eine
Satellitenmission zur Erfassung
von dynamischen Prozessen
auf der Erdoberfläche



Impressum

Herausgeber	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Anschrift	Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme Münchener Str. 20 82234 Weßling
Redaktion	Alberto Moreira Gerhard Krieger
Autoren	Michael Eineder Irena Hajsek Gerhard Krieger Alberto Moreira Kostas Papathanassiou
Satz/Layout	CD Werbeagentur GmbH, Troisdorf
Druck	Digital- & Offsetdruck Wolfertstetter KG, Gilching
Copyright Bilder	Seite 2 und 3: Rosel Eckstein/pixelio.de Seite 9, unten rechts: Ricardo Funari Alle anderen Bilder: DLR, wenn nicht anders angegeben.
Drucklegung	Oberpfaffenhofen, März 2018 Zeitangaben aktualisiert: Januar 2022 Abdruck (auch von Teilen) oder sonstige Verwendung nur nach vorheriger Absprache mit dem DLR gestattet.

DLR.de/HR

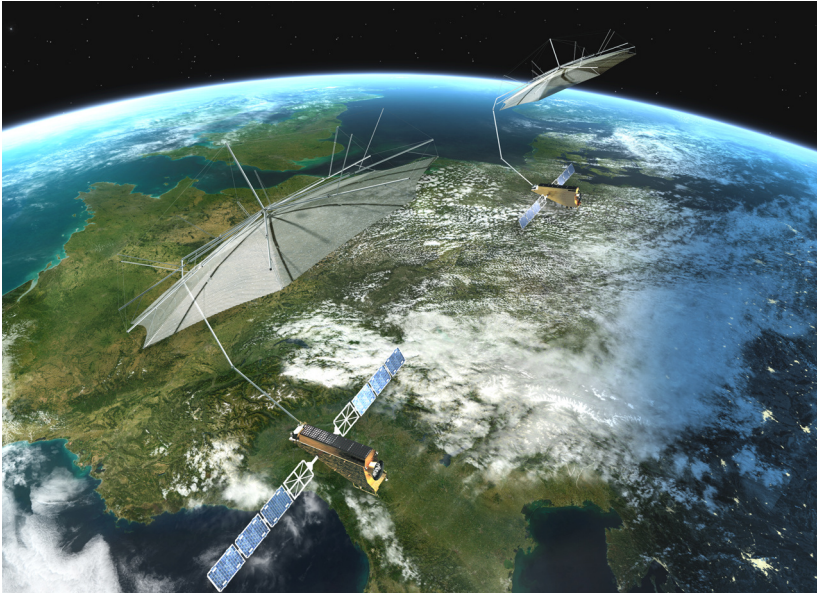


Inhalt

Tandem-L: Eine hochinnovative Radarmission zur Beobachtung von Erde und Umwelt	4
Wissenschaftliche Ziele und Anwendungen	6
Dynamische Prozesse auf der Erde	6
Beitrag zum besseren Verständnis der Klimaänderung	7
Biosphäre	8
Deformation der Erdoberfläche	10
Hydrosphäre	12
Kryosphäre	13
Digitales Höhenmodell	14
Missionskonzept und technische Umsetzung	15
Messprinzip	15
Technologie und Innovationen	18
Implementierung und Zeitplan	20
Überblick und Zusammenfassung	21
Tandem-L-Stichpunkte	21
Datenprodukte und wissenschaftliche Nutzung	22
Alleinstellungsmerkmale von Tandem-L	23
Radar mit Synthetischer Apertur (SAR)	24
Deutsche Spitzenposition in der Radartechnologie	25
Roadmap für die Erdbeobachtung	26
Deutsche Radarmissionen	27



Tandem-L: Eine hochinnovative Radarmission zur Beobachtung von Erde und Umwelt



Tandem-L ist ein Vorschlag für eine hochinnovative Satellitenmission zur globalen Beobachtung von dynamischen Prozessen auf der Erdoberfläche in einer bisher nicht erreichten Qualität und Auflösung. Aufgrund seiner neuartigen Abbildungstechniken und seiner enormen Aufnahmekapazität wird Tandem-L dringend benötigte Informationen zur Lösung hochaktueller wissenschaftlicher Fragestellungen aus den Bereichen der Bio-, Geo-, Kryo- und Hydrosphäre liefern. Tandem-L trägt damit entscheidend zu einem besseren Verständnis des Systems Erde und seiner Dynamik bei.

Wichtige Missionsziele sind:

- die globale Messung der Waldbiomasse und ihrer Dynamik zum besseren Verständnis des Kohlenstoffkreislaufs,
- die systematische Erfassung von Deformationen der Erdoberfläche im Millimeterbereich für Erdbebenforschung und Risikoanalyse,
- die feinskalige Messung der oberflächennahen Bodenfeuchte zur Erforschung des Wasserkreislaufs,
- die Quantifizierung von Gletscherbewegungen und Schmelzprozessen in den Polarregionen für verbesserte Prognosen zum Anstieg des Meeresspiegels.

In Zeiten intensiver wissenschaftlicher und öffentlicher Diskussionen über Ausmaß und Auswirkungen von Klimaänderungen liefert Tandem-L somit wichtige und bis heute fehlende Informationen für verbesserte wissenschaftliche Prognosen und darauf aufbauend gesellschaftspolitische Handlungsempfehlungen.

Das Tandem-L-Missionskonzept nutzt zwei Radarsatelliten im L-Band (24 cm Wellenlänge). Der Einsatz der speziellen Technik des Radars mit synthetischer Apertur (SAR) ermöglicht eine hochauflösende Abbildung unabhängig von Wetter und Tageslicht und bietet damit die optimale Voraussetzung für eine kontinuierliche Beobachtung dynamischer Prozesse auf der Erdoberfläche. Ferner erfüllt die im Vergleich zum X-Band (3,1 cm) große Wellenlänge die Voraussetzungen für die tomografische Erfassung der dreidimensionalen Struktur von Vegetations- und Eisgebieten sowie die großflächige Vermessung von Deformationen mit Millimetergenauigkeit.

Ziel von Tandem-L ist es, die Landmasse der Erde im Wochenrhythmus interferometrisch abzubilden. Der mit Tandem-L aufgenommene Datensatz eröffnet damit über die primären Missionsziele hinaus ein immenses Potenzial für die Entwicklung neuester wissenschaftlicher und kommerzieller Anwendungen.

Neben seiner wissenschaftlichen Komponente zeichnet sich Tandem-L durch seinen hohen Innovationsgrad hinsichtlich Methodik und Technologie aus. Beispiele sind die polarimetrische SAR-Interferometrie zur Messung von Walddhöhen, die Mehrpass-Kohärenztomografie zur Bestimmung der vertikalen Struktur von Vegetation und Eis, die Nutzung neuester Digital-Beamforming-Techniken zur Erhöhung von Streifenbreite und Auflösung sowie der enge Formationsflug von zwei kooperierenden Radarsatelliten mit variabel einstellbaren Abständen.

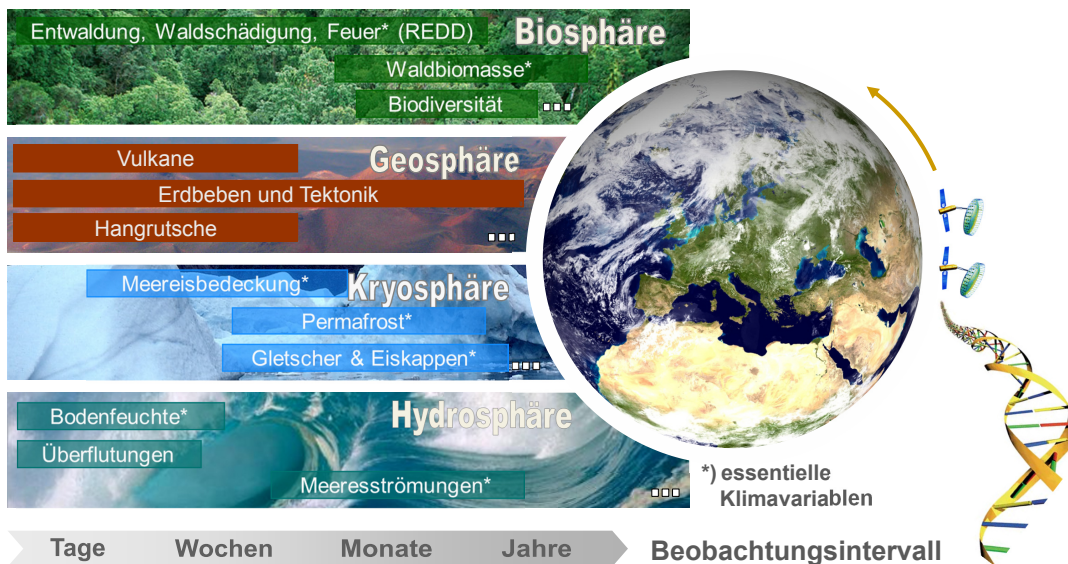
Tandem-L wird die internationale Führungsrolle Deutschlands auf dem Radargebiet nachhaltig festigen und ausbauen. Mit ihren einzigartigen Produkten ist die Mission ein Meilenstein in der Fernerkundung, und die revolutionären Techniken und Technologien, die bei Tandem-L zum Einsatz kommen, bilden die Grundlage für zukünftige Generationen von Satelliten-SAR-Systemen.

Die Tandem-L-Mission öffnet somit die Tür für ein globales Fernerkundungssystem zur kontinuierlichen Beobachtung der Erdoberfläche, wie es für die Wettervorhersage mit einem Netz aus geostationären Satelliten bereits heute existiert.

Das Missionskonzept wurde in einer mehrjährigen Phase-A-Studie im Detail ausgearbeitet. Tandem-L kann entweder im Rahmen einer internationalen Kooperation oder rein national realisiert werden. Mit der Implementierung von Tandem-L entsteht ein weltweit einzigartiges Erdobservatorium, das die Leistungsfähigkeit bestehender Systeme um mindestens eine Größenordnung übertreffen wird. Entsprechend den derzeitigen Planungen könnte ein Start der Tandem-L-Satelliten Ende 2028 erfolgen.

Tandem-L bietet die einmalige Gelegenheit, die vielfältigen Aktivitäten der Helmholtz-Gemeinschaft über die unterschiedlichen Forschungsbereiche hinweg in einem gemeinsamen interdisziplinären Projekt aufs Engste miteinander zu vernetzen.

Die Expertise der jeweils einschlägigen HGF-Forschungszentren mit ihren spezifischen Modellierungserfahrungen ist entscheidend für die Erstellung hoch aggregierter Informationsprodukte. Eine Nutzung der Tandem-L-Daten wird bereits in HGF-Projekten und der HGF-Allianz „Remote Sensing and Earth System Dynamics“ vorbereitet. Zusätzlich bietet die Kooperation mit internationalen Wissenschaftsteams aufgrund der zum Teil komplementären Expertise in der Datennutzung und Modellierung große Synergiepotenziale. Damit ist Tandem-L prädestiniert, einen historischen Meilenstein in der internationalen Erdsystemforschung zu setzen und einen wichtigen Beitrag für das bessere Verständnis und den Erhalt von Erde und Umwelt zu leisten.



Tandem-L ermöglicht die systematische Beobachtung einer Vielzahl dynamischer Prozesse auf der Erdoberfläche. Durch Nutzung neuester Radartechniken können die hohen wissenschaftlichen Anforderungen an Beobachtungsfrequenz, Auflösung und Datenqualität in optimaler Weise erfüllt werden.

Wissenschaftliche Ziele und Anwendungen

Dynamische Prozesse auf der Erde



Das System Erde besteht aus einer Vielzahl von Komponenten und Prozessen, die durch komplexe Wechselwirkungen miteinander verkoppelt sind. Beispielsweise können Veränderungen in Biosphäre, Geo-/Lithosphäre, Hydrosphäre und Kryosphäre nicht nur das dynamische Gleichgewicht untereinander, sondern auch Physik und Chemie der Atmosphäre nachhaltig beeinflussen. Veränderungen in der Atmosphäre wirken sich wiederum auf Wetter und Klima aus und nehmen ihrerseits Einfluss auf eine Fülle von Prozessen in der Bio-, Geo-, Hydro- und Kryosphäre.

Viele dieser komplexen Wechselwirkungen sind derzeit nicht oder nur äußerst unzureichend erforscht und verstanden. Ein wichtiger Grund hierfür ist, dass in der Regel Prozesse aus mehreren Erdsphären auf unterschiedlichsten räumlichen und zeitlichen Skalen miteinander verkoppelt sind, geeignete Beobachtungsdaten zur Analyse dieser vielfältigen Wechselwirkungen häufig jedoch entweder überhaupt nicht oder lokal und zeitlich nur sehr begrenzt zur Verfügung stehen.

Die Erfassung dynamischer Prozesse bedarf einer kontinuierlichen, langfristig angelegten und systematisch geplanten Aufnahmestrategie, um Veränderungen rechtzeitig zu erkennen und diese mit ausreichender Genauigkeit zu quantifizieren. Abhängig von den zu erfassenden Phänomenen müssen Veränderungen auf unterschiedlichsten Raum- und Zeitskalen betrachtet und miteinander in



Mit Hilfe der modernen Radartechnologie können Veränderungen auf der Erdoberfläche unabhängig von Wetter und Tageslicht systematisch erfasst werden. Die drei vollpolarimetrischen Radarbilder dokumentieren die starken jahreszeitlichen Veränderungen von landwirtschaftlich genutzten Flächen (kleinräumige Ausschnitte von jeweils 3 km x 6 km).

Beziehung gesetzt werden. Dies erfordert wiederum ein breites Spektrum an Beobachtungsintervallen. Mit der Einführung der satellitengestützten Erdbeobachtung haben in den letzten Jahrzehnten Kenntnis und Verständnis von Veränderungen im System Erde deutlich zugenommen. Jedoch reichen Abbildungsleistung, Messgenauigkeit und Aufnahmekapazität bestehender Systeme in vielen Fällen nicht aus, um verlässliche Aussagen über die Dynamik großräumiger Prozesse abzuleiten.

Eine wesentliche Anforderung an die Tandem-L-Mission ist daher die Fähigkeit, große Flächen regelmäßig in möglichst kurzen Zeitintervallen und mit hoher räumlicher Auflösung abzubilden. In Verbindung mit einer systematisch geplanten Aufnahmestrategie ermöglicht diese die Erstellung konsistenter Zeitreihen für die gesamte Erde. Nur so kann die Dynamik der vielfältigen Veränderungen auf der Erdoberfläche mit ausreichender Genauigkeit und ohne Fehler durch eine zu geringe Abtastrate erfasst werden. Die Kombination aus kurzen Wiederholzyklen und mehrjähriger Datenaufzeichnung ermöglicht es, sowohl schnelle, hochdynamische Vorgänge, wie z. B. Relaxationsprozesse nach Erdbeben, als auch langsame ablaufende Prozesse, wie z. B. Veränderungen der Waldbiomasse, in der geforderten Präzision und Auflösung zu erfassen.

Eine wesentliche wissenschaftliche Zielsetzung von Tandem-L ist es, global und systematisch dynamische Prozesse auf der Erdoberfläche im jahreszeitlichen und jährlichen Verlauf quantitativ zu erfassen.

Beitrag zum besseren Verständnis der Klimaänderung

Tandem-L wird maßgeblich zum besseren Verständnis von Prozessen beitragen, die heute als Treiber der lokalen und globalen Klimaänderung gesehen werden.

Kohlenstoffkreislauf

Der anthropogen bedingte Anstieg der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre und der damit verbundene Klimawandel machen den Kohlenstoffkreislauf heute zu einem zentralen Schwerpunkt in der Klimaforschung. Neben der Atmosphäre sind die Ozeane und die terrestrische Biosphäre die wichtigsten Kohlenstoffspeicher, die mit der Atmosphäre in einem aktiven Austausch stehen. Der Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentration kann nur teilweise durch die Aufnahme von CO_2 in der Biosphäre und den Ozeanen kompensiert werden.

Wälder speichern etwa die Hälfte des terrestrisch gebundenen Kohlenstoffs. Während ihres Wachstums reichern Wälder Biomasse an und fungieren dabei als CO_2 -Senken. Tropische Wälder können etwa 50% mehr Kohlenstoff als Wälder außerhalb der Tropen speichern. Bei der Rodung und Zerstörung von Wald kann der gebundene Kohlenstoff in die Atmosphäre freigesetzt werden. Die aus dem globalen Waldverlust resultierenden Emissionen sind die zweitgrößte anthropogene Quelle von CO_2 . Die Unsicherheiten der Kohlenstoffflüsse zwischen Land und Atmosphäre sind im Vergleich zu den anderen Komponenten des Kohlenstoffkreislaufs sehr groß. Die Gründe dafür sind die lückenhafte Erfassung der entwaldeten Fläche und das ungenaue Wissen über die Biomasse in den gerodeten und gestörten Regionen.

Tandem-L wird erstmalig die globale Waldbiomasse sowie deren saisonale und jährliche Veränderung mit einer noch nie dagewesenen Genauigkeit messen. Dies ist ein Schlüsselbeitrag, um die Unsicherheiten in den terrestrischen Komponenten des Kohlenstoffkreislaufs drastisch zu reduzieren.

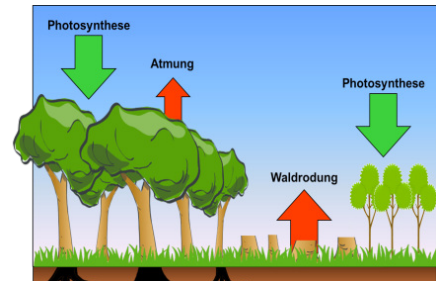
Wasserkreislauf

Der Wasseraustausch zwischen Land, Ozean und Atmosphäre ist unter den maßgeblichen Faktoren, die Wetter und Klima bestimmen. Auch wenn der ultimative Beweis noch aussteht, wächst der wissenschaftliche Konsens, dass der anthropogene Klimawandel eine Veränderung des Wasserkreislaufs und der Wasserverfügbarkeit bewirken wird. Wasserkreislauf und Klima stehen in einer engen Beziehung und beeinflussen sich gegenseitig, sodass die Genauigkeit regionaler und globaler Klimaprognosen stark von den Unsicherheiten der Veränderungen im Wasserkreislauf abhängt.

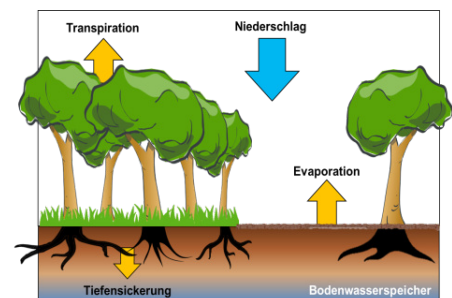
In Klimamodellen ist die Bodenfeuchte ein zentraler Parameter für die Charakterisierung der Landoberfläche, da sie Wärme und Wassertransport zwischen Landoberfläche und Atmosphäre unmittelbar beeinflusst. Schon geringe Wassergehaltsänderungen haben starken Einfluss auf die thermischen Eigenschaften des Bodens. Aufgrund der hohen zeitlichen und räumlichen Variabilität ist derzeit eine Erfassung der Bodenfeuchte und ihrer Dynamik praktisch nicht möglich.

Veränderungen im Wasserkreislauf, wie das beschleunigte Abschmelzen von Schnee, Eis und Gletschern, die als natürliche Wasserspeicher fungieren, sowie mehr Regen und weniger Schneefall bei steigenden Temperaturen, kann man heute schon beobachten. Oft kann es dabei zu positiver Rückkopplung kommen: Weniger Schnee und verlängerte Tauperioden können zu einer zusätzlichen Erhöhung der Temperatur führen.

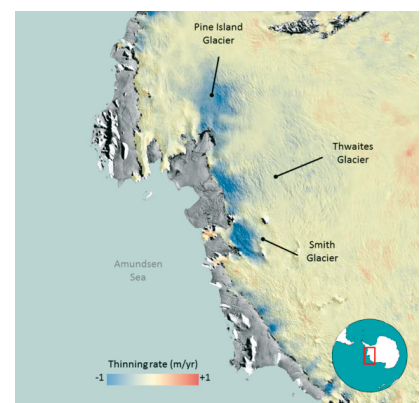
Tandem-L wird erstmals kritische Komponenten des Wasserkreislaufs wie Bodenfeuchte und Dynamik von Fließ- und Schmelzprozessen in der Kryosphäre global, mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung erfassen.



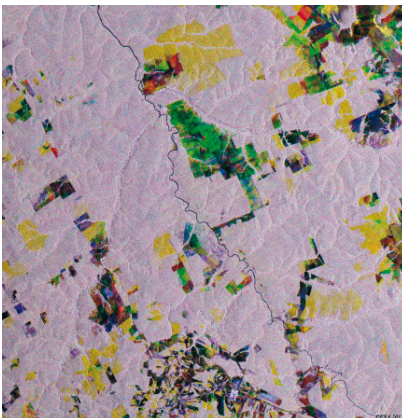
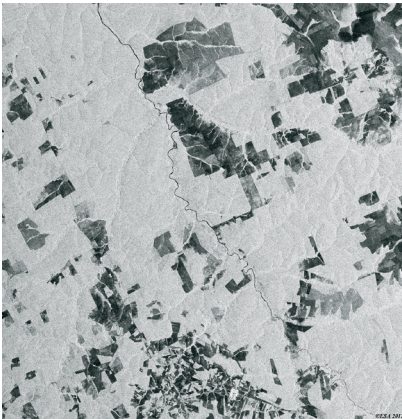
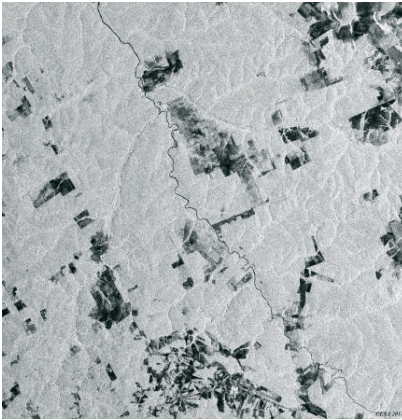
Die heute nur sehr ungenau bekannten terrestrischen Komponenten des Kohlenstoffkreislaufs stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Zustand des globalen Waldes.



Der Feuchtigkeitsgehalt des Bodens regelt wichtige Komponenten des lokalen Wasserkreislaufs.



Seit 2002 verlor der west-antarktische Eisschild jährlich rund 150 Kubikkilometer Eis. Die Abbildung zeigt Änderungen der Eishöhe, die vom ESA-Altimeter CryoSat gemessen wurden. Tandem-L wird eine kontinuierliche Beobachtung der Eisschilde mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung erlauben.



ERS-Aufnahmen über Mato Grosso, Brasilien

Oben: 07. Juni 1992

Mitte: 08. September 1999

Unten: RGB Komposition:

08. September 1999

27. Juni 1993

07. Juni 1992

Biosphäre

Wälder sind als wichtigstes terrestrisches Ökosystem ein integraler Bestandteil des Erdsystems. Sie sind Lebensraum und/oder Lebensgrundlage für fast ein Viertel der Weltbevölkerung. Gleichzeitig sind Wälder (speziell tropische) die artenreichsten Lebensräume unseres Planeten: Zwei Drittel aller Tier- und Pflanzenarten leben im Wald.

Der Wald als Rohstoffquelle hat eine hohe wirtschaftliche Bedeutung und ist eine der wichtigsten natürlichen Ressourcen. Wälder produzieren Sauerstoff und speichern Kohlendioxid und Wasser. Dadurch regulieren sie die biochemischen Kreisläufe zwischen der Bio- und der Atmosphäre und beeinflussen das lokale und globale Klima. Sie bewahren den Boden vor Erosion und schützen vor Überschwemmungen.

Trotz ihrer Bedeutung stehen Wälder heute, mehr als je zuvor, unter dem Druck einer wachsenden Erdbevölkerung und klimatischer Schwankungen. Der Mensch hat bereits mehr als die Hälfte der Wälder vernichtet. Ein großer Teil der noch verbliebenen Wälder ist gestört. Nur ein Drittel der globalen Waldfläche besteht heute noch aus Urwäldern, und ein großer Teil davon gilt als ernsthaft bedroht. Angetrieben durch die Expansion der Landwirtschaft und die steigende Holznutzung werden jedes Jahr weitere 10 -15 Millionen Hektar Wald durch Umwandlung in Agrarland, Brandrodung oder illegalen Holzeinschlag zerstört.

Diese Zerstörung vernichtet nicht nur wichtige Ressourcen und den Lebensraum vieler Pflanzen und Tiere, sondern kann auch eine große Menge an CO₂ freisetzen.

Die weltweit einheitliche Erfassung des aktuellen Zustands der Wälder und deren – anthropogen wie auch klimatisch bedingter – Entwicklungsdynamik wird somit zu einer dringlichen Notwendigkeit.

Waldbiomasse

Die Bedeutung der Biomasse manifestiert sich sowohl durch den direkten Zusammenhang zwischen Biomasse und Kohlenstoffgehalt wie auch durch ihre Relevanz zur Charakterisierung von Wald- bzw. Ökosystem-Produktivität. Biomasse wurde durch die UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) als essenzielle Klimavariablen identifiziert, deren Erfassung heute von großer Bedeutung ist. In der kommerziellen Waldbewirtschaftung gibt Waldbiomasse die Menge des nutzbaren Holzes wieder – eine Information, die für eine nachhaltige Bewirtschaftung von Wäldern unabdingbar ist.

Schätzungen der Biomasse sind heute in lokalen, regionalen und überregionalen Maßstäben sehr ungenau. Bodenmessungen der Biomasse in natürlichen Wäldern weisen oft Fehler von weit über 20% auf. Besonders in tropischen Waldökosystemen gibt es große Abweichungen. Globalen und nationalen Schätzungen von Waldbiomasse fehlt meistens der räumliche Bezug, da sie durch die Generalisierung von Waldinventurdaten entstehen. Zudem beruhen diese Angaben auf unterschiedlichen Definitionen und Bestimmungsmethoden. Der Mangel an genauen räumlichen Waldbiomasse-Daten wurde vom Weltklimarat IPCC als eine der größten Unsicherheiten im globalen Kohlenstoff-Budget erkannt.

Dynamische Veränderungen der Biomasse und ihre räumliche Verteilung sind ein direktes Maß für den Austausch von Kohlenstoff zwischen dem terrestrischen Ökosystem und der Atmosphäre. Gleichzeitig charakterisieren sie auch Veränderungen in Waldwachstum und Produktivität, induziert durch Wasser- und/oder Klimastress.

Tandem-L wird eine globale Inventur der Biomasse mit einer Genauigkeit von 20% ermöglichen sowie deren saisonale Variabilität und jährliche Veränderung messen.

Wald-Degradierung

Selektiver Holzeinschlag, Feuer, zunehmende Umwandlung von Natur- in Plantagenwälder und die strukturelle Störung des Waldes wie z. B. das Entfernen von Bäumen unter einem geschlossenen Kronendach sind ein erheblicher Störfaktor wichtiger Waldfunktionen, ohne dass es dabei zu einer Reduzierung der Waldfläche kommt. Diese Abnahme in der Qualität des Waldes wird als Wald-Degradierung bezeichnet und führt sowohl zu Kohlenstoffemission wie auch zu einem – zum Teil dramatischen – Verlust an biologischer Vielfalt.

Mit den heute vorhandenen Fernerkundungssystemen ist eine vollständige Erfassung von gestörten und degradierten Wäldern nicht möglich. Die genaue Dimension der globalen Waldstörungen und ihrer ökologischen Auswirkungen bleiben somit unbekannt.

Ein wichtiger und einzigartiger Beitrag von Tandem-L liegt in der Kartierung der Komplexität und Vielfalt von vertikalen Waldstrukturen – sowie deren Veränderungen.

Damit können das Störungsausmaß und der Störungsgrad von Wäldern global bestimmt sowie deren jährliche Veränderungen dokumentiert werden.

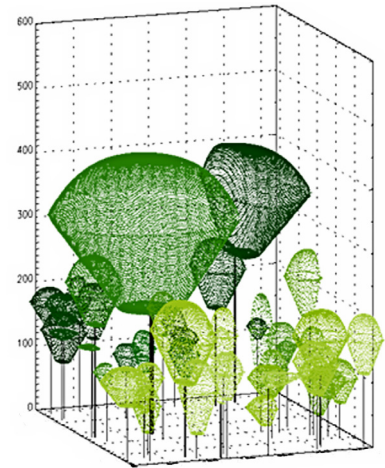
REDD+

Die Relevanz der Wälder für das globale Klima führte 2007 zur Aufnahme eines Waldschutzmechanismus innerhalb eines UN-Klimanachfolgeabkommens. Dieser Mechanismus ist bekannt als REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation). REDD+ schafft einen völkerrechtlichen Rahmen, in dem Schwellen- und Entwicklungsländer vor allem in den Tropen beim Schutz ihrer

Wälder durch die internationale Staatengemeinschaft unterstützt werden. REDD+ hat das Potenzial, ein zentrales Instrument zu werden, um Waldzerstörung im großen Maßstab zu stoppen.

Eine genaue und transparente Erfassung der Emissionen aus Entwaldung, Störung und Degradierung von Wäldern ist Voraussetzung für den langfristigen Erfolg von REDD+. Nur ein Überwachungssystem, das auf global verfügbaren Fernerkundungsdaten aufbaut, kann flächendeckend aussagekräftige Daten als Informationsgrundlage liefern.

Tandem-L wird Fernerkundungsmethoden und -technologien demonstrieren, die als Kontrollsysteme zur Durchsetzung und zur Erfolgsmessung von politischen Umwelt-Maßnahmen nötig sind.



3D-Darstellung eines primären tropischen Waldes mit natürlicher Struktur am Beispiel eines Dipterocarpaceen-Waldes auf Borneo/Indonesien. Die vertikale Struktur im Wald wird durch Tandem-L global vermessen werden.



Am meisten sind heute tropische Regenwälder bedroht, die von besonderer Bedeutung sind. Sie spielen eine zentrale Rolle im terrestrischen Kohlenstoffkreislauf, beeinflussen den regionalen Wasserhaushalt und sind wichtige Hotspots der Artenvielfalt.

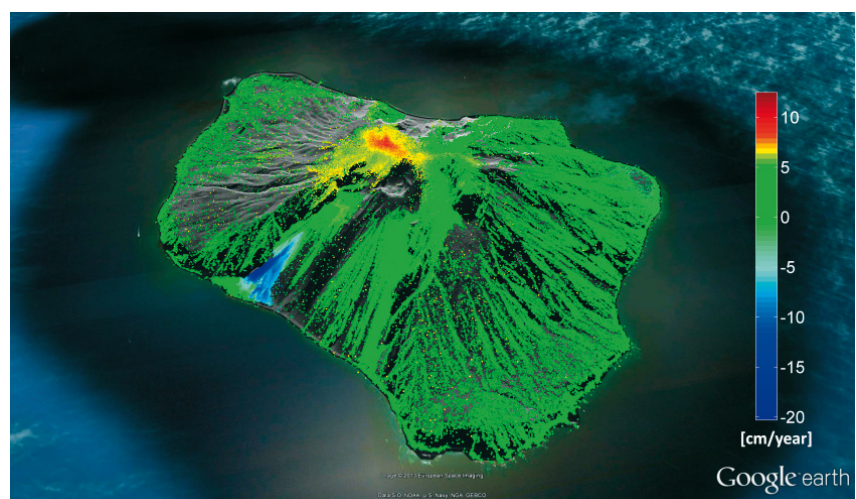
Deformation der Erdoberfläche

Die Topografie der festen Erde ist in steter Veränderung durch Plattentektonik und kleinräumige magmatische, klimatische und anthropogen verursachte Prozesse. Die Folge sind Erdbeben, Vulkanausbrüche, Hangrutschungen oder Bodensenkungen. Erdbeben gehören zu den fatalsten und teuersten Georisiken, die nach Schätzung der Versicherung „Münchner Rück“ allein zwischen 1994 und 2012 über 540 Milliarden US-Dollar gekostet haben.

Selbst wenn wir Erdbeben und Vulkanausbrüche bis heute noch nicht exakt vorhersagen können, so ist das Verständnis der geologischen Prozesse in den letzten Jahren stark gewachsen, nicht zuletzt durch aktuelle Technologien wie seismische Arrays, GPS, differenzielle Radarinterferometrie (D-InSAR) und Very Long Baseline Interferometry (VLBI), aber auch durch genauere numerische Modellierung. Durch die verbesserten Sensoren und Methoden können mittlerweile Netzwerke von deutschen Seismografen z. B. einen Erdbebenherd vor der Küste Sumatras auf ca. 100 km präzise orten und mittels grobmaschig verteilter GPS-Systeme und VLBI die globale Tektonik millimetergenau vermessen.

Mit Tandem-L sollen diese grobmaschigen und unregelmäßigen GPS-Daten durch hochauflösende Deformationskarten ergänzt werden. Diese Karten werden zum einen die inter- und koseismischen Veränderungen von Risikogebieten wie Bruchzonen, zum anderen die magmatischen Prozesse der Vulkane weltweit periodisch und systematisch erfassen – und das wesentlich genauer, als es mit GPS jemals möglich wäre. Dies lässt Verbesserungen der zu beschreibenden Modelle erwarten, die zu einer genaueren Prognose von Ort und Zeit zukünftiger tektonischer und vulkanischer Ereignisse führen.

Zusätzlich lassen sich im Tandem-L-Deformationsmodus kleinräumige Ereignisse wie instabile Hänge und Erdrutsche oder Bergstürze mit einer Genauigkeit von Zentimetern bis hin zu Millimetern erfassen, die zum Beispiel durch Klimaänderungen, wie das Auftauen des Permafrostbodens, verursacht werden. Ebenso können anthropogen verursachte Prozesse wie Erdsenkungen durch Grundwasserentzug oder Bergbau gemessen werden. Gute Ergebnisse erzielte man mit bisherigen Satellitensystemen allerdings nur für städtische Gebiete.



Deformation des Vulkans Stromboli in Italien in cm/Jahr. Die gemeinsame Verwendung von Punktreuern und Flächenstreuern ergibt eine besonders hohe Informationsdichte.

Probleme bisheriger Systeme und neue Lösungen

Erste Radarmessungen im Deformationsmodus wurden mit den ESA-Satelliten ERS-1, ERS-2 und ENVISAT durchgeführt. Mittlerweile werden diese Messreihen mit den Sentinel-1-Satelliten im Copernicus-Programm fortgeführt.

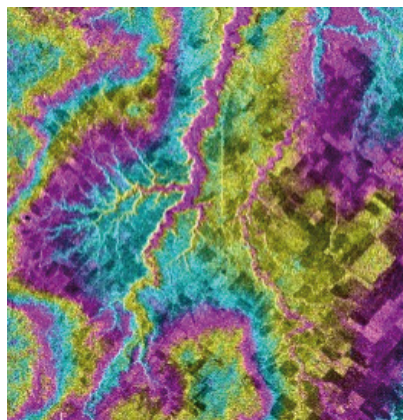
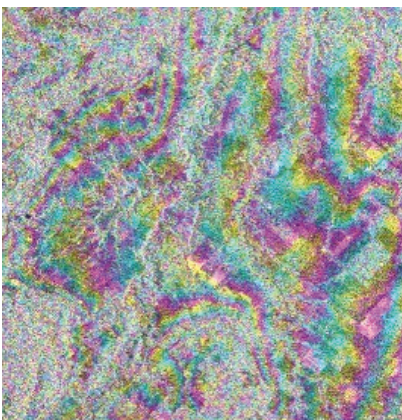
Die kurze Wellenlänge von 5,6 cm (C-Band) verursacht die sogenannte zeitliche Dekorrelation. C-Band-Mikrowellen werden bereits von den oberen Schichten der Vegetation reflektiert. Zufällige und vergleichsweise schnelle Bewegungen der Blätter und kleiner Äste in einem Wald führen zu starker Dekorrelation und verdecken die Messung der langsameren Bodenbewegung. In ähnlicher Weise führen Veränderungen der Oberflächenstruktur (z. B. durch Boden-erosion) im Sub-Wellenlängenbereich zwischen den einzelnen Aufnahmen zu einer Störung des Phasensignals bis hin zu dessen vollständiger Auslöschung.

Die bisher publizierten D-InSAR-Beispiele stellen eine beeindruckende, aber reine Positivauswahl der Analysen dar. Die nicht gelungenen Anwendungen werden selten veröffentlicht und sind meist nur den Experten bekannt. Tandem-L ist weit weniger empfindlich gegenüber Veränderungen der Oberflächenstruktur. Damit sind Bewegungsmessungen der Erdoberfläche möglich – und dies über sehr lange Zeiträume.

Der lange Wiederholzyklus und/oder die kürzere Wellenlänge bisheriger Systeme sind nicht geeignet, Veränderungen mit hoher Genauigkeit zu erfassen. Durch die höhere Streifenbreite (bis zu 350 Kilometer) von Tandem-L kann der Wiederholzyklus auf 8 Tage reduziert werden. Große Streifenbreite und Wellenlänge sind Voraussetzung zur Erfassung schneller Bewegungen und zur Erkennung bevorstehender Gefährdungen. In Kombination mit geophysikalischen Modellen soll damit auch die Vorhersagbarkeit dieser Ereignisse wesentlich verbessert werden.

Bisherige Systeme messen nur eine Komponente des dreidimensionalen Bewegungsvektors. Tandem-L wird durch die Kombination unterschiedlicher Beobachtungsgeometrien die Rekonstruktion dreidimensionaler Bewegungsvektoren ermöglichen. Diese sind besonders für die Auswahl des passenden Modells bei Erdbeben und für quantitative Analysen erforderlich. Mit den Missionsszenarien der bisherigen Satelliten war eine örtlich und zeitlich systematische Erfassung von Gefährdungsgebieten nicht möglich. Das Tandem-L-Missionskonzept wird dies erstmals erlauben.

Mit den oben genannten Verbesserungen wird Tandem-L das erste kompromisslos für den Deformations-Modus optimierte System sein und ähnlich wie SRTM und TanDEM-X einen weiteren Meilenstein in der Geschichte der Radarerderkundung darstellen.

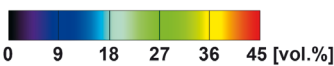
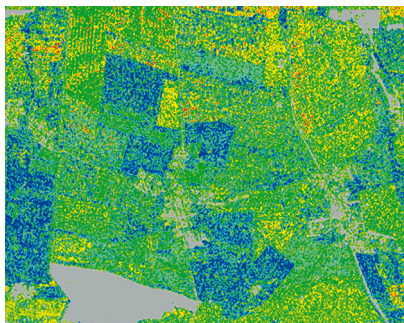


Phasen-Interferogramme der SIR-C/X-SAR-Mission 1994. Bereits nach einem Tag zeigt das C-Band-Interferogramm (links) starke Dekorrelation (Phasenrauschen) in Bereichen mit dichter Vegetation, während das L-Band-Interferogramm (rechts) eine gute und gleichmäßige Qualität aufweist.

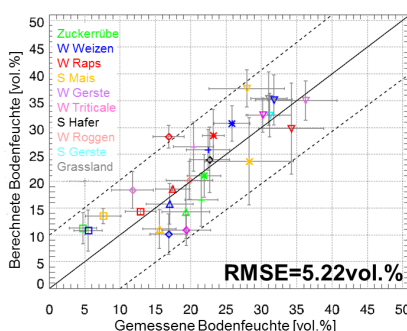
Hydrosphäre



SAR-Bild im L-Band



Oberflächennahe Bodenfeuchte
über landwirtschaftlichen Flächen
in Norddeutschland



Validierung für verschiedene Bewuchsarten

Die Hydrosphäre umfasst die ober- und unterirdischen Wasservorkommen der Erde. Vom Weltraum aus gesehen ist die Erde ein blauer Planet, der den großen Anteil der Wasserflächen widerspiegelt: drei Viertel der Erdoberfläche sind mit Wasser bedeckt.

Aufgrund von Klimawandel und anthropogenem Einfluss verändern sich die hydrologischen Bedingungen in immer stärkerem Ausmaß. Dies hat weitreichende Konsequenzen, die von veränderten Energieflüssen bis hin zur verminderten Wasserqualität und -verfügbarkeit reichen. Erstere können wiederum das globale, regionale und lokale Klima beeinflussen, während Letztere essenzielle Grundvoraussetzungen für die Befriedigung menschlicher Grundbedürfnisse sowie für eine nachhaltige ökologische Entwicklung sind. Studien zum Klimawandel sagen einen Anstieg der globalen Lufttemperatur für die nächsten Jahrzehnte voraus. Dies wird eine erhöhte Variabilität der Niederschlagsmuster nach sich ziehen. Zudem wird eine Zunahme der Auftretshäufigkeit und der Intensität hydrologischer Extrema, wie Überschwemmungen und Dürren, erwartet. Die Fähigkeit, solche Veränderungen und ihre Auswirkungen auf den Wasserkreislauf zu modellieren und vorherzusagen, ist von großer Bedeutung für die Entwicklung entsprechender Vermeidungs- und Anpassungsstrategien, mit denen potenziell negative Auswirkungen auf Gesellschaft und Wirtschaft reduziert werden können.

Um den Einfluss des Menschen und des Klimawandels auf die Hydrosphäre besser zu verstehen, ist es notwendig, hydrologische Schlüsselprozesse und deren räumliche und zeitliche Muster mit hinreichender Genauigkeit zu kennen. Ein wesentlicher Faktor ist hierbei die Bodenfeuchte, da sie sowohl die Wasser- als auch die Energieflüsse an der Grenzschicht zwischen Landoberfläche und Atmosphäre bestimmt. Die hinreichende Kenntnis der räumlichen Verteilung sowie der zeitlichen Entwicklung der Bodenfeuchte ist grundlegend für die Verbesserung von Modellvorhersagen. Zur Verdunstung von Wasser bedarf

es großer Mengen an Energie. Daher ist oberflächennahe Bodenfeuchte ein Schlüsselparameter zum Austausch von Wasser und Energie zwischen Boden und Atmosphäre. Folglich beeinflussen räumliche und zeitliche Schwankungen der Bodenfeuchte innerhalb der ungesättigten Zone Wetter und Klima von der lokalen bis zur regionalen Skala. Die Simulation des Einflusses von Treibhausgasen auf den Wasserkreislauf und die energetischen Prozesse mit gegenwärtigen Klimamodellen wird von der großen Unsicherheit in der Vorhersage der oberflächennahen Bodenfeuchtevariation beeinträchtigt. Die Tatsache, dass Bodenfeuchteänderungen von der Zusammensetzung des Bodens, der Vegetationsbedeckung sowie von der Veränderung des Niederschlags und der Verdunstung (welche wiederum von der Vegetation beeinflusst werden) abhängen, stellt die Modellierung, aber auch die Extrapolation/Interpolation von Messungen in Frage. Eine zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Bestimmung von Grad, Verteilung und Schwankung der Bodenfeuchte kann hydrologische Flusseinzugsmodelle, Wettervorhersagemodelle und jahreszeitenabhängige Klimamodelle erheblich verbessern.

Zur Nachführung von Modellvorhersagen wurden in der letzten Dekade Messungen der Bodenfeuchte aus Fernerkundungsdaten in Datenassimilationsverfahren genutzt. Obwohl hierbei das große Potenzial der Fernerkundung erkannt und demonstriert wurde, gibt es bislang keinen interferometrischen Sensor, der die Erdoberfläche großflächig mit ausreichender zeitlicher und räumlicher Auflösung erfassen kann. Zwar liefern Missionen wie SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), SMAP und GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) wichtige Einblicke in den globalen Wasserkreislauf, jedoch ist ihre räumliche Auflösung mit weit über 10 bzw. 100 km für eine Vielzahl von Anwendungen nicht ausreichend.

Mit Tandem-L wird es erstmals möglich sein, die Bodenfeuchte über großen Gebieten mit einer Auflösung von unter 50 m und in kurzen zeitlichen Abständen zu messen.

Kryosphäre

Die Schnee- und Eismassen der Erde bilden die Kryosphäre und spielen aufgrund von Rückkoppelungsmechanismen mit der Atmosphäre und den Ozeanen eine wichtige Rolle im Klimasystem der Erde.

Diese Mechanismen haben die Tendenz, Klimaänderungen zu verstärken. Allerdings sind die Prozesse, die Dynamik und Massenbilanz der einzelnen Komponenten der Kryosphäre regulieren, noch nicht ausreichend bekannt. Aus diesem Grund ist die Ankopplung kryosphärischer Prozesse ein Schwachpunkt der jetzigen Klimamodelle und damit auch einer der wesentlichen Gründe für die Unsicherheit von Klimaprognosen und Klimaszenarien. Man erwartet von besseren und systematischen Beobachtungsdaten große Fortschritte für die Modellierung des Erdsystems unter Einbeziehung der Kryosphäre.

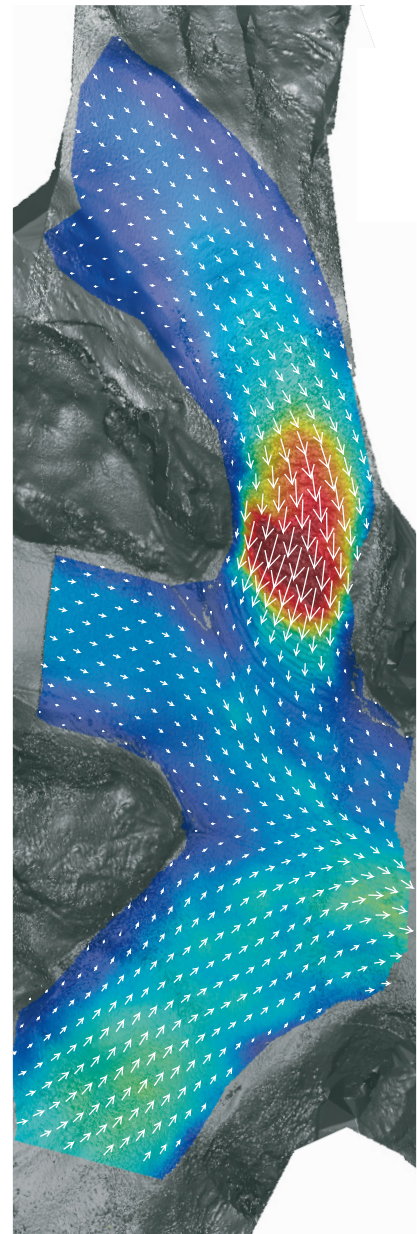
Die Bedeutung von Satellitenmessungen für diese Aufgabe wird im IGOS Cryosphere Theme Report des Weltklimaforschungsprogramms betont. Neben dem Einfluss auf Atmosphäre und Ozean wirken sich klimabedingte Änderungen der Kryosphäre unmittelbar auf Umwelt, Ökologie und wirtschaftliche Aktivitäten aus. Schwindende Wasservorräte durch Rückzug von Winterschnee und Gletschern beeinträchtigen Wasserversorgung, Landwirtschaft und Biodiversität. Der Anstieg des Meeresspiegels durch Abschmelzen von Gletschern und polaren Eismassen bedroht Küstenregionen weltweit. Das Abschmelzen der arktischen Meereisdecke, das wesentlich schneller vor sich geht als prognostiziert, schafft neue geopolitische und ökologische Voraussetzungen in den hohen Breiten der nördlichen Hemisphäre.

Satellitensensoren stellen die wichtigste Grundlage für umfassende, konsistente und globale Beobachtungen der Schnee- und Eisvorräte dar. Satellitenmessungen liefern umfassende Daten, auf denen heutige Kenntnisse der verschiedenen

Komponenten der Kryosphäre beruhen. Dennoch gibt es zahlreiche offene Fragen zur Massenbilanz und Dynamik von Schnee und Eis und zu den Wechselwirkungen der Kryosphäre mit der Atmosphäre und den Ozeanen. Auf dem Gebiet der Kryosphäre wird die Klärung folgender wissenschaftlicher Fragen als vorrangig angesehen:

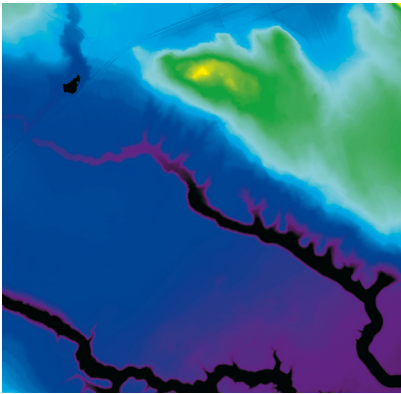
1. Welche Beiträge leisten Gletscher, Eiskappen und polare Eisschilde zum Anstieg des Meeresspiegels und in welcher Art werden Klimaänderungen deren Massenbilanz und Dynamik beeinflussen?
2. Wie sehen die regionalen Verteilungen von Ausdehnung und Eigenschaften des Meereises aus und wie reagieren sie auf Klimaänderungen?
3. Wie beeinflussen Änderungen der Schnee- und Eismassen die Zirkulation der Atmosphäre und Ozeane?
4. Welche räumliche und zeitliche Änderungen der Schnee- und Eisvorräte sind in den kommenden Jahrzehnten auf den Landoberflächen zu erwarten und wie werden diese Änderungen den Wasserhaushalt, die Ökologie und Biodiversität beeinflussen?
5. Können Änderungen in der Kryosphäre abrupte oder kritische Änderungen des globalen Klimasystems auslösen?

Tandem-L wird essenzielle Informationen zu Eisbewegungen und Topografie und damit zu Eismassenbilanzen liefern.

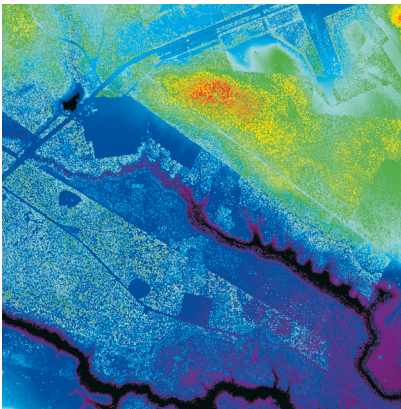


Messung von Gletschergeschwindigkeiten am Beispiel des Aletsch-Gletschers. Die Informationen wurden aus flugzeuggetragenen L-Band-Daten extrahiert.

Digitales Höhenmodell



Digitales Geländemodell (L-Band-DEM)



Digitales Oberflächenmodell (X-Band-DEM)

Für Teile der Erde existieren derzeit nur grobe, uneinheitliche oder lückenhafte Höhenmodelle, die aus einer Vielzahl unterschiedlicher Datenquellen zusammengesetzt sind und mit unterschiedlichen Erhebungsmethoden gewonnen wurden. TanDEM-X schließt diese Lücken und liefert seit 2014 erste digitale Geländemodelle für ein weltweit homogenes Höhenmodell als unentbehrliche Grundlage für viele wissenschaftliche und kommerzielle Anwendungen.

Das TanDEM-X-DEM ist mit einer räumlichen Auflösung von 12 m x 12 m und einer relativen vertikalen Genauigkeit von 2 m spezifiziert und ist seit Ende 2016 vollständig verfügbar. TanDEM-X nutzt zur Datenakquisition ein interferometrisches Radarsystem im X-Band, das aufgrund der kurzen Wellenlänge von 3,1 cm nur zu einem geringen Teil in die Vegetation eindringt. Damit liefert die TanDEM-X-Mission in erster Näherung ein digitales Höhenmodell, das die Erdoberfläche und damit die Oberfläche von stark bewachsenen Flächen (z. B. Wald) und Oberflächen von urbanen Gebieten (Hausoberflächen) erfasst. Im Gegensatz dazu beschreibt ein digitales Geländemodell die topografische Variation unter der bewachsenen Fläche.

Tandem-L mit einer Wellenlänge von 24 cm durchdringt die Vegetation und kann mit Hilfe der polarimetrischen SAR-Interferometrie sowohl die Oberflächen-topografie als auch die Topografie unter der Vegetation bestimmen. Damit wird Tandem-L, komplementär zu TanDEM-X, zusätzlich dringend benötigte Informationen über die Topografie der Erdoberfläche liefern.

Mit einem voraussichtlichen Start von Tandem-L im Jahre 2028 könnten 2029 erste digitale Gelände- und Oberflächenmodelle zur Verfügung stehen. Diese wären damit eine ideale Ergänzung zum Oberflächenmodell der TanDEM-X-Mission. Über die Missionszeit von Tandem-L ist es darüber hinaus mög-

lich, regelmäßig Updates des Gelände- und Oberflächenmodells zu erstellen.

Hinzu kommt, dass im X-Band ein Einfluss der Vegetation auf das digitale Oberflächenmodell zu beobachten ist. Aus vorherigen Untersuchungen zum X-Band-DEM, generiert von der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), ist bekannt, dass das digitale Oberflächenmodell nicht die oberste Waldhöhe darstellt, sondern durch die Eindringung in den Wald ca. 10% bis 20% tiefer liegt (abhängig von der Dichte des Waldes).

Dieses Problem ist auch bei dicht bewachsenen landwirtschaftlichen Anbauarten zu beobachten. TanDEM-X hat in den ersten zwei Missionsphasen die gesamte Erde zwar zweimal mit unterschiedlichen Basislinien, aber jedes Gebiet zur gleichen Jahreszeit abgebildet. Damit war es nicht möglich, über landwirtschaftlichen Flächen einmal ein digitales Oberflächenmodell mit Vegetation und einmal ohne Vegetationsbewuchs aufzunehmen. Tandem-L hat diese Einschränkungen nicht, da es mit seiner Eindringfähigkeit und dem Konzept zur multitemporalen Aufnahme die Effekte ausgleichen kann. Digitale Geländemodelle haben eine grundlegende Bedeutung für ein breites Spektrum von kommerziellen und wissenschaftlichen Anwendungen (geowissenschaftliche Forschungsgebiete, Hydrologie, Glazilogie, Geologie, Permafrost, Forstwirtschaft, Umweltforschung, etc.).

Vom Tandem-L-Wissenschaftsteam sind die Anforderungen an ein globales digitales Geländemodell mit einer räumlichen Auflösung von 12 m x 12 m und einer relativen vertikalen Genauigkeit von ~2 m formuliert worden. Das globale digitale Geländemodell wäre mit dieser Auflösung einzigartig und die Basis für ein einheitliches Kartenmaterial, das nur mit Tandem-L erreicht werden kann.

Missionskonzept und technische Umsetzung

Messprinzip

Für die Tandem-L-Mission wurde ein innovatives Konzept zur Datenaufnahme entwickelt. Es besteht aus zwei komplementären Messverfahren:

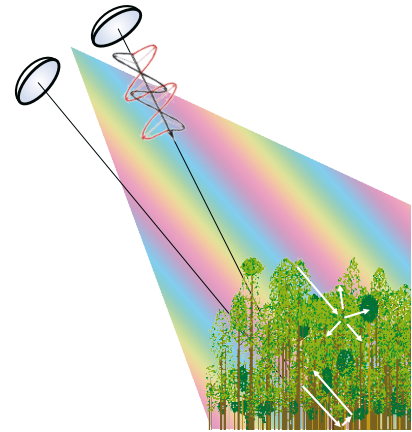
3D-Struktur-Modus zur dreidimensionalen Vermessung und tomografischen Abbildung von Volumenstreuer wie Vegetation, Eis, Schnee und trockenem Boden. Dieser Abbildungs-Modus ist erforderlich, um eindeutige Informationen über Volumenstreuer zu gewinnen (Höhe, Dichte, Struktur, etc.). Der 3D-Struktur-Modus erfüllt in optimaler Weise die Anwendungsanforderungen im Bereich der Bio-, Hydro- und Kryosphäre. Grundlage des 3D-Struktur-Modus ist die vom DLR entwickelte Technik der polarimetrischen SAR-Interferometrie (Pol-InSAR) mit mehreren Basislinien. Tandem-L wird die weltweit erste Radarmission sein, die mit der innovativen Pol-InSAR-Technik global 3D-Struktur-Messungen durchführt.

Deformations-Modus zur Erfassung von topografischen Veränderungen der Erdoberfläche mit einer Genauigkeit von

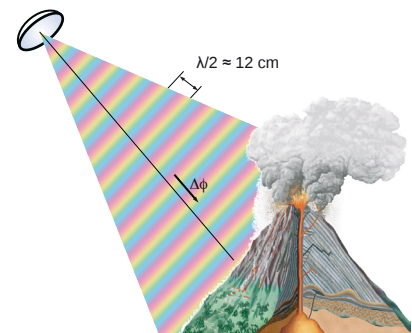
Zentimetern bis Millimetern. In diesem Modus wird ein möglichst breiter Streifen von bis zu 350 km abgebildet. Der zeitliche Abstand zwischen den Aufnahmen wird hierdurch minimiert. Der Deformations-Modus ist primär für Anwendungen im Bereich der Geo- und Lithosphären-Forschung geeignet.

Beide Messverfahren erlauben eine systematische und globale Abbildung der Erde mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 7 m. Während der Deformations-Modus eine Messwiederholzeit von ein bis zwei Wochen erfordert, ist für den 3D-Struktur-Modus aufgrund der langsameren Veränderungen von Volumenstreuer ein Wiederholzyklus von ein bis zwei Monaten ausreichend.

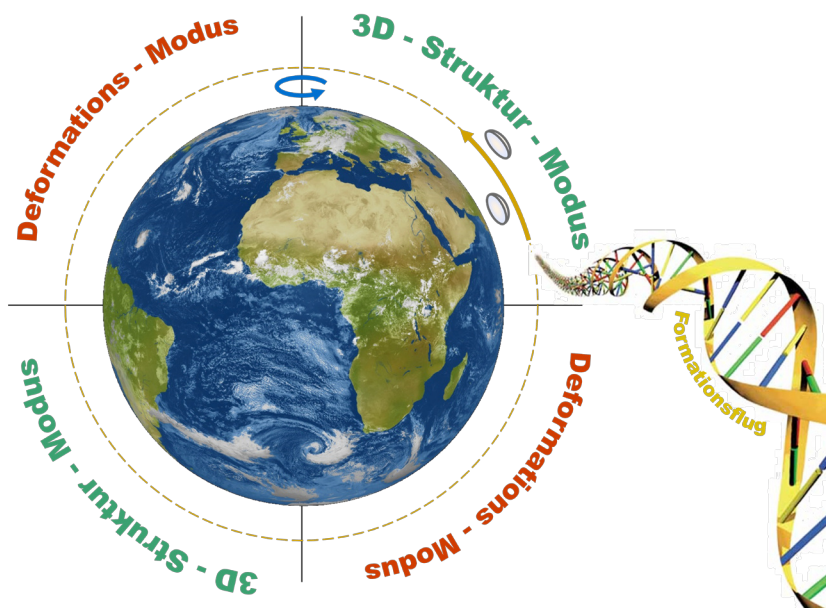
Im Falle einer Krisensituation (Erdbeben, Überschwemmung, Vulkanausbruch, Deich- oder Waldschaden, etc.) kann durch gezielte Satellitenmanöver und aufgrund der Wetterunabhängigkeit des Radarinstruments ein beliebiges Gebiet auf der Erdoberfläche innerhalb von ein bis zwei Tagen mit hoher Auflösung abgebildet werden.



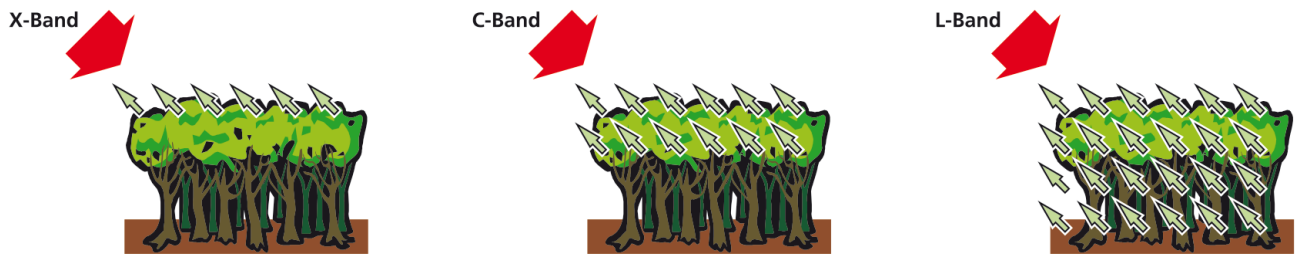
3D-Struktur-Modus



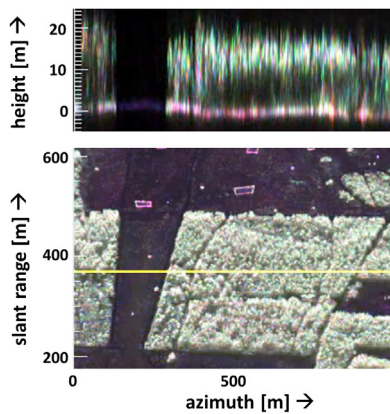
Deformations-Modus



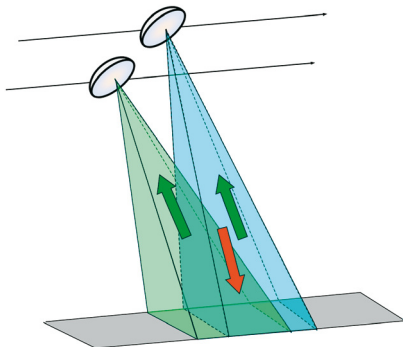
Tandem-L nutzt zwei komplementäre Abbildungsmodi in Kombination mit einer systematischen Aufnahmestrategie, um die vielfältigen Anforderungen an die Mission zu erfüllen.



Vergleich der Eindringtiefe von X-, C- und L-Band mit 3 cm, 5 cm und 24 cm Wellenlänge bei Vegetation. Während Radarwellen im X-Band nur von der oberen Baumkrone reflektiert werden, dringt das L-Band bis zum Boden. Nur L-Band-Radarsysteme können Signale aus allen Bereichen der Vegetation empfangen.



Demonstration der tomografischen Abbildung einer Baumgruppe im L-Band. Für dieses Beispiel wurden die Radardaten vom Flugzeug-SAR-System des DLR durch mehrfache Überflüge im Abstand von wenigen Minuten aufgenommen.



Die simultane Datenakquisition mit zwei vollpolarimetrischen Radarsatelliten im L-Band ermöglicht die Aufnahme einzigartiger Datenprodukte für ein breites Spektrum wissenschaftlicher Anwendungen.

Warum L-Band?

Radarsysteme können in einem breiten Spektrum unterschiedlicher Frequenzbereiche betrieben werden. Die Auswahl der Frequenz beeinflusst maßgeblich die Radarabbildung und den damit verbundenen Informationsgewinn. Mehrere nationale und internationale Veröffentlichungen sowie Studien mit maßgeblicher Beteiligung von deutschen Wissenschaftlern belegen, dass der Frequenzbereich im L-Band das größte Potenzial für wissenschaftliche Anwendungen im Bereich Erde und Umwelt aufweist.

L-Band entspricht einer Wellenlänge von 24 cm und zeichnet sich im Gegensatz zum kurzwelligen C- und X-Band (5,6 und 3,1 cm Wellenlänge) durch eine hohe Eindringtiefe bei Volumenstreuern wie Vegetation, Eis, trockenem Boden und Sand aus. Erst durch die Verwendung langwelliger L-Band-Signale ist es möglich, dichte Vegetation bis zum Boden zu durchdringen und damit deren vertikale Struktur zu vermessen.

Ein weiterer essenzieller Vorteil der Verwendung von langwelliger Radarsignalen ist die stark verbesserte zeitliche Kohärenz für die Messung von Erddeformationen und Gletscherbewegungen. Damit erlaubt Tandem-L Bewegungsmessungen der Erboberfläche in Zentimeter- bis Millimeter-Genauigkeit über sehr lange Zeiträume hinweg.

Radarsatelliten im Formationsflug

Erst die Verwendung von zwei Radarsatelliten in einer innovativen Tandem-Formation ermöglicht die dreidimensionale Abbildung der Erdoberfläche. In Verbindung mit der Eindringtiefe im L-Band kann Tandem-L neben der Oberfläche auch das vertikale Profil eines Volumens tomografisch erfassen. Dies ermöglicht nicht nur die Erstellung eines hochgenauen digitalen Geländemodells ohne Einfluss der Vegetation, sondern auch die globale Messung der Waldhöhe und, darüber hinaus, durch allometrische Beziehungen die Bestimmung der darin enthaltenen Biomasse.

Weiterhin bietet die Tandem-Formation eine Vielzahl von Vorteilen. Beispiele sind die Beobachtung des gleichen Gebiets aus unterschiedlichen Blickwinkeln zur verbesserten Bestimmung von Deformationen, Verdoppelung der Abbildungs-Streifenbreite, um gleichzeitig weite Gebiete aufzunehmen, Messung von Wellenhöhen und Meeresströmungen, Bestimmung von Eisstruktur und deren Veränderung, Messung der jahreszeitlichen Eiszunahme und -abnahme, Bestimmung von Meereisdicken, Detektion von Feuchtgebieten und Wasserstandsmessungen unter der Vegetation, Überwachung von Aufforstung und Abholzung, Erkennung von Waldschäden (Sturm, Feuer, etc.) und vieles mehr.



3D-Darstellung des Stadtwaldes von Traunstein. Die Waldhöhen wurden aus Radardaten mit Hilfe der polarimetrischen SAR-Interferometrie gewonnen.

Messung der Biomasse

Die Bestimmung der Waldbiomasse erfolgt indirekt über die Messung der vertikalen Waldstruktur. Ein entscheidender Strukturparameter hierbei ist die Waldhöhe.

Um weltweit die Waldhöhe zu erfassen, wird

- ein langwelliges Radarsignal benötigt, das durch den Wald bis zum Boden dringt,
- und
- die polarimetrische SAR-Interferometrie zur Höhenbestimmung angewendet.

Die zukunftsweisende Technik der polarimetrischen SAR-Interferometrie wurde am DLR-Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme in Zusammenarbeit mit diversen Partnern in Deutschland und Europa entwickelt und mit dem flugzeuggestützten SAR-System des DLR an verschiedenen Waldtypen mehrfach erfolgreich erprobt.

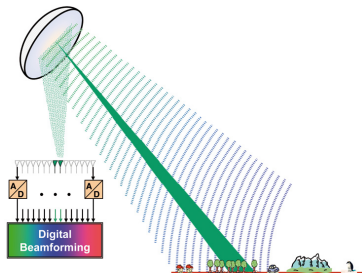
Die Methodik beruht auf einem vereinfachten Modell des Waldes und auf der Tatsache, dass mit der SAR-Polarimetrie Boden, Stamm und Baumkrone voneinander getrennt und mit Hilfe der SAR-Interferometrie deren Streuung in der Höhe bestimmt werden können. Hieraus lässt sich die Waldhöhe mit hoher Genauigkeit ableiten.

Bei Tandem-L werden zusätzlich vertikale Strukturprofile erstellt, indem mehrere Aufnahmen in einem neuartigen tomografischen Verfahren miteinander kombiniert werden. Aus diesen Informationen kann die Biomasse dann mit Hilfe von allometrischen Gleichungen berechnet werden. Diese weltweit einzigartige Technik wurde bereits über borealen und tropischen Wäldern sowie in gemäßigten Breiten demonstriert und hat gezeigt, dass die Waldhöhe mit einer Genauigkeit von 10% gemessen werden kann, woraus dann Biomasse mit einer Genauigkeit von 20% abgeleitet wird.

Technologie und Innovationen



Tandem-L-Satellit mit Reflektorantenne



Einsatz innovativer Technologie bei Tandem-L. Die Technik des Digital Beamforming für hochauflösende Radarsysteme wurde in enger Kooperation zwischen dem DLR und der Industrie in Deutschland entwickelt und patentiert.



Digital-Beamforming-Demonstrator auf einem DLR-Hubschrauber

Nächste Generation von hochauflösenden Radarsatelliten

Eine besondere Herausforderung bei der Tandem-L-Mission ist die Entwicklung von zwei kostengünstigen und zugleich leistungsfähigen SAR-Instrumenten für den Einsatz im Weltraum, welche die extremen Anforderungen der Mission erfüllen.

Neben dem innovativen Missionskonzept wird eine neue Technologie benötigt, um der Nachfrage nach großer Streifenbreite und hoher Auflösung gerecht zu werden. Der entscheidende Schlüssel bei Tandem-L liegt in der Verwendung einer entfaltbaren Reflektorantenne und in der Verlagerung der digitalen Schnittstelle zur Antenne.

Diese technische Revolution ermöglicht eine digitale Strahlformung (Digital Beamforming), bei der die rückgestreuten Radarsignale von Antennensubarrays nach der Digitalisierung parallel zur Prozessierung geleitet werden. Tandem-L wird als weltweit erste Radarmission die zukunftsweisende Technologie des Digital Beamforming in Kombination mit einer Reflektorantenne einsetzen. Die Nutzung des großen Reflektors steigert darüber hinaus die Empfindlichkeit und ermöglicht somit eine erhebliche Reduktion der Sendeleistung. Hierdurch können die SAR-Instrumente quasikontinuierlich betrieben werden.

Die digitale Antennensynthese mit der Technologie des Digital Beamforming steigert die Flexibilität in der Radarabbildung enorm und ermöglicht äußerst leistungsfähige Betriebsmodi, die an unterschiedliche Anforderungen des 3D-Strukturmodus sowie des Deformations-Modus optimal angepasst werden können.

Durch konsequente Nutzung neuester Radartechniken kann bei Tandem-L erstmals eine Streifenbreite von 350 km im einfachen/zweifachen polarimetrischen Modus und 175 km im voll-

polarimetrischen Modus mit einer Auflösung von bis zu 7 m abgebildet werden. Verglichen mit TerraSAR-X und TanDEM-X entspricht dies einer Steigerung der Abbildungsleistung von mehr als einer Größenordnung. Wenn hierzu noch die Fähigkeit zur quasikontinuierlichen Abbildung hinzugerechnet wird, erhöht sich die Aufnahmekapazität gegenüber TanDEM-X sogar um mehr als zwei Größenordnungen. Grundlage für diese Leistungssteigerung ist die Nutzung einer entfaltbaren Reflektorantenne mit einem Durchmesser von 15 m.

Die Kombination von Reflektorantennen mit neuesten Digital-Beamforming-Techniken ermöglicht, im Vergleich zu herkömmlichen Radarsatelliten mit phasengesteuerten Gruppenantennen, neben der Leistungssteigerung auch eine erhebliche Gewichtsreduktion und damit eine merkliche Senkung der Missionskosten.

Bereits 1999 wurde am DLR-Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme ein erster Prototyp für ein Radar mit Digital Beamforming aufgebaut und zur Demonstration von neuen Anwendungen in der Luftfahrt eingesetzt. Im Anschluss wurde ein Technologie-Entwicklungsprogramm bei der damaligen Astrium GmbH (heute Airbus Defence & Space) initiiert mit dem Ziel, die Hardware für ein raumfahrtqualifiziertes Radar mit Digital Beamforming zu entwickeln. Wichtige Teilaspekte des Digital Beamforming konnten inzwischen durch Nutzung der geteilten Antenne von TerraSAR-X erfolgreich demonstriert werden. Der heutige Stand der Hardware- und Algorithmen-Entwicklung erlaubt bereits den konsequenten Einsatz dieser hochinnovativen Technologie auf Tandem-L.

Bistatischer Radarbetrieb

Die Vermessung von 3D-Vegetations- und Eisstrukturen sowie die Erzeugung zahlreicher weiterer Produkte erfordert die simultane Datenaufnahme mit zwei Radarsatelliten. Die Technologie, zwei eng kooperierende Radarsatelliten für die Gewinnung hochwertiger Informationsprodukte einzusetzen, wurde weltweit erstmalig bei der TanDEM-X-Mission genutzt.

Nur hierdurch war es möglich, ein einzigartiges digitales Höhenmodell der Erde zu erstellen. Schlüsseltechnologien sind hierbei der bistatische Radarbetrieb, der unter anderem die hochgenaue Synchronisation zwischen den Radarsatelliten mit einer Genauigkeit von einer billionstel Sekunde sowie die präzise Bestimmung der interferometrischen Basislinie mit einer Genauigkeit von 1 mm einschließt. Tandem-L baut auf dieser weltweit einzigartigen Technologie auf und entwickelt sie konsequent weiter.

Formationsflug

Tandem-L benötigt zur tomografischen Vermessung der 3D-Struktur mehrere interferometrische Aufnahmen mit Satellitenabständen im Bereich von einem bis weit über 10 km. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde, aufbauend auf der Helix-Formation von TanDEM-X, ein neues Konzept entwickelt, das durch die geschickte Nutzung von natürlichen Driftbewegungen eine periodische Variation der Basislinien bei gleichzeitig minimalem Treibstoffverbrauch ermöglicht. Während ausgewählter Missionsphasen kann der zweite Satellit auch dazu genutzt werden, die Aufnahmeleistung im Sinne einer weiteren Verkürzung der Zeitabstände zwischen den Aufnahmen zu steigern. Dies ist beispielsweise ein großer Vorteil für die bedarfsgerechte Datenakquisition nach Erdbeben und anderen Naturkatastrophen.

Datenübertragung zum Boden

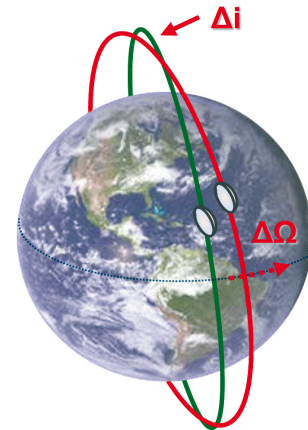
Die systematische Datenakquisition mit Tandem-L setzt nicht nur neue Maßstäbe bei der Produktverfügbarkeit und -qualität, sondern auch bei dem Datenvolumen, das zum Boden übertragen werden muss. Die derzeitigen Planungen gehen davon aus, dass die beiden Tandem-L-Satelliten jeden Tag ein Datenvolumen von insgesamt 8 Terabyte aufnehmen. Um diese Datenmenge zum Boden zu übertragen, sollen neueste Übertragungstechniken im Ka-Band sowie ein internationales Netzwerk an Bodenstationen genutzt werden.

Echtzeit-Datenprodukte

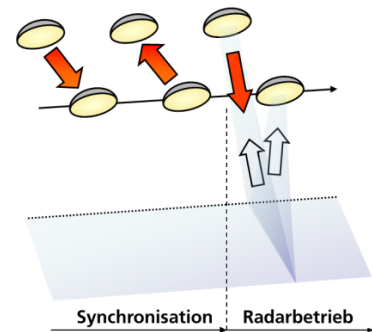
Um die Nutzer immer möglichst zeitnah mit aktuellsten Datenprodukten zu versorgen, soll schritt haltend mit den Datenaufnahmen eine thematische Online-Verarbeitung durchgeführt werden. Um den Aufwand hierbei in Grenzen zu halten, besitzen diese Produkte möglicherweise noch nicht die höchstmögliche Genauigkeit, die oftmals erst durch die Kombination mit anderen Aufnahmen und Produkten erreicht werden kann. Sie können aber beispielsweise als wertvolle Indikatoren zur Frühwarnung dienen.

Anwendungsspezifische Produkterstellung und Archivierung

Hochqualitative Produkte sollen auf Bestellung an die Nutzer ausgeliefert werden. Je nach Hintergrund des Nutzers kann es sich hierbei um sensororientierte Produkte (z. B. SAR-Bilder), Zwischenprodukte oder auch um veredelte Geo-Informationsprodukte wie Biomassekarten handeln. Für ausgewählte höherwertige Produkte können von den Nutzern auch bestimmte Verarbeitungsparameter (wie z. B. Zeiträume) gezielt gewählt werden. Die Produkterstellung und -verteilung soll über das Internet erfolgen. Soweit möglich, werden nur Zwischenprodukte archiviert, aus denen dann bei Bedarf die entsprechenden Endprodukte in Übereinstimmung mit den Nutzeranforderungen erzeugt werden.



Der Formationsflug der Tandem-L-Satelliten ist Grundlage für die tomografische Abbildung im 3D-Struktur-Modus.

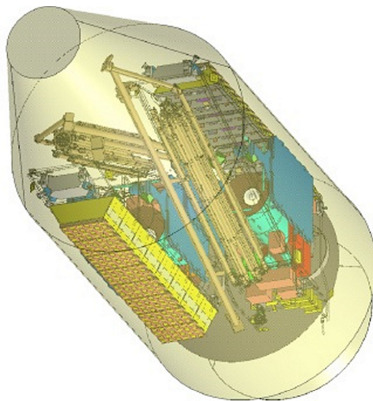


Zur Synchronisation der Radarsysteme werden zwischen den Satelliten kurze Pulse ausgetauscht. Dies ermöglicht einen hochpräzisen Zeitabgleich mit der Genauigkeit von einer billionstel Sekunde.

Implementierung und Zeitplan



Integration von TerraSAR-X bei Airbus Defence and Space (vormals Astrium GmbH) in Friedrichshafen



Zwei Tandem-L-Satelliten in der Ladebucht einer Falcon 9

Status von Tandem-L

Das Missionskonzept wurde in einer mehrjährigen Vorphase-A-Studie im Detail ausgearbeitet. Tandem-L kann entweder im Rahmen einer internationalen Kooperation oder rein national realisiert werden. Mit der Implementierung von Tandem-L entsteht ein weltweit einzigartiges Erdobservatorium, das die Leistungsfähigkeit bestehender Systeme um mehr als eine Größenordnung übertreffen wird. Entsprechend der aktuellen Planung könnte ein Start der Tandem-L-Satelliten Ende 2028 erfolgen. Die Missionszeit ist auf zehn Jahre ausgelegt, die Satellitenreserven werden jedoch einen Betrieb von weiteren zwei bis drei Jahren ermöglichen.

Bodensegment

Die Tandem-L-Mission baut auf der vorhandenen DLR-Infrastruktur auf, mit der die technischen Möglichkeiten der Radarsatelliten optimal ausgeschöpft werden können. Dies wird durch das sogenannte Bodensegment gewährleistet, das vom DLR in Oberpfaffenhofen bereitgestellt wird. Das Bodensegment plant Betrieb und Steuerung der Satelliten gemäß dem Datenakquisitionsplan. Es kontrolliert die Umlaufbahnen der Satelliten im Tandem-Formationsflug, betreibt und kalibriert beide Radarinstrumente, verarbeitet die Radardaten zu Bildern und zu höherwertigen Informationsprodukten

wie Baumhöhe-, Biomasse- oder Deformationskarten, archiviert diese und leitet sie an die Nutzer weiter. Somit stellt das Bodensegment die Schnittstelle zwischen den Satelliten und den wissenschaftlichen sowie kommerziellen Nutzern dar. Darüber hinaus übernimmt das DLR neben der Konzeption und Auslegung der Mission die Koordination der wissenschaftlichen Datennutzung. Insbesondere die extrem hohe wissenschaftliche und technologische Innovation von Tandem-L erfordert ein Höchstmaß an Fachexpertise und ein übergreifendes System-Know-how auf dem Radargebiet. Beides wurde vom DLR durch die großen Erfolge von TerraSAR-X und TanDEM-X wiederholt unter Beweis gestellt.

Raumsegment

Seit den erfolgreichen Shuttle-Radarmissionen (SIR-C/X-SAR und SRTM) kooperiert das DLR sehr eng mit der deutschen Raumfahrt-Industrie, die eine weltweit führende Position in Entwicklung und Bau hochinnovativer Radarsatelliten für die Erdbeobachtung innehat. TerraSAR-X und TanDEM-X sind derzeit die modernsten Radarsysteme im zivilen Bereich und haben ein Preis-Leistungs-Verhältnis, das international von keinem anderen Hersteller erreicht wird. Tandem-L baut auf dem Know-how von TanDEM-X auf und wird diese sehr erfolgreiche Entwicklung fortsetzen.

Zeitplan für die Realisierung von Tandem-L



Überblick und Zusammenfassung

Tandem-L-Stichpunkte

Missionsprofil

Das Hauptziel der Tandem-L-Mission ist die systematische und globale Erfassung von dynamischen Prozessen auf der Erdoberfläche in einer noch nicht erreichten Qualität und Auflösung. Tandem-L wird hochaktuelle wissenschaftliche Fragestellungen aus der Bio-, Geo-, Hydro- und Kryosphäre beantworten und Lücken in der Klimaforschung schließen.

Neben seiner wissenschaftlichen Komponente zeichnet sich Tandem-L durch seine hochinnovative Technologie und Methodik aus (Digital Beamforming zur Erhöhung der Streifenbreite bei hoher räumlicher Auflösung und polarimetrische SAR-Interferometrie zur Bestimmung von Waldbiomasse). Mit seinen einzigartigen Produkten wird Tandem-L einen Meilenstein in der Fernerkundung setzen und die internationale Führungsrolle Deutschlands auf dem Radargebiet nachhaltig festigen und ausbauen.

Wissenschaftliche Ziele

Klimarelevante Ziele:

- Bestimmung der globalen Waldbiomasse und deren zeitlicher Veränderung
- Beiträge zum besseren Verständnis des Kohlenstoffkreislaufs (CO₂-Senken und -Quellen)
- Erfassung von Schmelzprozessen in Schnee- und Eisgebieten
- Quantifizierung von Veränderungen in der oberflächennahen Bodenfeuchte
- Messung von Meeresströmungen
- Erfassung der Ausdehnung und jahreszeitlichen Veränderung von Feucht- und Permafrostgebieten

Biodiversität:

- Erfassung der globalen Waldstruktur (z. B. Höhen und vertikale Profile)
- Quantifizierung der Biodiversität indirekt durch die räumliche Waldhöhen- und Biomasseverteilung

Erdodynamik:

- Messung von topografischen Veränderungen (z. B. durch Erdbeben, Vulkanismus, etc.)
- Besseres Verständnis von Erdbeben- und Vulkan-Aktivitäten mit dem Ziel, langfristig einen Beitrag zu deren Vorhersage zu leisten
- Beobachtung von Risikogebieten und Beitrag zu Hilfsmaßnahmen nach Katastrophen

Wissenschaftliche Anforderungen

- Systematische Beobachtung der gesamten Landoberfläche mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung
- Nutzung komplementärer Abbildungstechniken zur systematischen Erfassung einer Vielzahl dynamischer Prozesse in den unterschiedlichen Erdsphären
- Polarimetrische SAR-Interferometrie und Tomografie zur modellbasierten Bestimmung von Struktur- und Umweltparametern
- Differenzielle SAR-Interferometrie zur millimetergenauen Vermessung von Deformationen auf der Landoberfläche
- Minimierung der temporalen Dekorrelation durch Einpass-Interferometrie und geeignete Frequenzwahl (L-Band)
- Mehrfache globale Abdeckung entsprechend einem optimierten Aufnahmeplan, um sowohl kurz- als auch langzeitliche Veränderungen von bio- und geophysikalischen Parametern zu erfassen

Satelliten & Instrument

- Zwei Satelliten im Formationsflug mit jeweils einem vollpolarimetrischen L-Band-Radar mit synthetischer Apertur (SAR)
- Polarer Orbit mit 745 km Orbithöhe und ca. 97 Grad Inklination (16-Tage-Wiederholzyklus)

- 350 km Streifenbreite bei einer Auflösung von bis zu 7 m
- Globale Landabdeckung innerhalb von 8 Tagen (möglich durch den Einsatz hochinnovativer Digital-Beamforming-Techniken)
- Zwei-Frequenz-GPS-Empfänger zur hochpräzisen Bahn- und Basislinienbestimmung
- Datenübertragung von bis zu 8 Terabyte/Tag zum Boden durch ein Netzwerk von Bodenstationen im Ka-Band
- Gemeinsamer Start beider Satelliten, z. B. mit Falcon-9

Betrieb und wissenschaftliche Nutzung

- Missionsbetrieb (Steuerung der Satelliten und der Radarinstrumente) durch das DLR
- Optimierter systematischer Aufnahmeplan (erstellt von einem Experten-Team im Hinblick auf die wissenschaftlichen Anforderungen unter Berücksichtigung der verfügbaren Ressourcen)
- Vollautomatisierte Prozessierungskette von den Rohdaten bis hin zu Produkten in Level-3/-4 für die zeitnahe und bedarfsgerechte Lieferung von hochwertigen Geoinformationen
- Zusätzliche Bereitstellung von koregistrierten interferometrischen SAR-Datensätzen (Level-1b) für die Entwicklung neuer Methoden und Produkte
- Intensive Vorbereitung der breitgefächerten wissenschaftlichen Datennutzung im Rahmen der HGF-Projekte TERENO und ACROSS sowie der HGF-Allianz „Remote Sensing and Earth System Dynamics“

Datenprodukte und wissenschaftliche Nutzung

Tandem-L wird einen weltweit einzigartigen globalen Datensatz für zahlreiche wissenschaftliche Anwendungen im Bereich der Klimaforschung, Geodynamik, Glaziologie, Ozeanografie und Hydrologie sowie für öffentliche und hoheitliche Aufgaben liefern. Aufgrund der innovativen Aufnahmetechniken von Tandem-L ist zu erwarten, dass im Rahmen der Mission zahlreiche neue Informationsprodukte sowie zukunftsweisende Anwendungen entstehen.

Das wissenschaftliche Team von Tandem-L besteht derzeit aus circa 180 nationalen und internationalen Mitgliedern. Die HGF-Zentren AWI, DLR, GFZ, HMGU, FZJ, HZG, KIT, GEOMAR und UFZ bilden den Kern

des wissenschaftlichen Teams von Tandem-L. In Zusammenarbeit mit weiteren Kooperationspartnern und Themenschwerpunkten (z. B. Netzwerk EOS, Geotechnologie-Programm Exupery, TERENO, ACROSS) wurden in mehreren Iterationen die wissenschaftlichen Anforderungen und Produkte für die Mission erarbeitet und verfeinert.

Die optimale Nutzung der Tandem-L-Daten wird derzeit intensiv im Rahmen der Helmholtz-Allianz „Remote Sensing and Earth System Dynamics“ vorbereitet. Dieser Forschungsverbund wurde 2012 mit einer Finanzierung von 20 Mio. Euro etabliert und umfasst insgesamt 18 Partner (9 HGF-Zentren, mehrere Universitäten sowie Max-Planck- und Leibniz-Institute), 10 assoziierte Partner und mehr als 100 Mitglieder im Science-Team. Mit der HGF-Allianz wurde

auch eine innovative Plattform für die Ausbildung junger Wissenschaftler(innen) etabliert und es wurden etwa 35 zusätzliche Doktoranden eingestellt.

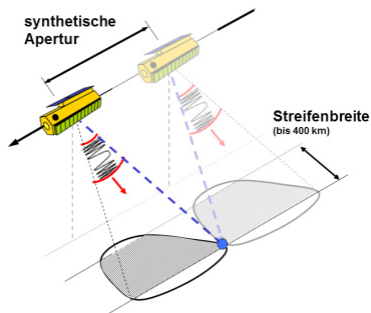
Aufgrund der einzigartigen Produktpalette von Tandem-L, die die Erfassung von 7 essenziellen Klimavariablen einschließt, ist zusammen mit der durch die HGF-Allianz gewonnenen Expertise mit einem Quantensprung bei der Modellierung und Extraktion von bio-/geophysikalischen Parametern aus Radardaten für die Umweltbeobachtung und Klimaforschung zu rechnen.

Die Kooperation mit internationalen Partnern eröffnet darüber hinaus die Option, den wissenschaftlichen Nutzen der Tandem-L-Mission durch Synergieeffekte zusätzlich zu steigern.

	PRODUKTE	ABDECKUNG	AUFLÖSUNG	GENAUIGKEIT	WIEDERHOLRATE
BIOSPHERE	Waldhöhe	alle Waldgebiete	50 m (global) 20 m (regional) 10 m (lokal)	~ 10%	Aufnahmen saisonal bis alle 16 Tage; Produktlieferung jährlich bis saisonal
	Terrestrisch gebundene Biomasse		100 m (global) 50 m (regional)	~ 20% (oder 20 t/ha)	
	Vertikale Waldstruktur		50 m (global) 30 m (regional)	3 Schichten	
GEO-/LITHOSPHERE	Plattentektonik (3D-Deformationsrate)	alle kritischen Gebiete	50 m (global)	1 mm/Jahr (nach 10 Jahren)	wöchentliche Aufnahmen; Produktlieferung jährlich bis saisonal
	Vulkanismus (Verschiebung)	>1500 Vulkane an Land 50 km x 50 km	50 m	10 mm	
	Hangrutschungen	kritische Gebiete	7 m	1 mm/Jahr (nach 10 Jahren)	
	Absenkung	urbane Gebiete	7 m	1 mm/Jahr (nach 10 Jahren)	
KRYO-/HYDROSPHERE	Gletscherbewegungen	weltweit	50 - 500 m	cm - m/Jahr	saisonal
	Änderungen der Eisstruktur	Grönland	100 m	> 1 Schicht	jährlich
	Eisschichterhebung	weltweit	50 m	0,5 - 1 m	halbjährlich
	Meereseis	Arktis/Antarktis	5 - 50 km	Dicke <0,5 - 1m Type 5 - 20%	monatlich bis alle 16 Tage
	Permafrostgebiete	ausgewählte Gebiete	10 - 20 m	1 cm pro Saison	alle 16 Tage im Sommer/Herbst
	Landwirtschaftliche Vermessung	ausgewählte Gebiete	5 - 10 m	-	wöchentliche Aufnahmen während der Wachstumsphase
	Oberflächennahe Bodenfeuchte	ausgewählte Gebiete	50 - 100 m	5 - 10%	wöchentlich
	Meeresströmungen	ausgewählte Gebiete	4 - 20 km	5 cm/s	wöchentlich
	Windgeschwindigkeit	ausgewählte Gebiete	4 - 20 km	2 m/s	wöchentlich
	Wellen der Meeresoberfläche	ausgewählte Gebiete	5 km	0,1 - 0,25 m / 10°	wöchentlich
GLOBAL	Digitale Gelände- und Oberflächenmodelle	global/lokal	12 m	2 m (kein Wald) 4 m (Wald)	global: jährlich lokal: nach Bedarf
KATASTROPHENFÄLLE	kritische Gebiete	lokal	-	-	nach Bedarf

Zusammenfassung der wichtigsten wissenschaftlichen Produkte

Radar mit Synthetischer Apertur (SAR)



Das Radar mit Synthetischer Apertur (SAR).

Das Radar mit Synthetischer Apertur (SAR – Synthetic Aperture Radar) stellt eine anerkannt wichtige und aus der Erdbeobachtung nicht mehr wegzudenkende Informationsquelle dar, die unabhängig von Wetter und Tageslicht eine Vielzahl äußerst leistungsfähiger Anwendungen ermöglicht.

Das wissenschaftliche und kommerzielle Anwendungsspektrum steigt kontinuierlich und umfasst derzeit unter anderem folgende Bereiche:

- Klimaforschung: Bestimmung von Vegetationsparametern wie Biomasse und deren Veränderung
- Physik der festen Erde: Beobachtung von Plattentektonik, Vulkanismus, Erdbeben, Hangrutschungen und Bodensenkungen
- Hydrologie: Messung der Bodenfeuchte und Modellierung von Niederschlags-Abflussgebieten
- Ozeanografie: Erfassung von Strömungen und Meeresboden-Topografie, Messung von Wind- und Wellenfeldern

- Glaziologie: Beobachtung von Gletschern und polaren Eismassen

Auch für öffentliche und hoheitliche Belange sind SAR-Datenprodukte von großem Nutzen: Beispiele sind die Bereitstellung digitaler Geländemodelle und topografischer Karten für Regionalplanung, Umweltüberwachung, Luftverkehr und mobile Telekommunikationsdienste sowie die zeitnahe Aufnahme räumlich hochauflösender SAR-Bilder für Katastrophenschutz und Aufklärung, unabhängig von den optischen Sichtverhältnissen.

Das SAR ist der einzige Sensor, der eine globale, räumlich hochauflösende und großflächige Abbildung der Erdoberfläche ermöglicht. Somit sind weltraumgestützte SAR-Systeme prädestiniert, Geo-Informationen schnell, präzise, flächendeckend und kontinuierlich zu liefern.

Flussmündung bei Balikpapan, Indonesien. Deutlich erkennbar sind die Shrimp-Zuchtbecken innerhalb der umgebenden Mangrovenwälder. Das vollpolarimetrische L-Band-Radarbild wurde im November 2004 mit dem flugzeuggetragenen SAR-System des DLR aufgenommen.



Deutsche Spitzenposition in der Radartechnologie

Das DLR hat sich auf dem Gebiet des hochauflösenden Radars eine führende Position erarbeitet und ist derzeit – zusammen mit der deutschen Industrie – den Wettbewerbern weltweit überlegen.

Warum ist das DLR heute so erfolgreich auf dem Gebiet der Radarerdbeobachtung?

- Von Anfang an wurde die Gesamtsystemfähigkeit, d. h. die Beherrschung aller Stufen von der Datenaufnahme bis zur Dateninterpretation und Erforschung neuer Technologien und Anwendungen angestrebt.
- Strategie und Roadmap für künftige Radarmissionen wurden von Beginn an in enger Abstimmung zwischen Vorstand, Raumfahrt-Agentur, Programmatik, Instituten und Industrie entwickelt.
- Alle deutschen Missionen sind als logische Schritte in der Radarentwicklungslinie zu sehen.
- Die deutsche Industrie hat eine führende Position in der hochinnovativen Radartechnologie mit einem sehr guten Preis-Leistungs-Verhältnis und arbeitet eng mit dem DLR zusammen.
- Die strategisch und langfristig angelegte Entwicklungslinie der Radarerdbeobachtung wurde konsequent als Schwerpunkt von DLR-Vorstand, Raumfahrt-Agentur und DLR-Programmatik verfolgt. Hierdurch konnte mit TerraSAR-X und TanDEM-X in der hochauflösenden Radarfernerkundung die internationale Führungsposition eingenommen werden.

Warum braucht Deutschland eine Radarmission nach TanDEM-X?

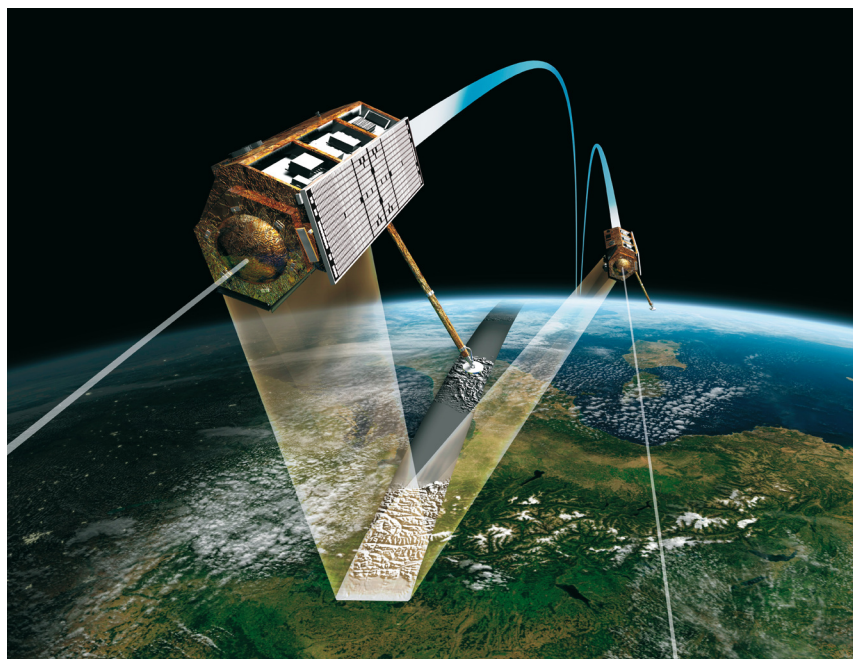
- Um die erfolgreiche Radarentwicklungslinie nicht zu unterbrechen, müssen die Weichen für eine Nachfolgemission nach TanDEM-X gestellt werden. Denn einschließlich Vorstudie, Genehmigung und Realisierung dauert eine Raumfahrt-Mission bis zum Start ca. 6 bis 7 Jahre. Dies bedeutet, dass der Start einer Radarmission frühestens Ende 2028 möglich wäre.
- Bei Radarmissionen ist zunehmend mit starker Konkurrenz zu rechnen. Der Erhalt der Spitzenposition Deutschlands in der Radartechnologie erfordert die Entwicklung innovativer Radarkonzepte und deren Umsetzung in Missionen.

Der Missionsvorschlag als Nachfolge von TanDEM-X muss wissenschaftlich und technologisch hochinnovativ sein, um die Spitzenposition Deutschlands auf dem Radargebiet langfristig zu halten oder sogar weiter auszubauen.

Darüber hinaus muss er die erfolgreiche programmatische Radarentwicklungslinie auf optimale Weise ergänzen.

Von entscheidender Bedeutung ist dabei, dass der Missionsvorschlag Antworten auf hochaktuelle wissenschaftliche Fragestellungen zu dynamischen Prozessen auf der Erdoberfläche gibt. Tandem-L wird daher als nächster logischer Schritt in der Radarentwicklungslinie Deutschlands gesehen.

Die TanDEM-X-Mission ist das erste Radarinterferometer im Weltall mit einem kontrollierten Formationsflug.



Roadmap für die Erdbeobachtung

Der heutige Stand der Roadmap im deutschen Radarprogramm der Raumfahrt-Agentur sieht eine nachhaltige X-Band-Entwicklungslinie vor.

Mit dem Start von TanDEM-X im Juni 2010 wurde die Führungsrolle Deutschlands in der hochauflösenden Radarfernerkundung und -technologie deutlich ausgebaut. Diese erfolgreiche Entwicklung der Radartechnologie im X-Band wurde ermöglicht, indem eine konsequente programmatische Linie mit Technologie-Fördervorhaben im nationalen Raumfahrtprogramm seit den 80er Jahren verfolgt wurde.

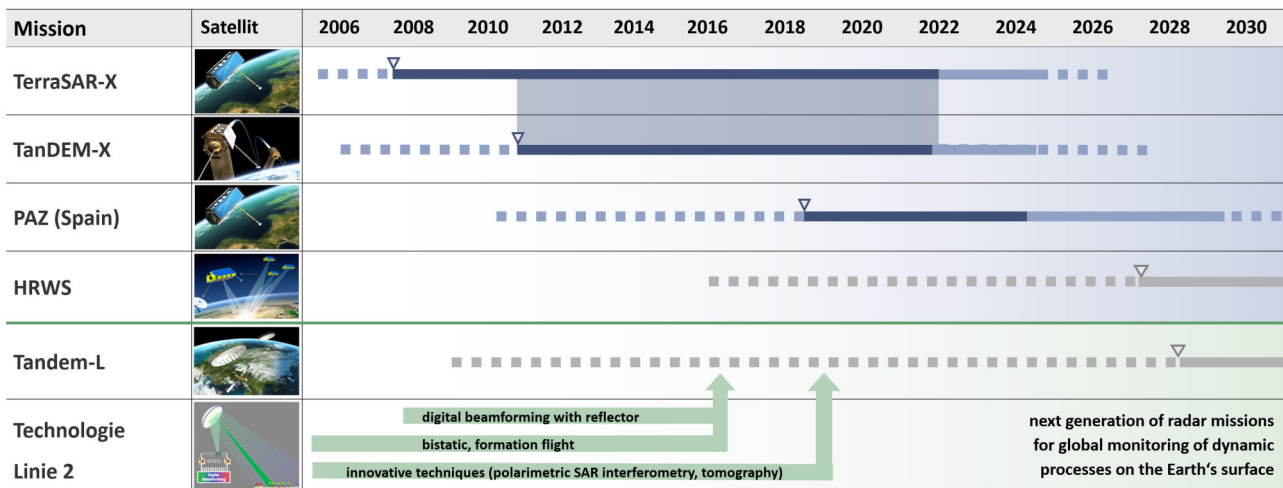
Die Radarentwicklungslinie nach TanDEM-X sieht eine SAR-Mission der neuesten Generation mit Digital Beamforming vor. Aufgrund des Schwerpunkts der Instrumentauslegung von TerraSAR-X auf hohe Auflösung werden der kommerzielle Bereich bzw. Produktdienstleistungen (z. B. Copernicus) mit lokaler Nutzung künftig dominieren, obwohl die deutschen Wissenschaftler nach wie vor großes Interesse an der globalen Nutzung von Radardaten haben werden.

Tandem-L bietet die einmalige Gelegenheit, die vielfältigen Aktivitäten der beteiligten Helmholtz-Zentren, Max-Planck-Institute und Universitäten über die unterschiedlichen Forschungsbereiche hinweg in einem gemeinsamen interdis-

ziplinären Projekt aufs Engste miteinander zu vernetzen (Helmholtz-Allianz „Remote Sensing und Earth System Dynamics“).

Die Expertise der jeweils einschlägigen Forschungszentren mit ihren spezifischen Modellierungserfahrungen ist entscheidend für die Erstellung hoch aggregierter Informationsprodukte. Darüber hinaus eröffnet Tandem-L neue Möglichkeiten zur internationalen Kooperation mit weltweit führenden Wissenschaftsteams und die komplementäre Expertise in der Datennutzung und Modellierung lässt eine fruchtbare Zusammenarbeit mit großem Synergieeffekt erwarten. Nach den derzeitigen Planungen könnten die Tandem-L-Satelliten Ende 2028 starten und über einen Zeitraum von mindestens 10 Jahren betrieben werden.

Radarentwicklungslinie – deutsche Radarmissionen

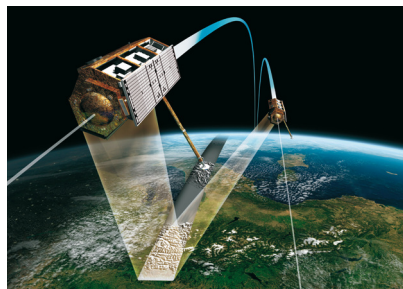
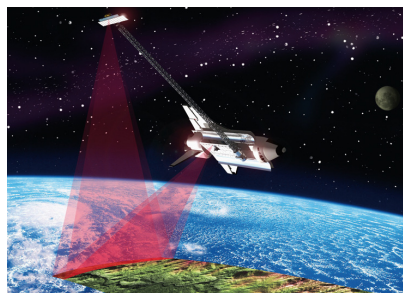
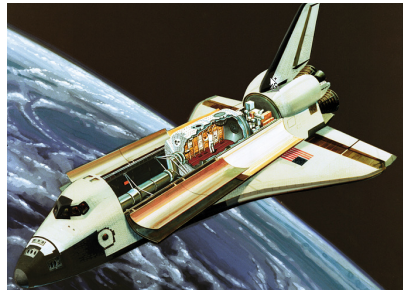


Deutsche Radarmissionen

MRSE (Microwave Remote Sensing Experiment) bestand aus einem kompakten Mikrowellensensor, der an Bord des Spaceshuttle SPACELAB-1 im Jahre 1983 geflogen ist. Drei Betriebsmodi waren vorgesehen: SAR, Radiometer und Scatterometer. Der SAR- und Scatterometer-Betrieb haben aufgrund eines Kurzschlusses in der Senderöhre nur wenige Sekunden funktioniert. Trotz dieser Fehlfunktion war das Experiment entscheidend für die künftige Radarentwicklung Deutschlands.

SIR-C/X-SAR – Die Shuttle Imaging Radar Missionen (SIR-C/X-SAR) bestanden aus zwei Flügen im April und September 1994 und hatten zum Ziel, das Potenzial von polarimetrischen Radarsystemen mit drei unterschiedlichen Frequenzen für eine Vielzahl von Anwendungen zu demonstrieren. Deutschland hatte in Zusammenarbeit mit Italien das X-SAR-Radarsystem entwickelt, die USA die Radarsysteme im C- und L-Band. Die beiden SIR-C/X-SAR-Missionen haben neue Maßstäbe in der wissenschaftlichen Fernerkundung mit multifrequenten, multipolarisierten SAR-Systemen gesetzt. Die Kombination von L-, C- und X-Band sowie die unterschiedlichen Polarisierungen der in diesen Missionen gewonnenen Datensätze sind bis heute einzigartig.

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) war ein Highlight der Radaraktivitäten Deutschlands in Zusammenarbeit mit NASA/JPL. Am 11. Februar 2000 startete die Raumfähre Endeavour in einer bisher einzigartigen Mission zur topografischen Kartierung der Erde mit zwei Radarsystemen. Im Verlauf von nur 11 Tagen wurden insgesamt 3600 Gigabyte X-SAR/SRTM-Daten aufgezeichnet. Die Sekundär-Antennen, die am Ende eines 60 m langen Masts montiert waren, erlaubten eine topografische



Kartierung von ca. 80% der Landoberfläche mit einer Höhen Genauigkeit von ca. 10 m. Deutschland hat an dieser Mission mit einem interferometrischen X-Band-Radarsystem (X-SAR) teilgenommen, das zusätzlich ca. 40% der Landoberfläche mit einer erhöhten Genauigkeit von ca. 6 m erfasst hat.

TerraSAR-X ist ein Radarsatellit der neuesten Generation, der am 15. Juni 2007 von Baikonur/Kasachstan aus gestartet wurde. Seitdem umrundet der Satellit die Erde in einer Höhe von 514 km auf einer polaren Umlaufbahn und liefert mit seiner aktiven Radarantenne – unabhängig von Wetterbedingungen, Wolkenbedeckung und Tageslicht – Daten mit einer Auflösung von bis zu einem Meter. TerraSAR-X ist der erste Radarsatellit Deutschlands und wurde im Rahmen einer öffentlich-privaten Partnerschaft zwischen dem DLR und Airbus Defence and Space (vormals EADS Astrium GmbH) verwirklicht.

TanDEM-X (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement) hat das Ziel, aus dem Weltraum ein globales digitales Geländemodell mit einer bisher nicht erreichten Genauigkeit zu generieren (2 m Höhen Genauigkeit mit 12-m-Raster). Der TanDEM-X-Satellit wurde im Juni 2010 gestartet und befindet sich seitdem in einer Tandem-Orbitkonfiguration mit seinem Zwilling TerraSAR-X. Beide Satelliten bilden zusammen ein großes Radar-Interferometer im Weltall. Implementiert wurde TanDEM-X in Fortsetzung der für TerraSAR-X etablierten öffentlich-privaten Partnerschaft zwischen dem DLR und Airbus Defence and Space.

Das DLR im Überblick

Das DLR ist das Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Wir betreiben Forschung und Entwicklung in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie und Verkehr, Sicherheit und Digitalisierung. Die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR ist im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zwei DLR-Projektträger betreuen Förderprogramme und unterstützen den Wissenstransfer.

Global wandeln sich Klima, Mobilität und Technologie. Das DLR nutzt das Know-how seiner 55 Institute und Einrichtungen, um Lösungen für diese Herausforderungen zu entwickeln. Unsere 10.000 Mitarbeitenden haben eine gemeinsame Mission: Wir erforschen Erde und Weltall und entwickeln Technologien für eine nachhaltige Zukunft. So tragen wir dazu bei, den Wissens- und Wirtschaftsstandort Deutschland zu stärken.



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Institut für Hochfrequenztechnik und
Radarsysteme

Münchener Str. 20
82234 Weßling

www.DLR.de/HR