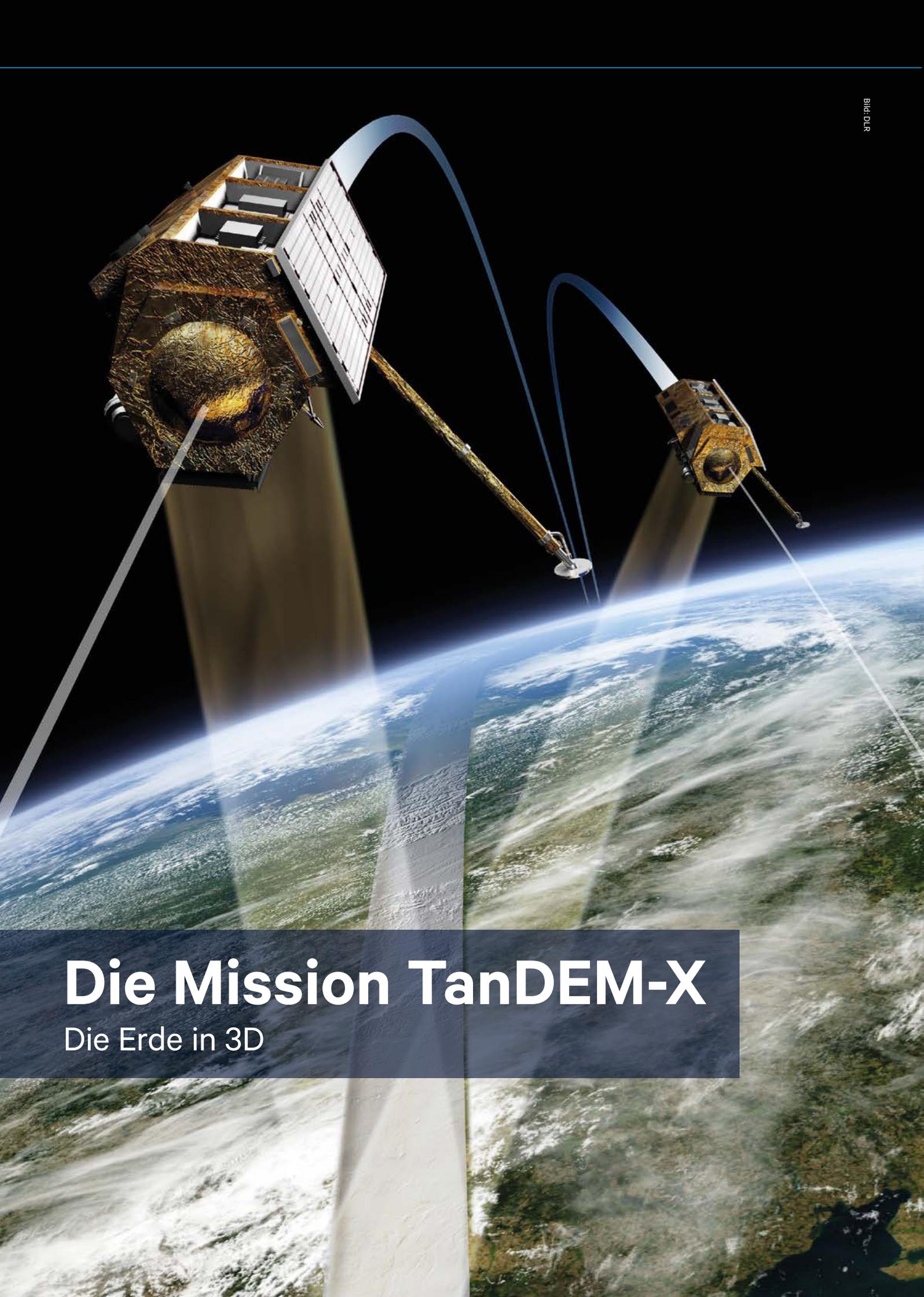


# Die Mission TanDEM-X

Die Erde in 3D

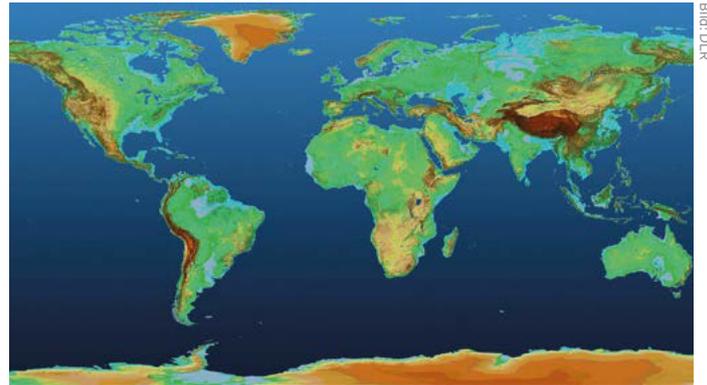


**A**ls der Radarsatellit TanDEM-X am 21. Juni 2010 startete, begann eine neue Ära in der Radarfernerkundung. Seit er im engen Formationsflug mit seinem drei Jahre älteren „Zwilling“ TerraSAR-X die Erde umkreist, liefern die beiden Satelliten Daten für ein homogenes Höhenmodell, das eine heute unentbehrliche Grundlage für viele kommerzielle Anwendungen und wissenschaftliche Fragestellungen darstellt. Der Abstand zwischen den Zwillingssatelliten variiert je nach Missionsphase zwischen mehreren Kilometern und zeitweise nur 120 Metern. Das ermöglicht den Radarsensoren eine 3D-Sicht auf die Erde. Physikalisch korrekt spricht man von einem bistatischen Interferometer im All, das es erlaubt, die Geländestruktur mit nur einem Überflug dreidimensional zu erfassen – eine in dieser Realisierung bislang weltweit einmalige Weltraummission. Die Mission TanDEM-X liefert so wertvolle Beiträge zu gesellschaftlich relevanten Themen wie beispielsweise Umweltschutz und Auswirkungen des Klimawandels und gewinnt mit zunehmender Dauer weiter an Wert.

Für weite Teile der Erde existierten zuvor nur grobe, uneinheitliche oder lückenhafte Höhenmodelle aus unterschiedlichen Datenquellen und Erhebungsmethoden. Die Mission TanDEM-X hatte deshalb die Aufgabe, diese Lücken zu schließen und ein digitales Höhenmodell der gesamten Landoberfläche der Erde in einheitlicher Qualität und bislang unerreichter Genauigkeit zu erzeugen. Die zur Gewinnung der Bild- und Höhendaten angewendete Radartechnik mit synthetischer Apertur (*Synthetic Aperture Radar, SAR*) bietet gegenüber anderen optischen Verfahren den Vorteil, dass Aufnahmen unabhängig von der Wolkenbedeckung und Sonneneinstrahlung großflächig und dennoch mit hoher Auflösung erzeugt werden können.

**Teamwork im All**

Zusätzlich ermöglicht das Radarinterferometer mit den zwei Satelliten im Formationsflug im Vergleich zu dem konventionellen Stereo-Verfahren eine deutliche Steigerung der erzielbaren Höhengenaugkeit. Dazu sendet während einer Aufnahme immer nur einer der beiden Satelliten, wohingegen beide die von der Erdoberfläche reflektierten Echosignale empfangen. Aufgrund der leicht unterschiedlichen Orbitposition beider Satelliten



Das globale TanDEM-X-Höhenmodell, das seit September 2016 für kommerzielle und wissenschaftliche Anwendungen zur Verfügung steht

ergeben sich Entfernungsdifferenzen zu einem Punkt auf der Erdoberfläche, die mittels **Interferometrie** – der Auswertung der Phase der Radarwellen – millimetergenau bestimmt werden können. Mit genauer Kenntnis des Abstands der Satelliten, der sogenannten Basislinie, wird so im Bodensegment des *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)* mit einem aufwendigen Rechenverfahren die Höhe der Erdoberfläche bestimmt.

Hier ist äußerste **Präzision** gefragt: Der Abstand der Satelliten muss mit hochgenauen GPS-Empfängern millimetergenau erfasst und die Radarsysteme auf Bruchteile von Picosekunden (das entspricht bei zwei Uhren einem Gangunterschied von einer Sekunde in 100.000 Jahren) synchronisiert werden. Leicht unterschiedliche Laufzeiten in der Radarelektronik werden hochgenau kalibriert; dabei werden sogar relativistische Effekte berücksichtigt. Das Ergebnis ist ein digitaler Datensatz, der die Höheninformation der Geländepunkte in einem regelmäßigen Raster repräsentiert. Dies wird als **digitales Höhenmodell (Digital Elevation Model, DEM)** bezeichnet.

Für das globale DEM wurden von 2011 bis 2015 sämtliche Landoberflächen der Erde zweimal mit Satellitenformationen von unterschiedlichen Abständen kartiert, gebirgige Gebiete sogar bis zu sechsmal. Die Kombination dieser Messungen erleichtert die Berechnung des Höhenmodells und trägt somit zur Steigerung der Genauigkeit bei. Bei der Prozessierung wurden insgesamt 2.500 Terabyte an Radardaten verarbeitet. Das finale, globale TanDEM-X-DEM umfasst circa **25 Terabyte** und deckt die gesamte Landmasse der Erde ab. Das sind knapp 150 Millionen Quadratkilometer, unterteilt in ein Raster von 0,4 mal 0,4 Bogen Sekunden, was etwa 12 mal 12 Metern entspricht. Der gesamte Datensatz ist in mehr als 19.000 Einheiten portioniert, sogenannten Geozellen von einem mal einem Grad in Breite und Länge. Das entspricht im Breitengradbereich Europas etwa einer Fläche von 100 mal 100 Kilometern. Jede Geozelle enthält neben dem DEM zusätzliche Informationen, wie zum Beispiel eine **Höhenfehlerkarte (HEM)** und das Mosaik der **mittleren Amplitude (AMP)** der Radarbilder. Der absolute Höhenfehler beträgt etwa einen Meter und liegt damit um eine Größenordnung unterhalb der ursprünglichen Spezifikation von zehn Metern. Auch die Zahl der Lücken im Datensatz, wie sie zum Beispiel durch aufnahmebedingte Abschattungen auftreten können, liegt weit unter der Spezifikation und der Abdeckungsgrad beträgt mehr als 99,89 Prozent. Mit dieser Genauigkeit hat die Mission TanDEM-X alle Erwartungen deutlich übertroffen.

Bild: DLR

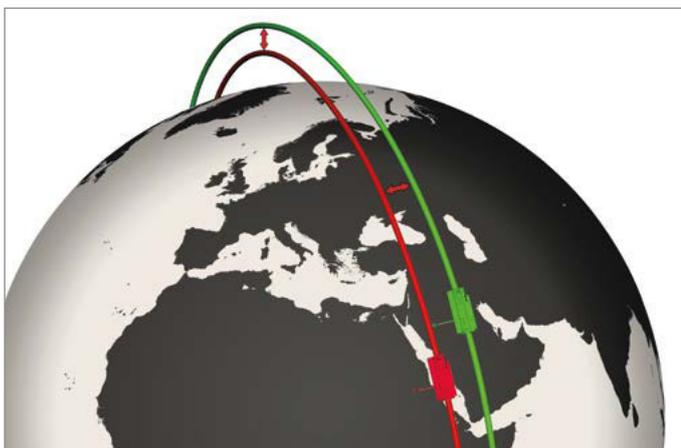
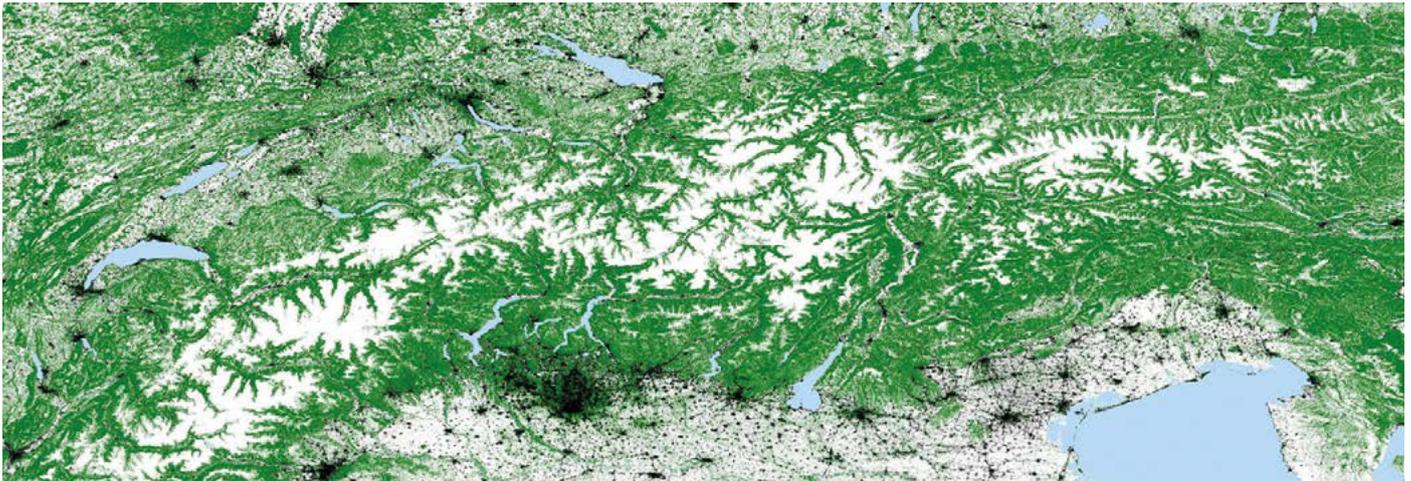


Illustration der Helix-Formation: TerraSAR-X bewegt sich in der rot markierten Umlaufbahn, TanDEM-X in der grün markierten. Typische Basislinien variieren zwischen 120 und 500 Meter; die Bahnen kreuzen sich nicht.



TanDEM-X-Waldkarte der Alpen

### Hochgenaue Karten von Wäldern und Eismassen

Seit der Fertigstellung des globalen TanDEM-X-DEMs 2016 werden die Höhendaten intensiv genutzt. Die Produktvarianten im Rastermaß von 12 und 30 Metern sind für die Wissenschaft im Rahmen eines Antragsverfahrens über das DLR zugänglich und werden von mehr als 4.000 Wissenschaftlern aus 97 Ländern verwendet. Der **Schwerpunkt** des wissenschaftlichen Interesses liegt naturgemäß bei den **Erdwissenschaften** wie der Geologie, Glaziologie, Ozeanografie oder Hydrologie. Aber auch Anwender, die sich mit der Beobachtung von Vegetation, Umweltschutz, Landnutzung, Städte- und Infrastrukturplanung, Kartografie und mit Krisenmanagement befassen, greifen auf die umfangreichen Datensätze zu und werten sie nach ihren Bedürfnissen aus. Eine weitere Produktvariante weist ein gröberes Raster von 90 Metern auf und ist für wissenschaftliche Zwecke nach einfacher Registrierung ohne aufwendiges Antragsverfahren frei verfügbar.

Die gesammelten Daten sind nicht nur hinsichtlich ihres Umfangs beeindruckend, sondern auch hinsichtlich der Informationstiefe. Diese ermöglicht zusätzliche Auswertungen im globalen Maßstab,



Die TanDEM-X-Waldkarte zeigt die dramatischen Abholzungen des Regenwalds in Brasilien

die über die reine Kartierung und Höhenbestimmung hinausgehen. Beispielsweise können anhand der Kohärenz zwischen den Radardaten beider Satelliten, die ein Maß der Interferometriefähigkeit einer bistatischen Aufnahme darstellt, auch Informationen über die Beschaffenheit der Erdoberfläche herausgelesen werden. So erweist sich die Kohärenz generell als Hauptindikator für die Identifizierung von Vegetationsflächen, insbesondere **Wäldern**. Für die Datenverarbeitung wurden Algorithmen aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz entwickelt und für verschiedene Waldtypen bezüglich Baumhöhe, Bewuchsdichte und Struktur optimiert. Das Ergebnis ist eine globale Karte, die bei einer Auflösung von 50 Metern die Ausdehnung bewaldeter Flächen darstellt – die TanDEM-X-Waldkarte.

Wiederholte Höhenmessungen mit TanDEM-X erlauben auch die genaue Beobachtung und Quantifizierung des durch die globale Erderwärmung verursachten Abschmelzens von **Gletschern** und **Eisschildern**. Noch nie zuvor wurden Grönland und die Antarktis so umfassend und mit so hoher Genauigkeit in 3D vermessen. TanDEM-X ist nicht nur Vorreiter für zukünftige bistatische Missionen, sondern ermöglicht auch die Demonstration von innovativen Techniken, wie der digitalen Strahlformung oder der Radar-Tomographie. Mit derartigen Verfahren kann zum Beispiel die Aufnahmekapazität um Größenordnungen gesteigert bzw. die 3D-Struktur von Wäldern und Eismassen erfasst werden.

Bei der Produktion des digitalen Höhenmodells wurde beim Vergleich der Aufnahmen deutlich, dass die Höhengenaugigkeit von TanDEM-X so gut ist, dass Höhenveränderungen selbst innerhalb eines Jahres präzise erfasst werden können. Analysen mit dieser Genauigkeit zeigen, dass die Erdoberfläche ein sehr dynamisches System ist. Nicht nur Höhenveränderungen in Gletschern, Permafrostgebieten und Wäldern, sondern auch landwirtschaftliche Aktivitäten und Veränderungen in der Infrastruktur hinterlassen deutliche Spuren. Daher wurde 2017 entschieden, die vollständige Landmasse der Erde ein weiteres Mal aufzuzeichnen um einen weiteren, unabhängigen und einzigartigen DEM-Datensatz für den Zeitraum von September 2017 bis Mitte 2020 zur Verfügung zu stellen, der die Bewertung der zeitlichen Änderungen im Vergleich zur ersten DEM-Version von TanDEM-X ermöglicht. Dieses „**Change DEM**“ soll Mitte 2021 für kommerzielle und wissenschaftliche Anwendungen verfügbar sein.

## Die vierte Dimension

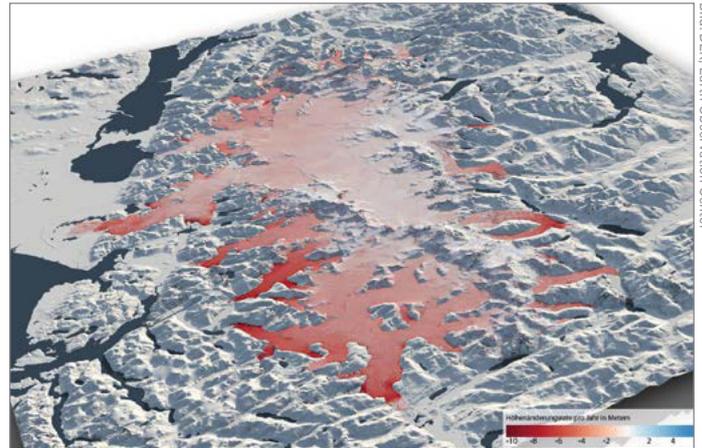
Durch die wiederholte Beobachtung bestimmter Gebiete lässt sich eine zeitliche Abfolge von Daten erstellen – eine **Zeitreihe**. Im Verlauf der Zeit wächst ein Datensatz heran, der neben den drei räumlichen Dimensionen eine vierte Dimension – die Zeit – als neue Informationskomponente enthält und damit neue, bislang verborgene Phänomene ans Tageslicht fördert. Während das Change-DEM einen einmaligen Vergleich zweier Zeiträume zulässt und gewissermaßen einen Schnappschuss der Ereignisse auf globaler Ebene darstellt, erlauben kleinräumigere, lokale Aufnahmen eine höhere Aufnahmefrequenz. Die Entwicklung von lokalen Höhenänderungen wird deutlich sichtbar und Trendanalysen werden genauer, womit sich zum Beispiel das Wachstum und die Degradation von Wäldern messen lassen. Es ist offensichtlich, dass der Wert einer Zeitreihe mit ihrer Dauer zunimmt. Dieser Tatsache muss bei der weiteren Planung der Mission Rechnung getragen werden. Insbesondere durch die interferometrischen Aufnahmen im Formationsflug entsteht dabei ein Informationsgewinn, der ein Alleinstellungsmerkmal darstellt und die Mission TanDEM-X von anderen Erdbeobachtungsmissionen deutlich abhebt.

Mittlerweile haben beide Satelliten ihre nominelle **Lebensdauer** von fünfzehn Jahren deutlich überschritten. Dennoch sind die Radarsysteme beider Satelliten in einem sehr guten Zustand und arbeiten auch nach zehn, beziehungsweise 13 Betriebsjahren noch absolut stabil und innerhalb der Spezifikationen, was sich in der konstant hervorragenden Qualität der Radar-Bildprodukte widerspiegelt. Auch die Verbrauchsressourcen, insbesondere der Treibstoff und die Batteriekapazität, erlauben aus jetziger Sicht einen Satellitenbetrieb ohne drastische Einschränkungen für mehrere zusätzliche Jahre. Die dreidimensionale Sicht auf die Erde, die durch das bistatische Interferometer im All zustande kommt, sowie die zeitliche Komponente bei wiederholten Aufnahmen bestimmter Gebiete bringen weltweit einmalige Datensätze hervor.

## Neue Maßstäbe in der Erdbeobachtung

TanDEM-X demonstrierte in beeindruckender Weise die einzigartigen Möglichkeiten der bistatischen Interferometrie mit Radarsensoren. Darauf möchte man aufbauen: Der nächste Missionsvorschlag „**High Resolution Wide Swath**“, kurz **HRWS**, basiert auf vier Satelliten – einem Hauptsatelliten, der Radarsignale im X-Band sendet und empfängt, sowie drei kleinen Begleitsatelliten, die nur die von der Erde reflektierten Signale empfangen. Die Erzeugung der Höhenmodelle wird durch die Kombination dieser Messungen erheblich erleichtert und beschleunigt, sodass digitale Geländemodelle von jeder Region der Erde auf Anforderung nach kurzer Wartezeit geliefert werden können.

Als Nachfolgemission zu TanDEM-X hat das DLR in den letzten Jahren die bistatische L-Band-Mission **Tandem-L** entworfen, die in der Lage ist, die Landmasse der Erde im Wochenrhythmus abzubilden. Neben der innovativen, hochleistungsfähigen Abbildungstechnik spielen hier die unterschiedlichen Wellenlängen der gesendeten Radarsignale eine entscheidende Rolle: Während die von TanDEM-X im sogenannten X-Band erzeugten Radarwellen mit einer Wellenlänge von etwa drei Zentimetern im We-



Patagonien: Höhenänderungsrate des nördlichen Eisfelds zwischen 2012 und 2016

Bild: DLR, Earth Observation Center

sentlichen an der Oberfläche von Vegetation reflektiert werden, durchdringen L-Band-Signale mit etwa 25 Zentimeter Wellenlänge das gesamte Vegetationsvolumen bis zum darunterliegenden festen Boden.

Ein bistatisches L-Band-System ermöglicht damit eine tomographische Erfassung von Waldgebieten und die Abbildung der 3D-Struktur als Voraussetzung für eine präzise Bestimmung der globalen **Biomasse** und ihrer Veränderung, eine zentrale und bisher nur unzureichend bekannte Größe im Kohlenstoffkreislauf. Die Mission Tandem-L wird neue Maßstäbe in der Erdbeobachtung setzen, den globalen Wandel mit einer neuen Qualität beobachten und wichtige Handlungsempfehlungen ermöglichen. Aktuell laufen Bemühungen, diese Mission im Rahmen des Copernicus-Programms der EU zu implementieren. ●

**Dr.-Ing. Stefan Buckreiß**  
**Dr.-Ing. Manfred Zink**  
**Prof. Dr.-Ing. Alberto Moreira**

## DIE AUTOREN

**Dr.-Ing. Stefan Buckreiß** arbeitet seit 1988 am *DLR*. Aktuell ist er als Missionsmanager der Missionen *TerraSAR-X* und *TanDEM-X* zuständig für die Gesamtmissionsaspekte. Von 2002 bis 2007 war er als Integrationsmanager für den Aufbau des TerraSAR-X-Bodensegments tätig.

**Dr.-Ing. Manfred Zink** arbeitet seit 1988 am *DLR*. Aktuell leitet er die Abteilung Satelliten-SAR-Systeme des Instituts für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme und ist stellvertretender Institutsdirektor. Von 2006 bis 2016 war er als Projektleiter für das *TanDEM-X* Bodensegment und die Gesamtmissionsaspekte verantwortlich.

**Prof. Dr.-Ing. Alberto Moreira** ist seit 2001 Direktor des Instituts für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme und seit 2003 Professor für Mikrowellenfernerkundung am *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*. Er ist der hauptverantwortliche Wissenschaftler (Principle Investigator) der Mission *TanDEM-X*.